

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



## Сборник научных трудов

IV Международной научно-практической конференции  
«САПР и моделирование в современной электронике»

Брянск, 22 – 23 октября 2020 г.

Брянск  
2020



---

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Брянский государственный технический университет

---

**«САПР И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ»**

**IV Международная  
научно-практическая конференция  
(Брянск, 22 – 23 октября 2020 г.)**

**Сборник научных трудов**

**Под общей редакцией А.Ю. Дракина**

**Брянск  
БГТУ  
2020**

**УДК 621.37/.39:658.011.56**  
**ББК 30.2-5-05**

**САПР и моделирование в современной электронике:** сб. науч. тр. IV международной научно-практической конференции, 22-23 октября 2020 г./ под общ. ред. А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2020. – 466 с. – ISBN 978-5-907271-73-9.

**ISBN 978-5-907271-73-9**

Приведены научные статьи участников IV международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», отражающие результаты исследований в области применения моделирования и САПР в электронике, физике, радиотехнике, научных исследованиях и учебном процессе.

Сборник научных трудов предназначен для инженерно-технических работников промышленных предприятий, а также может быть полезен для аспирантов и студентов.

*Редакционная коллегия:*

*Федонин О.Н.* – д.т.н., профессор, ректор БГТУ – председатель оргкомитета;  
*Шкаберин В.А.* – к.т.н., доцент, первый проректор по учебной работе БГТУ;  
*Сканцев В.М.* – к.т.н., доцент, проректор по научной работе БГТУ, руководитель научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – зам. председателя оргкомитета;  
*Демидов А.А.* – д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – научный редактор;  
*Голембиовская О.М.* – к.т.н., доцент, начальник отдела организации научно-исследовательской работы студентов, аспирантов и молодых ученых БГТУ;  
*Дракин А.Ю.* – к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – ответственный редактор;  
*Топчий О.А.* – инженер научно-образовательного дизайн-центра «Силовая электроника и интегральные технологии» – секретарь оргкомитета.

***Сборник научных трудов публикуется в авторской редакции***

**ISBN 978-5-907271-73-9**

© Брянский государственный  
технический университет, 2020

**СЕКЦИЯ «ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ЭЛЕКТРОНИКЕ, ФИЗИКЕ,  
РАДИОТЕХНИКЕ И СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

**APPLICATION OF CAD IN ELECTRONICS, PHYSICS, RADIO  
ENGINEERING AND MODERN INDUSTRY**

DOI: 10.51932/9785907271739\_3

УДК 621.3

Е.И. Бавбель, А.С. Анискевич

(Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники)

**ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ПРОЕКТИРОВАНИИ МОДУЛЯ  
РАДИОТЕЛЕМЕТРИИ БПЛА**

**USE OF CAD IN DESIGNING A RADIO TELEMETRY UNIT**

*Рассмотрен пример применения SolidWorks и Altium Designer в проектировании модуля радиотелеметрии. Было продемонстрировано моделирование печатной платы модуля радиотелеметрии в корпусе и физических процессов, протекающих в нем. Описаны достоинства применяемого способа проектирования.*

*An example of using SolidWorks and Altium Designer in designing a radio telemetry module is considered. The simulation of the printed circuit board of the radio telemetry module in the case and the physical processes taking place in it was indicated. The advantages of the applied design method are described.*

*Ключевые слова: САПР, БПЛА, модуль радиотелеметрии.*

*Keywords: CAD, UAV, radio telemetry module.*

Радиотелеметрические системы представляют собой законченный программно-аппаратный измерительный комплекс для динамических и статических измерений на объектах, которые вращаются (двигаются) или расположены в труднодоступных местах на испытательных стендах турбин и компрессоров, пропеллеров и прочих вращающихся механизмов.

Модуль радиотелеметрии на беспилотном летательном аппарате предназначен для сбора информации, такой как высота полета, скорость, местоположение, данные об аккумуляторах и остатке топлива с бортовых систем и передачи ее посредством радиосвязи на консоль управления, либо сохранения на встроенном носителе. Такие модули в своем большинстве представляют собой небольшую коробочку с проводами и антенной. Внутри содержится плата управления и, в некоторых случаях резервный источник питания. Из-за особенностей применения подобный модуль, в случае падения БПЛА испытывает серьезные нагрузки, в случае потери сигнала управления БПЛА может упасть во всевозможных местах, не исключая озера и болота. В таком случае, для сохранения информации, и облегчения дальнейшего поиска

устройства, модуль должен быть влагостойким, ударопрочным, иметь возможный минимальный вес и обладать хорошей энергоэффективностью.

Проектирование такого модуля можно разделить на две части: в первой из них моделируется и уточняется печатная плата с радиоэлементами, после чего во второй части моделируется корпус изделия с учетом его герметичности включая моделирование ударных нагрузок на корпус и температурное исследование элементов в корпусе.

Структурно отобразим основные элементы, входящие в состав модуля на рис. 1.

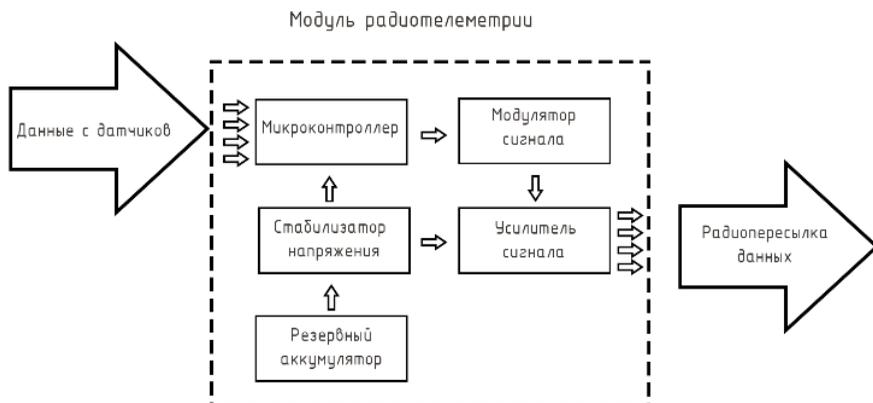


Рис. 1. Структурное отображение элементов модуля

Возьмем основные элементы и, согласно структурному отображению, представим примерное расположение элементов и токопроводящих дорожек на печатной плате в специально предназначенной для этого программе Altium Designer. Результат представленной модели изображен на рис. 2.

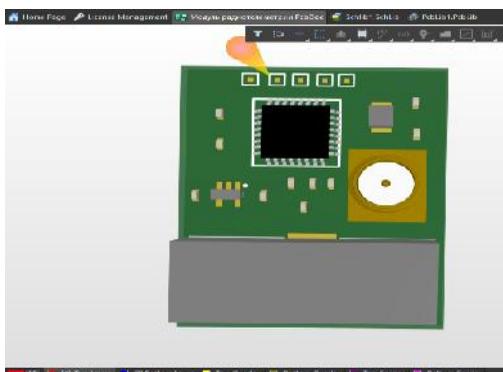


Рис. 2. Внешний вид модели печатной платы, созданный в Altium Designer

Даже такой простой модели будет достаточно для дальнейшего исследования предложенной конфигурации модуля. После экспорта модели

печатной платы из Altium Designer появляется возможность перехода ко второму этапу – моделированию корпуса и исследованию ударных нагрузок и теплового режима.

Зная размеры печатной платы, а также расположение разъемов ввода-вывода переходим в следующую САПР SolidWorks и моделируем корпус изделия (рис. 3).

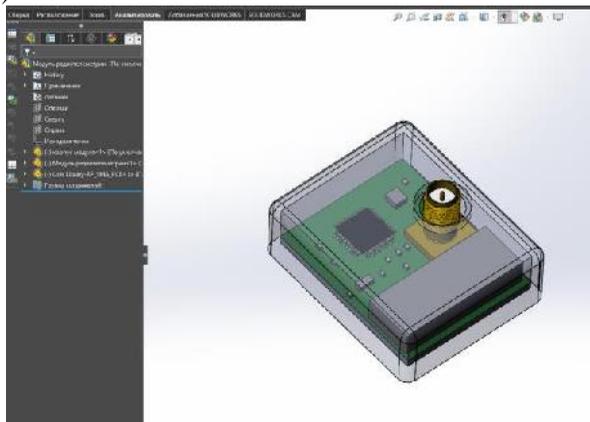


Рис. 3. Смоделированный в программе корпус изделия

Далее, посредством этой же САПР проводится моделирование на ударную нагрузку, с использованием модуля Simulation, также с помощью этого модуля, зная рабочую температуру радиоэлементов возможно изучить температурный режим внутри корпуса устройства (рис. 4, 5).

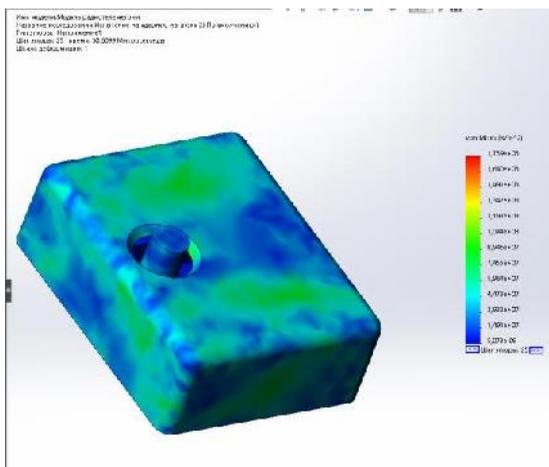


Рис. 4. Результаты моделирования ударных нагрузок

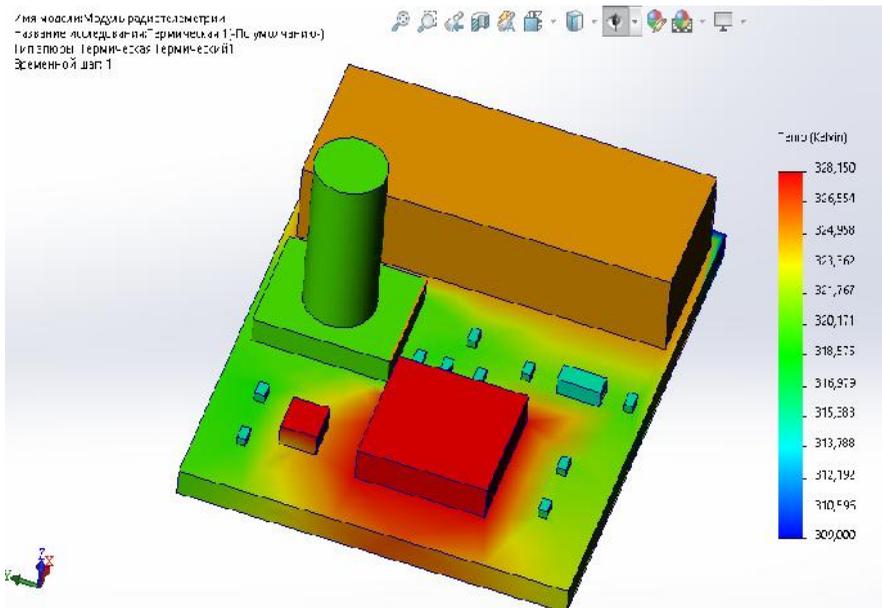


Рис. 5. Результаты температурного моделирования

Взглянув на приведенные результаты, можно в сжатые сроки, и без использования дорогостоящего оборудования оценить слабые места в конструкции, предположить необходимость систем охлаждения, переработать некоторые схемотехнические решения и укрепить общую надежность устройства.

Таким образом, использование современных САПР позволяет ускорить разработку устройства, увидеть слабые места на моменте проектирования и оперативно их усилить, сократить материальные и временные затраты. В целом повысить качество конечной продукции.

### Список литературы

1. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат: учебник/ Е.В. Пирогова. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. - 560 с.
2. Роткоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА/ Л.Л. Роткоп. – М: Сов. радио, 1976.
3. Справка по SOLIDWORKS Simulation [Электронный ресурс]: - Режим доступа: [http://help.solidworks.com/2018/russian/SolidWorks/SWHelp\\_List.html?id=847f2f337c13435cbd1cfe476186b809#Pg0](http://help.solidworks.com/2018/russian/SolidWorks/SWHelp_List.html?id=847f2f337c13435cbd1cfe476186b809#Pg0).
4. Документация Altium Designer [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://www.altium.com/ru/documentation/altium-designer>.

Материал поступил в редколлегию 11.10.20.

В.С. Бизякина

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИИ ОТЖИГА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

APPLICATION OF THE SIMULATED ANNEALING METHOD FOR AUTOMATION  
OF SEARCHING THE SHORTEST WAY OF THE CUTTING TOOL

*Рассматривается решение задачи поиска кратчайшего пути режущего инструмента на основе метода имитации отжига. Разработано информационное и математическое обеспечение задачи. Выполнена модификация алгоритма имитации отжига, для решения задачи поиска кратчайшего пути режущего инструмента. Проведено исследование эффективности метода имитации отжига для решения задачи поиска кратчайшего пути режущего инструмента.*

*This paper deals with the problem of finding the shortest path to the cutting tool based on simulation annealing method. Informational and mathematical support of the problem has been developed. A modification of the annealing simulation algorithm is performed to solve the problem of finding the shortest path for a cutting tool. The study of the efficiency of the simulated annealing method for solving the problem of finding the shortest path of the cutting tool has been carried out.*

*Ключевые слова: автоматизация, поиск кратчайшего пути, режущий инструмент, алгоритм имитации отжига.*

*Keywords: automation, finding the shortest path, cutting tool, simulated annealing.*

Исходными данными задачи являются: карта раскроя и координаты точек врезки. В результате решения будет получен оптимальный маршрут режущего инструмента и вес этого маршрута.

Таким образом, задача поиска кратчайшего пути режущего инструмента формулируется следующим образом: на карте раскроя  $X$  расположено  $n$  точек врезки, между которыми есть расстояние, на котором режущий инструмент находится в состоянии холостого хода. Необходимо найти способ обойти все точки врезки так, чтобы длина холостого хода режущего инструмента была минимальной и внутренние точки врезки контура были посещены раньше внешних. [1]

Конечное множество контуров на карте раскроя обозначим как  $S = \{c_1 \dots c_n\}$ . При построении пути режущего инструмента, если применяется стандартная технология резки на каждом контуре  $c_i$ , необходимо выбрать единственную точку врезки  $p_i = (x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Так как контур является

непрерывной геометрической фигурой, состоящей из набора геометрических объектов, то точка врезки выбирается из конечного множества потенциальных точек врезки  $i$ -го контура  $Q_i = \{q_{im_i} \dots q_{im_i}\}$ . Для определения точек, которые составят конечный путь режущего инструмента, и формирования допустимой последовательности вырезания контуров, необходимо выполнить оптимизацию пути. В качестве метрики в данной задаче выступит евклидово расстояние между двумя точками на плоскости, определяемое по формуле (1)

$$L_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \quad (1)$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты первой точки,  $(x_i, y_i)$  – координаты второй точки.

Для задачи минимизации общей длины холостого хода режущего инструмента целевая функция – это сумма длин допустимых переходов между точками:

$$\min \left[ L_{\text{общ.х.х}}(k) = \sum_{i=1}^{i=n-1} L_{i,i+1} + L_{n,1} \right].$$

Критерием является кратчайший путь [1].

На задачу наложены следующие ограничения:

1. Путь начинается и заканчивается в начале координатной системы.
2. Путь проходит только через одну точку каждого контура (точку врезки).

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

3. Внешний контур детали вырезается только после всех внутренних контуров.

Пусть  $S$  - контур обрабатываемой детали. Тогда, для каждого контура  $S$  допускается наличие внутреннего контура  $S^*$ , так что

$$\sum_i^K S \cdot < \sum_j^K S.$$

Контур может находиться внутри другого контура тогда и только тогда, когда  $x_{min} \leq x \cdot min; y_{min} \leq y \cdot min; x_{max} \geq x \cdot max; y_{max} \geq y \cdot max$ ;

т.е. если минимальные значения координаты точек внешнего контура меньше минимальных значений координат точек внутреннего контура, и максимальные значения координат точек внутреннего контура меньше максимальных значений координат точек внешнего контура.

Таким образом, в общую длину пути включается расстояние между всеми внутренними контурами [2].

Для решения данной задачи был выбран алгоритм имитации отжига. Основан на моделировании физического процесса отжига металла, даёт близкое к точному решению за счёт вероятностного перехода к худшему решению.

Алгоритм включает следующие шаги:

1. Задание начальной температуры.
2. Вычисление целевой функции.

3. Понижение температуры.

4. Проверка условия допустимости.

5. Если условие 4 соблюдено, то принимается решение о дальнейшем преобразовании, иначе вычисляется критическая величина и случайное число для сравнения. Если критическая величина больше случайной величины, то маршрут принимается, в противном случае - возврат к предыдущему маршруту.

6. Проверка условия окончания.

Временная сложность составляет  $O(n^2 \cdot \log(n))$ .

Достоинства: эффективность вычисления; модифицируемость, позволяющая добиться большего эффекта при вычислении.

Недостатки: из-за вероятностной природы может дать некорректный результат при нахождении локального минимума [3].

В результате выполнения работы были получены следующие результаты:

*Таблица 1. Результаты исследования эффективности алгоритма имитации отжига*

№	Количество точек	Исходное решение	Оптимальное решение
1	5	906,65	906,65
2	10	2587,65	2587,65
3	15	2513,45	1833,55
4	20	2900	2287
5	25	4222	3222

*Таблица 2. Результаты исследования эффективности алгоритма имитации отжига*

№	Количество точек	Математическое ожидание	Дисперсия
1	5	1190,2	27222
2	11	3522,2	75133
3	21	5503,4	72218

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что при небольших объёмах данных алгоритм находит оптимальное решение, а с увеличением их объёма - близкое к оптимальному. Следовательно, применение алгоритма имитации отжига для решения данной задачи обосновано.

#### **Список литературы**

1. Мурзакаев, Р.Т. Применение метаэвристических алгоритмов для минимизации длины холостого хода режущего инструмента / Р.Т. Мурзакаев, В.С.Шилов, А.В.Бурылов // Вестник ПНИПУ Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2015. - №14. - С.123 -136.

2. Верхотуров, М.А. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки/ М.А. Верхотуров, П.Ю. Тарасенко // Вестник УГАТУ (Уфимский авиационный технический университет). Управление, вычислительная техника и информатика. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. – Т.10. – № 2 (27). – С. 123–130.

3. Skiena, S.S. The Algorithm Design Manual / S.S. Skiena // Springer-Verlag London Limited- 2008.-P.254-260.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Б.К. Богомолов

(г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДОВ И СОСТОЯНИЙ ТРИТТЕРА

### INVESTIGATION OF TRITTER TRANSITIONS AND STATES

*Рассматриваются результаты моделирования переходов и состояний триттера (троичного триггера) в САПР БИС Ковчег 3.02, MicroCAP 8, MAX+plus II, в которых ранее обнаружены несовпадающие результаты. Анализируется переход триттера из состояния 200<sub>3</sub> в новое состояние при подаче на его вход сигнала 001<sub>3</sub>. Обосновывается корректность моделирования этого перехода в MAX+plus II и отличие этого перехода в Ковчеге 3.02 и MicroCAP 8.*

*We consider the results of modeling the transitions and states of a tritter (ternary trigger) in CAD VLSI Kovcheg 3.02, MicroCAP 8, MAX + plus II, in which mismatched results were previously found. The transition of the tritter from the 200<sub>3</sub> state to a new state is analyzed when the 001<sub>3</sub> signal is applied to its input. The correctness of modeling this transition in MAX + plus and the difference of modeling this transition in Kovcheg 3.02 and MicroCAP 8 are substantiated.*

*Ключевые слова: троичная логика, троичный триггер, моделирование.*

*Keywords: ternary logic, ternary trigger, modeling.*

Важность и актуальность разработки троичных устройств и их исследований подтверждается тем, что уже 49 раз проходил ежегодный всемирный симпозиум «International symposium on multiple-valued logic». В этом году он пройдет 50-ый раз 9-11 ноября в Японии [1].

Обнаруженные различия в таблице истинности (ТИ) при моделировании триттера в разных САПР БИС показали, что возможны два пути дальнейшего улучшения устойчивости работы триттера и, в более широком смысле, троичных устройств [2]. Первый – улучшение используемых в САПР БИС алгоритмов и их программной реализации. Это направление развития проиллюстрировано нами в [3], где показано, что при переходе от версии САПР БИС Ковчег 2.2 к v.3.02 и к v.3.04 увеличивается число совпадений переходов триттера в полной ТИ, полученной при помощи этих версий САПР с ТИ полученной при помощи САПР БИС MAX+plus II, которая признана нами основной (базовой). Второй путь – это совершенствование самой схемы триттера и условий его работы (порядка подачи сигналов на входы, например).

В настоящей статье приведены результаты анализа ряда переходов и состояний триттера, которые привели к отличиям полной ТИ триттера при исследовании в разных САПР БИС и ПЛИС [2]. Т.к. эти результаты во многом идентичны, рассмотрим наиболее подробно состояние, которое в двух САПР

БИС (MAX+plus II и MicroCAP8, далее МС8) является определенным и устойчивым, а в трёх версиях САПР БИС Ковчег – неустойчивым. Это состояние триттера впервые было обнаружено и описано в [2]. Схема триттера представлена на рис. 1 и рис. 2 [4-5].

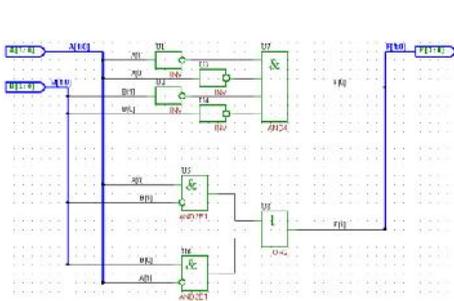


Рис.1. Триттерный элемент, реализующий функцию Вебба в САПР БИС Ковчег 3.02

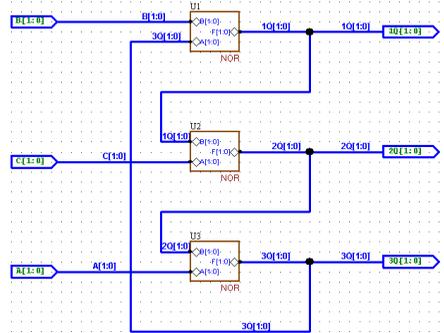


Рис.2. Логическая схема триттера в САПР БИС Ковчег 3.02

Триттер при этом переходит из предыдущего состояния  $200_3$  при подаче входного сигнала  $001_3$  в MAX+plus II в состояние  $120_3$  (см. рис. 3), в Ковчеге 3.02 – в  $XXX_3$  (см. рис. 4), в МС8 – в  $012_3$  (см. рис. 5).

Более тщательный анализ приведённых временных диаграмм показал, что переход  $200_3 \rightarrow 012_3$  при подаче на вход триттера сигнала  $001_3$  в МС8 происходит не сразу, т.к. на двух выходах из шести наблюдаются кратковременные риски (см. рис.5). На выходах  $Q_{10}$  и  $Q_{21}$  появляется кратковременный сигнал  $1_2$ . Но самое главное отличие состоит в том, что MAX+plus II и МС8 дают в конечном итоге разный результат, соответственно, триттер переходит в состояния  $120_3$  и в  $012_3$ . Какой из переходов соответствует теоретически ожидаемому, нами было установлено путём анализа прохождения сигналов через цепи триттера «вручную». Этот анализ показал, что триттер из состояния  $200_3$  при подаче сигнала  $001_3$  переходит в  $120_3$ . Это совпадает с результатом моделирования в MAX+plus II и противоречит результату моделирования триттера, полученного для этого перехода в МС8.

Моделирование перехода триттера в Ковчеге 3.02 из состояния  $200_3$  при подаче сигнала на вход  $001_3$  не даёт установления устойчивого состояния (см. рис.6).

Исследование состояния выходов триттера при этих переключениях показало, что в начале, за короткое время происходит ряд переключений значений сигналов на выходах. Выходы триттера последовательно переходят

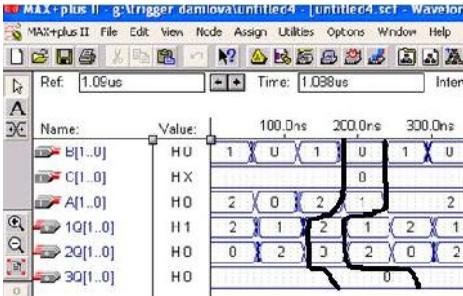


Рис.3. Результат моделирования триггера в MAX+plus II. Помечен переход  $200_3 \rightarrow 120_3$  при подаче на вход  $001_3$

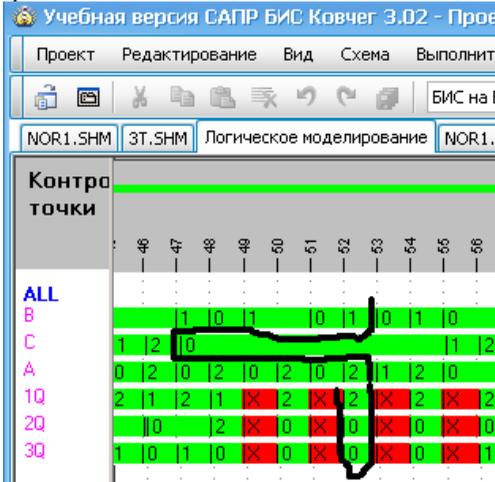


Рис.4. Результат моделирования триггера в Ковчег 3.02. Помечен переход  $200_3 \rightarrow XXX_3$  при подаче на вход  $001_3$

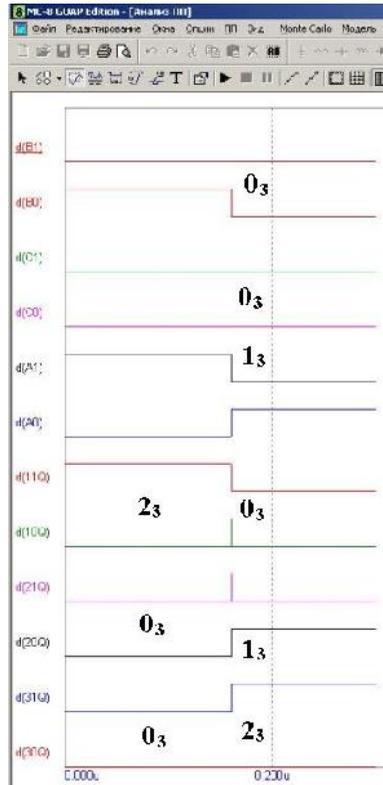


Рис.5. Результат моделирования триггера в MS8. Помечен переход  $200_3 \rightarrow 012_3$  при подаче на вход  $001_3$

в следующие состояния:  $200_3 \rightarrow 302_3 \rightarrow 102_3 \rightarrow 002_3 \rightarrow 022_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 010_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 112_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 002_3 \rightarrow 022_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 010_3 \rightarrow (01X_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow X12_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 0X2_3 \rightarrow 012_3)_n$ . И далее происходит циклическое повторение переходов  $(01X_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow X12_3 \rightarrow 012_3 \rightarrow 0X2_3 \rightarrow 012_3)_n$  до прихода на входы триггера нового сигнала. Анализ этих переключений показывает, если не учитывать состояние  $X_3$ , моделирование перехода триггера в Ковчеге 3.02 из состояния  $200_3$  при подаче сигнала  $001_3$  на вход до подачи на вход нового сигнала приводит к стремлению триггера принять состояния выходов  $012_3$ .

То есть Ковчег 3.02 стремится показать результат  $012_3$ , совпадающий с результатом моделирования этого перехода в MS8.

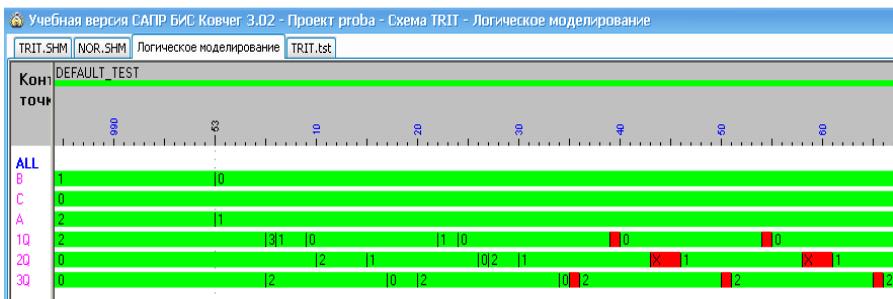


Рис.6. Результат моделирования триггера в Ковчег 3.02. Показаны промежуточные переходы выходов триггера до установления устойчивого состояния (переход  $200_3 \rightarrow XXX_3$  при подаче на вход  $001_3$ )

Таким образом, три САПР БИС показывают при рассмотренном переходе триггера три разных результата.

*Результаты магистерской диссертации Манахова И.И. использованы в настоящей статье, за что автор выражает ему благодарность.*

#### Список литературы

1. IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2020) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mvl.jpn.org/ISMVL2020/> (дата обращения: 9.04.2020).
2. Богомолов, Б.К. Отличие состояний триггера в разных САПР БИС и ПЛИС / Б.К. Богомолов, И.И. Манахов // «САПР и моделирование в современной электронике»: Сб. науч.тр. III межд. науч.-практ. конф. (Брянск, 24-25 октября 2019 г.). – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 44-48.
3. Богомолов, Б.К. Полная таблица истинности триггера / Б.К. Богомолов // «Современные проблемы телекоммуникаций»: материалы межд. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 23-25 апреля 2020 г.). – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2020. – С.498-503.
4. Богомолов, Б.К. Исследование троичного триггера на двухуровневых логических элементах в САПР «КОВЧЕГ 3.02» / Б.К. Богомолов, И.И. Манахов // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч.тр. II межд. науч.-практ. конф. (Брянск, 24-25 октября 2018 г.). – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 62-66.
5. Богомолов, Б.К. Исследование троичного триггера в САПР “Ковчег 3.02” / Б.К. Богомолов, И.И. Манахов // «Современные проблемы телекоммуникаций»: Рос. науч. техн. конф. (Новосибирск, 25-26 апреля 2019 г.). – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2019. – С. 561-571.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

О.В. Булыгина, Н.А. Уварова  
(г. Смоленск, Филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

## **РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОРАЙОНОВ**

**DEVELOPING A MODULE FOR INTELLECTUAL ANALYSIS OF OPERATING  
MODES OF ENERGY DISTRICTS**

*Описана необходимость использования интеллектуального анализа режимов работы энергорайонов, а также описан созданный модуль, основанный на применении методов нечеткой логики.*

*This article describes the need to use an intelligent analysis of operating modes of energy regions, and also describes the created module based on the application of fuzzy logic methods.*

*Ключевые слова: энергорайон, энергетический режим, нечеткая логика.  
Keywords: energy district, energy regime, fuzzy logic.*

На сегодняшний день внедрение новейших информационных технологий в деятельность электроэнергетических организаций является стратегически важной задачей. В значительной степени это обусловлено сложностью и многомерностью электроэнергетической системы, объединяющей огромное количество объектов ЕЭС России и обеспечивающей электрической энергией огромную территорию нашей страны.

Управление режимом работы электроэнергетической системы требует учёта множества параметров и факторов, взаимосвязи между которыми часто неочевидны и (или) неоднозначны. В связи с этим, планирование и управление в электроэнергетике, по-прежнему, во многом опирается на личный опыт экспертов (специалистов). В данном процессе роль человеческого фактора значительна, что, в свою очередь, говорит об имеющихся рисках, связанных с возможностью принятия неправильного или неточного решения, в частности, при определении энергетического режима энергорайона.

Данный факт обуславливает актуальность создания интеллектуальной информационной системы, направленной на снижение вероятности возникновения ошибок при управлении электроэнергетическим режимом, что будет способствовать повышению эффективности работы диспетчерского персонала.

Так, многие исследователи [1,2,3,4] отмечают значимость и необходимость подобных решений. Авторами же данного исследования предлагается разработка модуля интеллектуального анализа энергетического режима, которая включает в себя оценку параметров режима, производимого с использованием методов нечеткой логики. Разработка такого модуля интеллектуального анализа энергетического режима будет осуществляться на

примере энергорайона ПС 220 кВ Литейная, которая относится к операционной зоне филиала АО «СО ЕЭС» Смоленское РДУ.

Создание нечетко-логической системы выполнено в среде MATLAB с помощью пакета Fuzzy Logic Toolbox, где с помощью нечетких продукционных правил смоделирован режим работы энергорайона. Входами нечетко-логической системы, реализующей алгоритм нечетко-логического вывода Мамдани, являются пять параметров (в частности, токовая нагрузка четырех линии электропередач в процентах и нагрузка наиболее крупного потребителя энергорайона – ПС 220 кВ Литейная), а выходом – качественная оценка режима энергорайона.

На рис. 1 показана структура нечетко-логической системы, реализующей интеллектуальный анализ электроэнергетического режима (на примере энергорайона ПС 220 кВ Литейная).

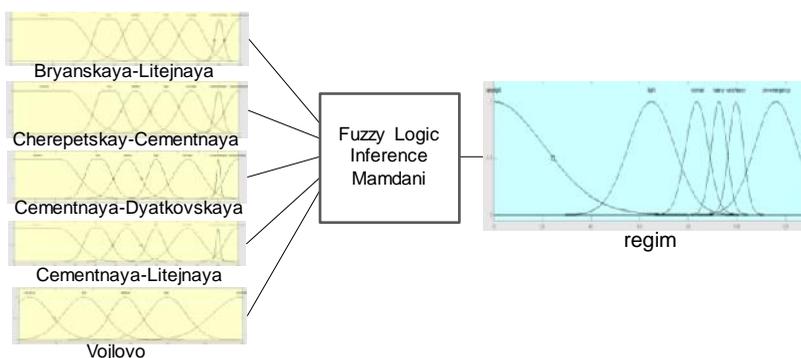


Рис. 1. Структура нечетко-логической системы

На основе экспертной оценки исходных данных параметров были построены функции принадлежности (для терм-множеств используются функции типа *gaussmf*):

- входные функции «Процент токовой нагрузки ВЛ 220 кВ Брянская – Литейная с отпайкой на ПС 220 кВ Войлово», «Процент токовой нагрузки ВЛ 220 кВ Черепетская ГРЭС – Цементная», «Процент токовой нагрузки ВЛ 110 кВ Цементная – Дятьковская», «Процент токовой нагрузки ВЛ 110 кВ Цементная – Литейная» заданы на интервале от 0 до 110 следующими значениями лингвистической переменной: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая», «предельно допустимая», «недопустимая»;

- входная функция «Нагрузка ПС 220 кВ Войлово» задана на интервале от 0 до 120 следующими значениями лингвистической переменной: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая»;

- выходная функция «Режим» задана на интервале от 0 до 130 следующими значениями лингвистической переменной: «очень легкий», «легкий», «нормальный», «тяжелый», «очень тяжелый», «предварительный».

В разработанном модуле используется продукционная модель знаний, которая представляет собой базу нечетких продукционных правил следующего вида:

**IF** *Bryanskaya-Litejnaya* **IS**  $b_i$  **AND** *Cherepetskay-Cementnaya* **IS**  $c_k$  **AND**  
*Cementnaya-Dyatkovskaya* **IS**  $a_n$  **AND** *Cementnaya-Litejnaya* **IS**  $s_m$  **AND**  
*Vojlovo* **IS**  $v_p$  **THEN** *regim* **IS**  $r_j$

где  $b_i$  – терм переменной *Bryanskaya-Litejnaya*;  $i$  – индекс диапазоне [1..7];  
 $c_k$  – терм переменной *Cherepetskay-Cementnaya*;  $k$  – индекс диапазоне [1..7];  
 $a_n$  – терм переменной *Cementnaya-Dyatkovskaya*;  $n$  – индекс диапазоне [1..7];  
 $s_m$  – терм переменной *Cementnaya-Litejnaya*;  $m$  – индекс диапазоне [1..7];  
 $v_p$  – терм переменной *Vojlovo*;  $p$  – индекс диапазоне [1..5];  
 $r_j$  – терм переменной *regim*;  $j$  – индекс диапазоне [1..6].

Как представляется, внедрение разработанного модуля интеллектуального анализа режимов позволит повысить эффективность работы региональных диспетчерских организации. Результаты применения данного модуля для качественной оценки режима энергорайона ПС 220 кВ Литейная позволили сделать вывод о целесообразности создания подобных нечетко-логических систем для других энергорайонов электроэнергетической системы России.

*Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-1534.2020.9 «Методы моделирования сложных систем с использованием нечетко-сетевых алгоритмов и роевого интеллекта».*

### Список литературы

1. Павлов, В.И. Эффективность информационной поддержки оператора при управлении объектом энергетики/ В.И. Павлов, Т.В. Аксенова, В.В. Аксенов// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 70-75.
2. Башлыков, А.А. Проектирование систем принятия решений в энергетике/ А.А. Башлыков // М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1986. – 120 с.
3. Пащенко, Ф.Ф. Системы информационной поддержки принятия решений в энергетике/ Ф.Ф. Пащенко, И.С. Дургарян, А.Ф. Пащенко, О.Н. Белова, Е.Ю. Медведева // Датчики и системы. – 2014. – №6. – С. 24-33.
4. Булыгина, О.В. Элементы системы поддержки принятия решений в автоматизированной системе диспетчерского управления АО "СО ЕЭС"/ О.В. Булыгина, К.А. Булыгин // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 140-141.

*Материал поступил в редколлегию 07.10.20.*

В.Н. Бондарев, А.А. Воскресенский  
(Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники)

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ САПР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ**

### **ANALYSIS OF CAD EFFICIENCY FOR SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN PCB**

*Приведены классификация САПР, описание программ SolidWorks и Ansys, их системные требования. Продемонстрировано моделирование тепловых процессов печатной платы в программах SolidWorks и Ansys. Показана сравнительная оценка данных САПР.*

*The CAD classification, description of SolidWorks and Ansys programs, their system requirements are given. Simulation of thermal processes of a printed circuit board in SolidWorks and Ansys programs is demonstrated. Comparative evaluation of CAD data is shown.*

*Ключевые слова: САПР, моделирование, SolidWorks, Ansys.*

*Keywords: CAD, modeling, SolidWorks, Ansys.*

В наше время существует большое количество САПР, помогающих нам решать разные задачи. В ходе работы будут рассмотрены такие САПР, как SolidWorks и Ansys [1].

Системы САПР делятся на легкие, средние и тяжелые. Средние системы САПР — это программы для 3D-моделирования, проведения расчетов, автоматизации проектирования электрических, механических и прочих систем. Функциональности САПР среднего уровня достаточно для решения проектных задач большей части клиентов. Тяжелые САПР предназначены для работы со сложными изделиями. Применяются в основном в авиастроении, кораблестроении, где нужна высокая точность и минимальная погрешность измерений. От САПР среднего уровня тяжелые САПР отличаются другой архитектурой и алгоритмами работы [1].

САПР SolidWorks является системой среднего уровня. SolidWorks – система автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий. В зависимости от поставленных задач SolidWorks предлагает следующие конфигурации системы: SolidWorks, SolidWorks Professional и SolidWorks Premium. SolidWorks работает на операционной системе Windows, имеет поддержку русского языка, и, соответственно, поддерживает ГОСТ и ЕСКД [2].

В табл. 1 приведены системные требования SolidWorks Premium Edition 2018 SP2.0.

Таблица 1. Системные требования программы SolidWorks [2]

Операционная система	Windows 7.SP1/8.1/10 x64
Оперативная память	Рекомендуется 8 ГБ или более
Дисковое пространство	5 ГБ или более
Процессор	Intel и AMD с поддержкой технологии SSE2
Видеокарта	Рекомендуются сертифицированные графические карты для рабочих станций с поддержкой OpenGL и протестированные драйверы к ним

САПР Ansys – тяжелая система. Ansys – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей [3].

Семейство программных продуктов ANSYS в области механики деформируемых твердых тел позволяет выполнять как общие расчеты, так и глубокий детализированный анализ. Широкие возможности моделирования могут быть использованы для проведения линейного, нелинейного междисциплинарного анализа [3].

В табл. 2 приведены системные требования Ansys 17.1.

Таблица 2. Системные требования программы Ansys 17.1 [3].

Операционная система	Windows 7 (64-bit Professional and Enterprise editions)
	Windows 10 (64-bit Professional, Enterprise and Education editions)
	Windows Server 2012 R2 Standard Edition (64-bit)
Оперативная память	рекомендуется 2 ГБ или более на каждое ядро процессора
Дисковое пространство	39 ГБ
Процессор	Многопроцессорность

В ходе работы проводится сравнение результатов температурного моделирования печатной платы, выполненных в программах SolidWorks и Ansys на основе метода конечных элементов. С целью уменьшения времени моделирования были выбраны резисторы и конденсаторы примитивной формы, упрощены микросхемы (без скругленных краев и выводов). Начальные условия температурного моделирования следующие: температура окружающей среды 45 °С, конвекция 25 Вт/м<sup>2</sup>.

Результаты моделирования в SolidWorks и Ansys приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

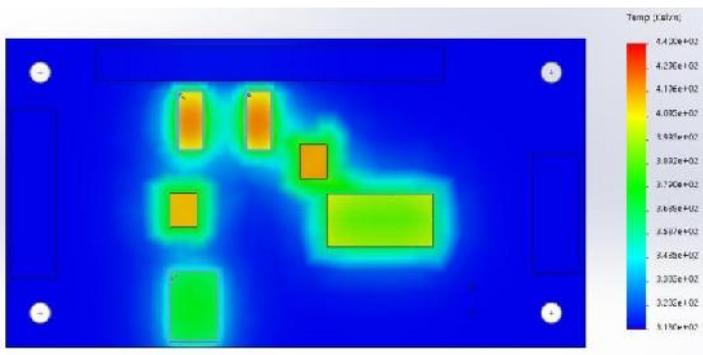


Рис. 1. Результат моделирования в программе SolidWorks

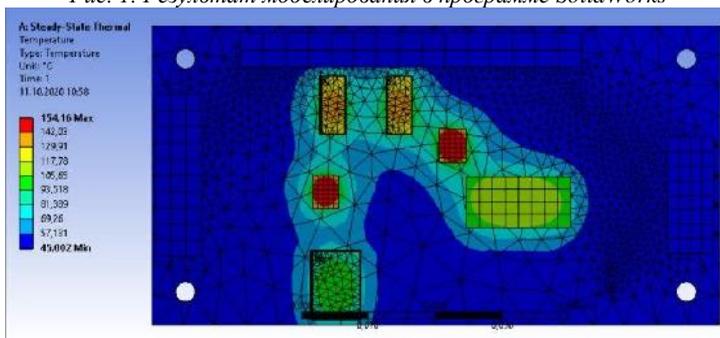


Рис. 2. Результат моделирования в программе Ansys

Сравнение результатов теплового моделирования:

1. Программа Ansys построила сетку на 5 секунд быстрее.
2. Программа SolidWorks выполнила моделирование на 20 секунд быстрее.
3. В программа SolidWorks максимальная температура больше на 13 градусов.
4. В программе Ansys распределение температур точнее.

Таким образом, программа SolidWorks дает погрешность результатов в сравнение с программой Ansys, однако выполняет моделирование за меньший промежуток времени.

### Список литературы

1. *Поинтф* [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.pointcad.ru/novosti/obzor-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya>.
2. *Quantum* [Электронный ресурс]: - URL: <https://quantum-soft.net/soft/office/186981-solidworks-premium-edition-2018-sp20.html>.
3. *Quantum* [Электронный ресурс]: - URL: <https://quantum-soft.net/soft/other-soft/231729-ansys-products-2020-r1.html>.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Р.С. Гришин, Д.В. Неснов

(г. Самара, Самарский государственный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРТАТИВНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА COMPACTWORKSHOP**

### **MODELING OF A MULTIFUNCTIONAL PORTABLE WORKPLACE COMPACTWORKSHOP**

*Описывается проектирование объемной модели портативного верстака CompactWorkshop при помощи графической системы КОМПАС-3D, а также создание фотореалистичных изображений с помощью инструмента Artisan Rendering и анимированных действий разложения и обратного сложения в стандартных операциях редактора.*

*This article describes the design of a three-dimensional model of a portable CompactWorkshop workbench using the COMPASS-3D graphics system, as well as the creation of photorealistic images using the Artisan Rendering tool and animated decomposition and reverse addition actions in standard editor operations.*

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, трехмерная графика, верстак CompactWorkshop, сборка.*

*Keywords: computer modeling, three-dimensional graphics, Compact Workshop workbench, Assembly.*

Наш быстро прогрессирующий информационный век не может обойтись без инноваций, которые делают жизнь людей проще. Облегчение разных сфер в жизни приходится не только на простых людей в быту, но и на инженеров, и рабочих в их сфере. Одним из таких новшеств является компьютерное моделирование. Множество приборов, изделий, станков и отдельных деталей создаются сейчас в основном в компьютерных 3D-редакторах. В них можно создать не только чертежи объектов, но и так же объемную модель. Это упрощает производство различных устройств, а также значительно помогает изучить все изделие или каждую деталь и каждую часть изделия, не собирая его в реальности.

В 3D-редакторах возможно создание трехмерных моделей. Что же это такое? Объемное трехмерное моделирование представляет собой многовекторный чертеж, имеющий не только номинальную высоту, длину и ширину, но и визуальное воплощение. Оно широко применяется в таких отраслях деятельности человека, как индустрия развлечения, медицина, а также промышленность.

Целью работы является изучение возможностей трехмерного компьютерного редактора Компас-3D, предназначенного для создания чертежей и объемных деталей. И как итог, проверка возможностей данного

программного обеспечения для упрощения восприятия и создания какого-либо объекта своими руками по модели созданной при помощи стандартных операций данной программы. Прodelанный труд и анализ продемонстрирован на устройстве «Мультифункциональный портативный верстак CompactWorkshop».

Сам из себя верстак представляет удобное, многофункциональное рабочее место, которое может быть у каждого, даже в небольшой мастерской или с малым местом в гараже. Данное изделие способно проводить ряд действий, таких как выпиливание лобзиком, сверление дрелью, а также осуществлять равномерное разделение досок, деревянных плит или материалов из пластика (трубок, досок, реек) на равные части при помощи циркулярной пилы.

Полная работа при создании портативного верстака CompactWorkshop осуществлялась в редакторе Kompas v18.1 [2, 3]. В данной программе создавались все детали отдельно и далее собирались в под сборки, которые в свою очередь уже собирались в более крупные и общие сборки. Всего в данной работе было создано 493 детали, из них 120 оригинальные детали, 373 стандартные детали. Общая сборка верстака включает в себя 25 более мелких подборок (20 крупные под сборки, включающие в себя основные элементы верстака и 5 маленьких подборок, типа «система передвижения» или «подборка болта с шайбами»).

Во время конструирования CompactWorkshop использовались классические инструменты КОМПАСа, например, такие как: кинематическая операция, вырезание вращением, выдавливание, вращение, резьбовые отверстия и многие другие. Те детали, которым были необходимы стандартные конструктивные элементы, создавались с помощью прикладной библиотеки редактора, в основном в работе были использованы «Резьбовые отверстия». В сборке так же присутствуют крепежные детали (болты, винты, шпильки, гайки и пр.) которые взяты из Библиотек стандартных изделий крепежных деталей КОМПАСа.

На рис.1 можно видеть объемный верстак CompactWorkshop собранный из отдельных подборок и деталей, с учетом всех размеров и расположений отверстий и соединений.

При помощи инструмента высококачественных трехмерных моделей Artisan Rendering создавался фотореалистичный рисунок мультифункционального верстака CompactWorkshop (Рис.2). Artisan Rendering – это инструмент создания фотореалистичных картинок из САПР трехмерного моделирования быстро и просто. Он спроектирован во многие трёхмерные редакторы, в том числе и в программное обеспечение КОМПАС-3D.



*Рис.1. Трехмерная модель multifункционального верстака CompactWorkshop*

Приложение Artisan Rendering нацелено на создание процесса, позволяющего пользователям комбинировать материалы и освещение, до перемещения в конечную галерею качественных изображений. Так же с помощью данного программного обеспечения можно комбинировать фон и сцену и буквально в несколько кликов пройти путь от трехмерной модели до высококачественного изображения. Простота и скорость установки полной сцены (Снэпшота) – это основа приложения Artisan Rendering, позволяющего нескольким снэпшотам быть просмотренными и сгенерированными, готовыми



*Рис.2. Фотореалистичное изображение multifункционального верстака CompactWorkshop на одном из фонов*

для программного рендеринга [1]. Фото-визуализация помогает пользователю, инженеру, не видевшему никогда в жизни данное устройство перед собой, увидеть его полный размер, точный цвет и материал. А также по виду узнать примерный материал и прикинуть, подходит ли он для данного изделия.

После создания полной сборки изделия, соединения всех конструктивных, стандартных и оригинальных деталей в под сборки и в конечном итоге полную сборку, была сделана минимальная, но информативная анимация сборки в рабочее состояние и разборки для компактного и легкого перемещения (транспортирования) верстака CompactWorkshop.

Данная анимация (видео анимации) было сделано при помощи стандартной библиотеки КОМПАСа «Анимация». Для её создания было применено множественное количество шагов и сцен (а конкретнее, было сделано 4 основных шага, в которых было 1-4 сцен). В видео наблюдается сначала полное сложение устройства из рабочего состояния, убираются опоры рабочих зон и происходит закрытие внутренней части, а далее полный разбор-раскладывание, разложение до рабочего состояния. Данная анимация помогает понять из чего состоит верстак, где находится какая под сборка и деталь, а также что как крутится и как сворачивается. Как легче и быстрее собрать изделие в рабочее состояние, не допустив пропуск вставки какой либо детали или же поломки изделия из-за неверной установки крепежных изделий устройства.

В результате выполненной работы были смоделированы 3D-модели деталей и объемная сборка мультифункционального верстака CompactWorkshop, которые полностью соответствует всем геометрическим и технологическим требованиям. А также сделаны фотореалистичные изображения данного станка на различных фонах и сделана анимация сборки разборки изделия.

### Список литературы

1. *Artisan Rendering*. Система фотореалистичного рендеринга для КОМПАС-3D / Руководство пользователя. – Москва, Россия. – 31с.
2. *Аскон. КОМПАС-3D V17. Руководство пользователя*. – Москва, Россия: Аскон, 2017. – 2920 с.
3. *Аскон. Азбука КОМПАС 3D V17*. – Москва, Россия: Аскон, 2018. – 478с.
4. *Большаков, В.* Твердотельное моделирование деталей в САД-системах. AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. Большаков, А. Бочков, Ю. Лячек. – Питер, 2015. – 480 с.
5. *Ефремов, Г.* Инженерная и компьютерная графика на базе графических систем. / Г. Ефремов, С. Ньюкалова // Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ). – 2014. – 256 с.

*Материал поступил в редколлегию 06.10.20.*

Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев  
(г. Набережные Челны, ПАО «КАМАЗ»,  
Набережночелнинский институт (филиал) КФУ)

## **ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ - ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**HYBRID SIMULATION IS AN INSTRUMENT FOR IMPROVING QUALITY  
OF THE DEVELOPED WHEELED VEHICLES**

*Для повышения качества передних осей колесных транспортных средств на этапе проектирования используется гибридный стенд, включающий в себя собственно стенд и математические модели транспортного средства и системы управления стендом для формирования нагрузочных режимов.*

*To improve quality of wheeled vehicles front axles on the design stage a hybrid stand is used which includes the stand itself and mathematical models of the vehicle and the stand control systems to form loading modes.*

*Ключевые слова: моделирование, колесное транспортное средство, передняя ось, стенд, требования, качество, система управления, валидация.*

*Keywords: simulation, wheeled vehicle, front axle, stand, requirements, quality, control system, validation.*

Стоимость и трудоемкость проведения лабораторно-дорожных испытаний серийных и опытных образцов колесных транспортных средств (КТС) всегда были и остаются достаточно высокими. Связано это как с необходимостью изготовления опытных образцов для проведения испытаний, так и закупкой специального испытательного оборудования, строительством или арендой исследовательских полигонов, сооружений и стендов, постоянным ростом цен на энергоносители и т.д. Практика показывает, что результаты испытаний одной и той же модели КТС, выполненных в разные годы, могут отличаться. Возникает это вследствие воздействия ряда случайных, зачастую не контролируемых экспериментатором, факторов.

Известно, что стоимость устранения конструкторских дефектов обходится производителю выше, если дефекты выявлены на более поздних этапах жизненного цикла изделия. Эти обстоятельства заставляют специалистов искать другие пути обеспечения качества КТС на самой ранней стадии - проектирования. Эффективными и перспективными направлениями решения практических задач совершенствования и обеспечения качества на этом этапе являются методы математического моделирования.

Эти методы, благодаря их оперативности и приемлемой точности, становятся альтернативой физическим экспериментам. Более того, за ними уже закрепилось название – «виртуальные», или цифровые испытания. Все

большую популярность приобретают цифровые «двойники» изделий. И, что самое главное, их ценность особо возрастает в условиях экономического кризиса, требующего от разработчика сложных изделий всемерного сокращения затрат.

В последние годы в арсенале исследователей все большее применение находят также и технологии гибридного моделирования. «Гибридизация» в данном случае заключается в том, что исследуемая система представляется состоящей из двух частей – математической модели и натурального образца.

Так, к примеру, в работе [1] динамические характеристики манипулятора и относительное движение соединяемых объектов при причаливании космических аппаратов вычисляются с помощью математической модели, а стыковочные агрегаты представлены натурными образцами. Относительное движение этих агрегатов воспроизводится на стенде под управлением компьютера. Развитию методов испытаний, основанных на сочетании физических и математических методов моделирования при разработке тормозных систем автомобилей посвящена диссертация [2]. Эти и многие другие работы подтверждают их высокую эффективность.

Указанное направление исследований нашло свое применение и в практике разработки транспортных средств КАМАЗ. Известно, что переднюю управляемую ось можно испытывать как в составе КТС – на дорогах полигона, так и отдельно - на стенде. В первом случае для исследований необходим грузовик в сборе, а во втором случае очень важно корректно воспроизвести все возможные случаи нагружения изделия, которые возможны в реальных дорожных условиях. Очевидно, что второй вариант существенно дешевле при наличии стенда. Однако, существующие методики испытаний не могут обеспечить воспроизведение всех нагрузочных режимов на стенде.

С целью сокращения временных и материальных затрат на разработку и проверку выполнения всех требований надежности к управляемой оси КТС колесной формулой 4x2, специалистами ПАО «КАМАЗ» совместно с специалистами фирм LMS (Бельгия) и ViA (Франция) была разработана концепция создания гибридного стенда.

Гибридный стенд (рис.1) включает в себя, кроме механических компонентов (основания, барабанов, подвижной ленты и т.д.) и актуаторов, систему управления стендом и математическую модель КТС, хранящихся в оперативной памяти RT-компьютера. Математическая модель КТС (рис.2) разработана в программном комплексе LMS



*Рис. 1. Испытания передней оси КТС на стенде*

AMESim с использованием стандартных библиотек «Динамика транспортного средства» и «Механика» и валидирована по результатам натурных испытаний транспортного средства. Рассчитанные в математической модели КТС нагрузки на переднюю ось посредством соответствующих устройств и системы управления стендом преобразуются во входные нагрузки этой оси на стенде.

Для валидации математической модели КТС использовались величины сил и моментов, действующие на колеса оси со стороны дорожного полотна в различных условиях движения. Общий пробег КТС по дорогам общего пользования и специальным дорогам полигона составил более трех тысяч километров. Указанные параметры регистрировались с помощью динамометрических колес фирмы KISTLER (Германия).

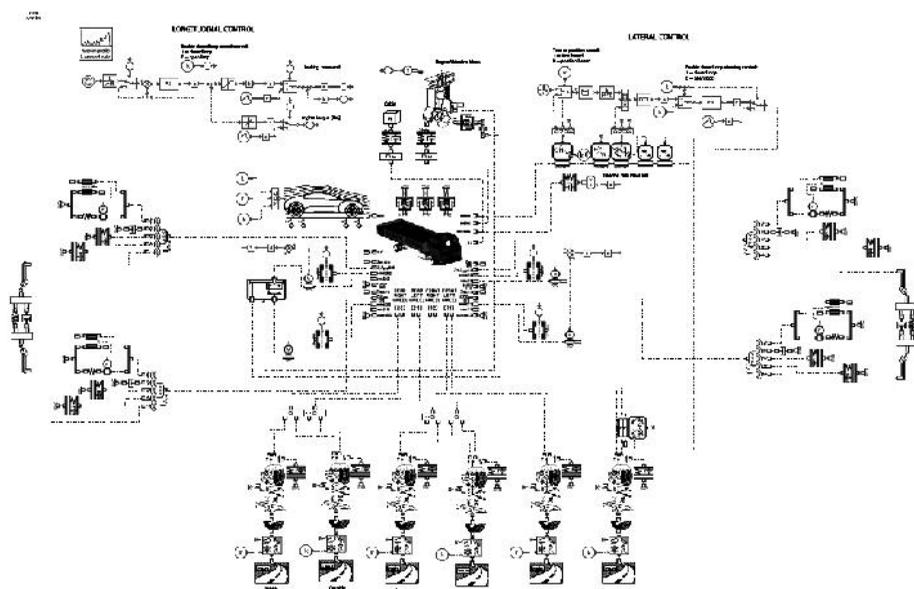


Рис.2. Математическая модель автомобиля в программном комплексе LMS AMESim

На этапе разработки концепции стенда дополнительно были разработаны математические модели системы управления и стенда. После этого выполнены процессы валидации тестирования, валидация самого стенда с системой управления и валидация процесса тестирования на стенде.

Результаты испытаний по определению вертикальной, продольной и поперечной сил, действующих на колеса передней оси, полученные в дорожных условиях на натурном транспортном средстве с помощью динамометрических колес, сравнивались с результатами испытаний этих параметров, полученных с помощью те же динамометрических колес на стенде. На рис.3 в качестве примера представлены величины вертикальной

нагрузки на правом колесе (Н) в указанном временном интервале. Темная кривая – данные дорожных испытаний, светлая кривая – данные испытаний на гибридном стенде. Для измерения и регистрации экспериментальных данных в обоих случаях применялись одни и те же динамометрические колеса и оборудование.

Сравнение представленных кривых свидетельствует о приемлемой погрешности математических моделей автомобиля и системы управления стендом и об адекватном воспроизведении дорожных условий на стенде. Для других параметров нагружения как левого, так и правого колес результаты испытаний отличаются в незначительных пределах – в среднем до 10...15 %, что вполне приемлемо для решения инженерных задач по обеспечению показателей надежности.

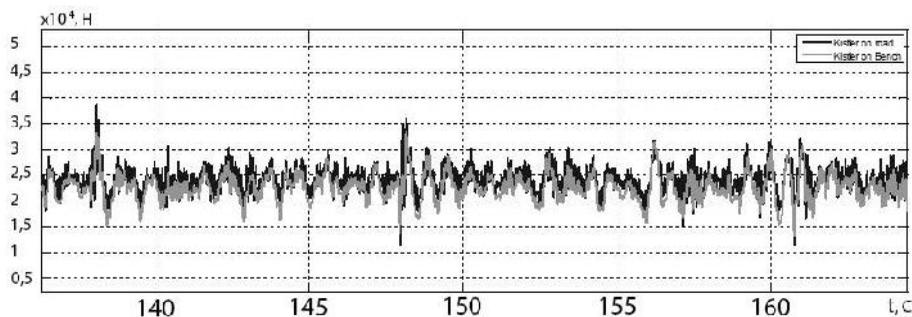


Рис. 3. Сравнение результатов дорожных и стендовых испытаний

В ходе дальнейшей эксплуатации стенда будет выполнена оценка надежности передней оси в сборе, которая позволит выявить соответствие изделия всем предъявляемым требованиям качества. При этом будут уточнены и целевые показатели по сокращению трудоемкости и стоимости выполнения работ. На начальном этапе - без учета первоначальных инвестиций в разработку и создание гибридного стенда.

### Список литературы

1. Голубев, Ю.Ф. Гибридное моделирование причаливания космических аппаратов. / Ю.Ф. Голубев, А.В. Яскевич // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2020. – № 4. – С. 136–150.
2. Дыгало, В.Г. Методология виртуально-физических испытаний автоматизированных тормозных систем колесных машин: автореф. дис. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / В. Г. Дыгало. – Волгоград, 2015. – 36 с.

Материал поступил в редколлегию 14.10.20.

И.Е. Колошкина

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО САПР  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ  
В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**TRAINING OF CAD SPECIALISTS IN THE TECHNOLOGICAL PROFILE USED  
IN MODERN INDUSTRY**

*Приведены методические рекомендации по подготовке специалистов технологического профиля по САПР в учебных заведениях высшего профессионального образования, рассмотрены приемы синхронизации изучения материалов на основе меж предметной интеграции, даны описания линейки разработанных автором учебных пособий по САПР.*

*Methodological recommendations for training CAD specialists in higher professional education institutions are given, methods for synchronizing the study of materials based on inter-subject integration are considered, descriptions of the line of CAD textbooks developed by the author are given.*

*Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, высшее профессиональное образование, учебные пособия по САПР, технологические процессы, методика проведения учебных занятий.*

*Keywords: computer-aided design systems, higher professional education, CAD manuals, technological processes, methods of conducting training sessions.*

**Состояние вопроса.** Широкое использование САПР технологического профиля обеспечивает автоматизированную подготовку конструкторской и технологической документации, управляющих программ для станков с программным управлением, что существенным образом сокращает время запуска новых изделий [3]. Существующая система подготовки кадров в учебных заведениях высшего профессионального образования по таким компетенциям не всегда отвечает запросам производства. Сказывается недостаточный объем получаемых практических знаний и умений из-за ограниченного времени, выделяемого в учебном процессе на подготовку по этому направлению. Несогласованность содержания различных учебных дисциплин по ориентации на профессиональную подготовку по информационным технологиям, дефицит учебных пособий, позволяющих студентам в доступной форме получать не только, знания, но и умения и практические навыки для работы с автоматизированными системами.

**Формулирование целей статьи.** Освоение объемной и многофакторной компьютерной системы конструкторско-технологической подготовки производства достаточно сложная задача для инженерной педагогики в проблеме подготовки специалистов, особенно если она реализуется в рамках

только одной из учебных дисциплин. Упростить и повысить результативность её решения, предлагается применением всесторонней и разноплановой системы синхронизации освоения материалов на основе меж предметной интеграции. Эта методика предполагает объединение, в ходе учебного процесса, различных учебных дисциплин, направленных на овладение определенными профессиональными знаниями, при изучении одного объекта, в нашем случае САПР технологического профиля.

**Материалы и методы.** Система подготовки специалистов этого профиля представляет собой следующие этапы формирования необходимых профессиональных компетенций в областях - компьютерной графики, инженерной графики, разработке технологической документации и нормированию, программированию для станков с ЧПУ [2]. Рассмотрим решение этой задачи на примере освоения отечественной разработки - интегрированной конструкторско-технологической системы ADEM CAD/CAM/CAPP.

На первом этапе формируются компетенции в области компьютерной графики, обучаемые знакомятся со структурой и интерфейсом системы, осваивают основные приемы работы в программе, работу с файлами. Выполняют несложные графические построения, осваивают объемное моделирование, в виде технического рисунка разрабатывают изображения изделий технического назначения. Эти вопросы рассматриваются на занятиях по предметам естественнонаучного (Информатика) и общепрофессионального (Компьютерная графика) циклов. Для организации занятий по этому принципу автор разработал учебное пособие<sup>1</sup>.

На втором этапе обучаемые осваивают инженерную компьютерную графику, знакомятся с порядком разработки конструкторской документации в модуле CAD, осваивают выполнение графических построений методом компьютерного инжиниринга. Эти вопросы рассматриваются на занятиях по предметам общепрофессионального цикла (Инженерная графика, Материаловедение - изучается база данных материалов и заготовок). Для организации занятий по этому принципу автор разработал учебное пособие<sup>2</sup>. Проведение практических занятий по этим материалам может проводиться в дуальной форме с привлечением преподавателей специального цикла. Основная особенность предложенной методики в том, что на всех этапах подготовки используется компьютерная программа, которую студент будет применять при решении технологических задач в профессиональном цикле.

На третьем этапе, на основании знаний, полученных ранее, обучаемые осваивают приемы технологического проектирования в модуле CAPP,

---

<sup>1</sup> Колошкина, И. Е. Компьютерная графика: учебник и практикум для вузов /И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев, С. А. Дмитроченко/ Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 233 с.

<sup>2</sup> Колошкина, И. Е. Инженерная графика.CAD: учебник и практикум для академического бакалавриата /И. Е. Колошкина, В. А. Селезнев/ — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 220 с.

выполняется разработка комплектов технологической документации [1]. Предварительная подготовка для решения таких задач проводится на занятиях по предметам профессионального цикла (Процессы формообразования и инструменты – база данных и выбор инструментов, Технологическая оснастка – база данных и выбор оснастки, Технологическое оборудование – база данных и выбор оборудования). Для организации занятий по этому этапу автор разработал и применяет учебное пособие<sup>3</sup>.

На четвертом этапе происходит освоение приемов программирования для станков с ЧПУ. Разработка управляющих программ выполняется в модуле САМ по подробным инструкциям, изложенным в учебном пособии, указанном в предыдущем абзаце. Освоение практического программирования на станке выполняется на программной станции с виртуальной клавиатурой (обучение на ПК). Порядок подготовки по этой части этапа разделу подробно разбирается в учебном пособии, разработанном с участием автора<sup>4</sup>.

При организации практических занятий по закреплению знаний и умений по изучаемому материалу реализуется дидактический принцип систематичности и последовательности. Задания разрабатываются и выполняются с нарастающей степенью сложности:

— начальный уровень — разработка технологий и программ для 2-ух координатной и 2.5 координатной обработки заготовок на станках с ЧПУ (число конструктивных элементов — 4—6) по 8—11 квалитетам точности;

— базовый уровень — разработка технологий и программ для 3 - 5 координатной обработки заготовок на станках с ЧПУ (число конструктивных элементов — 8—10) по 7—10 квалитетам точности;

— углубленный уровень — разработка технологий и программ для многокоординатной обработки заготовок на станках с ЧПУ (число конструктивных элементов — 12 и более) по 6—7 квалитетам точности.

Предложенная градация соответствует 5-, 6- и 7-му уровню квалификации по профессиональному стандарту для специалиста по автоматизированной разработке технологий и программ для станков с ЧПУ.

Результативность применения изложенной методики проверялась выполнением тест-заданий по уровням и показана на рис. 1 и 2.

---

<sup>3</sup> Колошкіна, И. Е. Автоматизация проектирования технологической документации: учебник и практикум для вузов /И. Е. Колошкіна. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 371 с.

<sup>4</sup> Колошкіна, И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ: учебное пособие для академического бакалавриата /И. Е. Колошкіна, В. А. Селезнев. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 260 с

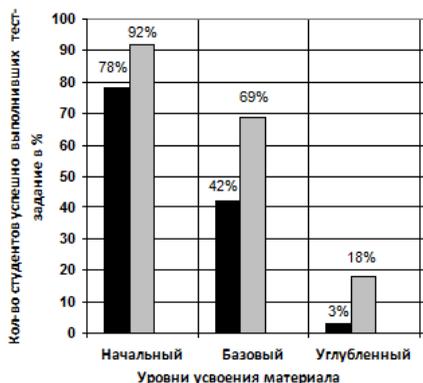


Рис. 1. Результаты зависимости уровня усвоения материала от методики организации учебного процесса

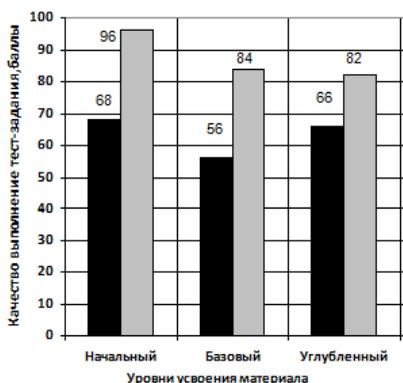


Рис. 2. Результаты зависимости качества усвоения материала от методики организации учебного процесса

■ - освоение САПР в рамках одной специальной дисциплины; ■ - освоение САПР при синхронизации учебного процесса на основе межпредметной интеграции учебных дисциплин общетехнического и специального циклов

**Выводы.** Применение методики синхронизации учебного процесса на основе меж предметной интеграции учебных дисциплин общетехнического и специального циклов при освоении САПР технологического профиля увеличивает время практической работы студента с программой при выполнении различных инженерных задач. Как результат - увеличение объемов и глубины освоенного материала, что обеспечивает в специальном цикле выполнение студентом технологических задач более высокого уровня, повышается и качество технологических решений. Разработанные автором учебные пособия способствуют освоению учебного материала, обеспечивают самостоятельную работу студента, что особенно актуально в современных условиях при дистанционном обучении.

#### Список литературы

1. Колошкина, И.Е. Автоматизация разработки технологической документации/ И.Е. Колошкина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2019. – №1 (173). – С. 56-62. – ISSN 2073-2597.
2. Аверченков, А.В. Формирование компетенций специалистов в наукоемких технологиях подготовки производства/ А.В. Аверченков, И.Е. Колошкина, С.А. Шептунов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2019. №6 (96). – С. 22-29. – ISSN 2223-4608.
3. Колошкина, И.Е. САПР и эффективность конструкторско-технологической подготовки производства / И.Е. Колошкина // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. научно-практ. конф., 24-25 октября 2019 г. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С. 33-36.

Материал поступил в редколлегию 19.10.20.

А.А. Константинова, И.В. Цивильский  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ УЛЬТРАЗВУКА ЧЕРЕЗ ЖИДКУЮ СРЕДУ В ЗОНУ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

### **SIMULATION OF ULTRASOUND TRANSMISSION THROUGH A LIQUID MEDIUM INTO A LASER RADIATION ZONE**

*Рассматривается локализованный способ подвода ультразвука в зону лазерного воздействия. С помощью модели, созданной в программе Ansys Fluent, была изучена эффективность передачи ультразвуковых колебаний через жидкую прослойку в зону лазерного воздействия.*

*This article discusses a localized method of ultrasound transmission to the laser radiation zone. The efficiency of the transmission of ultrasonic vibrations through a liquid medium to the zone of laser action was studied using a model created in the Ansys Fluent program.*

*Ключевые слова: моделирование, ультразвук, ультразвуковые колебания, соноотрод, лазерное воздействие.*

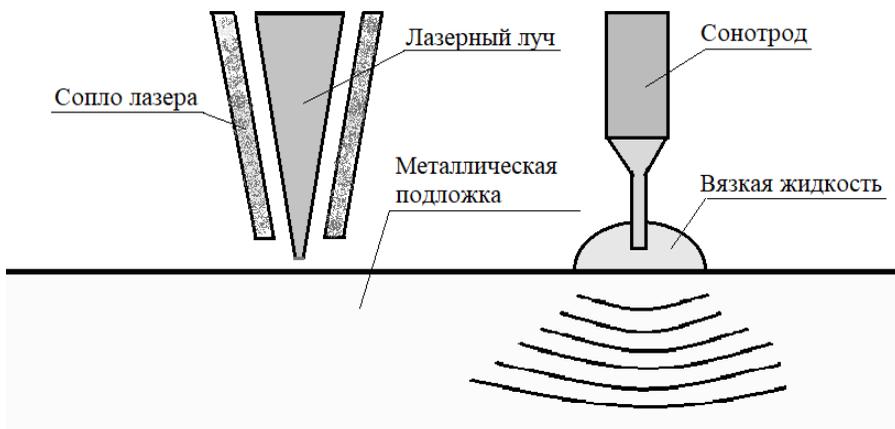
*Keywords: modeling, ultrasound, ultrasonic vibrations, sonotrode, laser radiation.*

В настоящее время ультразвуковые колебания активно используются в научных исследованиях, технике и промышленности благодаря их особенностям. Например, ультразвук можно использовать при лазерной наплавке, резке, сварке и других технологических процессах. При проведении данных работ подводят генератор ультразвука для получения более качественной продукции без дополнительных обработок. При этом наблюдается положительное влияние акустического высокочастотного воздействия на однородность и прочность сварного шва: акустические волны воздействуют на зону расплава и тем самым, снижается вязкость расплава, повышается его однородность, обеспечивается лучшее перемешивание при застывании, а также улучшаются прочностные характеристики [1].

При воздействии ультразвука на зону плавления металла при лазерной сварке большая часть газа в сварочном шве удаляется, что приводит к снижению или даже исключению дефектов шва. За счёт акустического воздействия и эффекта кавитации сварочное остаточное напряжение эффективно уменьшается или устраняется, а прочность и коррозионная стойкость соединения повышаются [2].

При выполнении лазерной сварки или наплавки можно по-разному подводить ультразвук. В данной работе ультразвук подводили локализовано, то есть когда соноотрод находится у подложки вблизи проведения лазерной

сварки. Во время технологического процесса генератор ультразвука перемещают в соответствии с движением лазера, при этом сонодод движется параллельно с соплом на некотором малом расстоянии. В данной технологии для эффективного воздействия ультразвука на лазерную сварку в качестве "передаточного" звена между металлической пластиной и наконечником сонодод используется вязкая плотная жидкость. Это может быть машинное масло, гель, глицерин и прочее [3]. Описанный способ схематически изображен на рис. 1.



*Рис. 1. Локальное действие ультразвука на технологический процесс*

Преимуществом такого способа является то, что ультразвук интенсивно воздействует на технологический процесс, а высокочастотные ультразвуковые колебания быстро достигают места проведения лазерной сварки, тем самым положительно влияют на качество шва.

Главным фактором в данном процессе является контроль расстояния от сонодод до поверхности металла, так как природа свариваемого материала и его толщина определяет затухание распространяющихся в нем ультразвуковых колебаний. Еще одним важным параметром является частота ультразвука, потому что избыточная интенсивность ультразвуковых колебаний приводит к дефектам сварного соединения и избыточного проплавления.

Для проверки эффективности передачи ультразвука в зону лазерного воздействия, необходимо исследовать распространение ультразвуковых колебаний вдоль подложки и вглубь от сонодод.

Проведена серия вычислительных экспериментов по определению эффективности передачи ультразвука к месту проведения лазерной сварки. Оценка воздействия ультразвука на обрабатываемую поверхность, распределение давления вблизи сонодод и вдоль подложки проводилась при помощи плоского наконечника сонодод. Для этого были созданы 4 расчёта,

в которых задается разное расстояние от поверхности сонотрода до подложки,  $d$ . Таким образом, установим оптимальное расстояние от сонотрода до металлической подложки при выполнении лазерной сварки.

Для моделирования ультразвуковых волн, созданных переменных акустическим давлением, на конце сонотрода задается уравнение синусоидальной волны (1) [4]:

$$P = P_A \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (1)$$

Данное уравнение (1) отражает периодические колебания переменного давления  $P$ . В уравнении (1) переменная  $P_A$  - это амплитудное значение акустического давления;  $\omega$  - циклическая частота колебаний;  $t$  - заданное время.

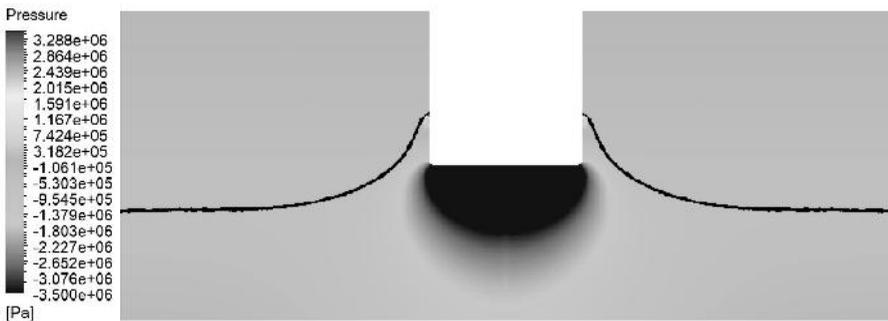
Входные параметры разработанной модели для плоского наконечника сонотрода указаны в табл. 1.

*Таблица 1. Входные параметры модели*

Номер расчёта	$P_A$ , Па	$\omega$ , рад/с	$d$ , м
1	$7 \cdot 10^6$	$94 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
2	$7 \cdot 10^6$	$94 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-3}$
3	$7 \cdot 10^6$	$94 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$
4	$7 \cdot 10^6$	$94 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^{-3}$

Форма сонотрода – цилиндр. Диаметр сонотрода -  $5 \cdot 10^{-3}$  м.

Фрагмент результата моделирования распределения давления для плоского сонотрода с расстоянием  $d=0,0015$  м в момент времени 0,5 с показан на рис. 2.



*Рис. 2. Смоделированный процесс распространения переменного акустического давления в металлической подложке при  $A=7$  Мпа (Расчёт 1)*

Полученные кривые распределения давления вглубь от сонотрода, для расчётов 1-4 представлены на рис. 3.

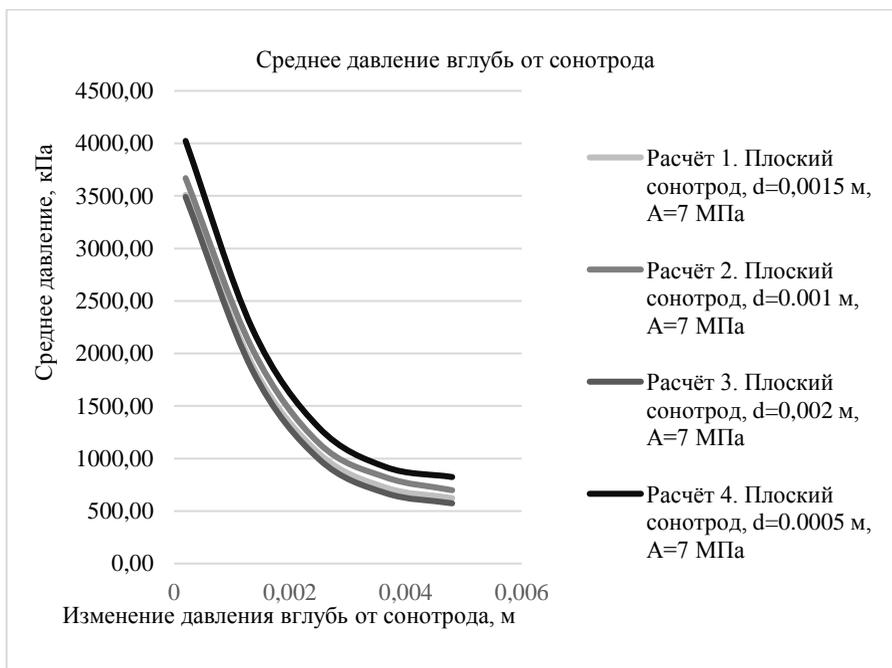
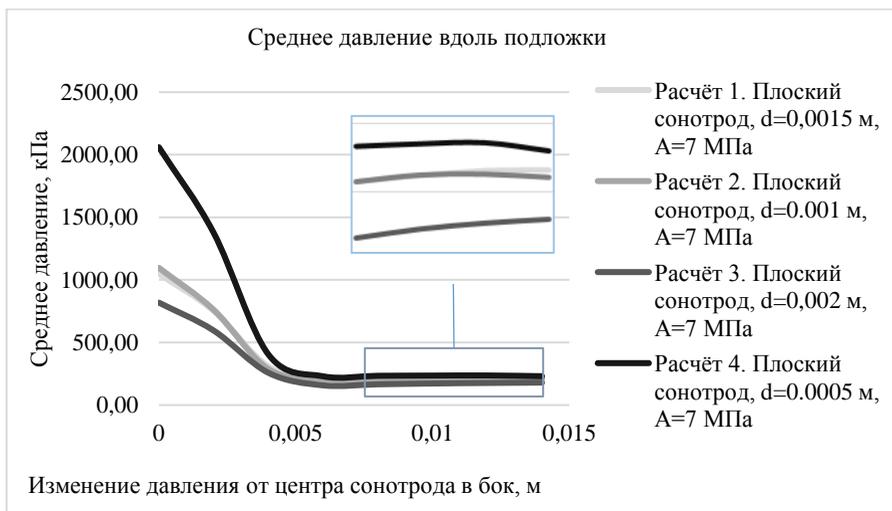


Рис. 3. Влияние расстояния от плоского наконечника до обрабатываемой поверхности на распределение давления под сонотродом

Как видно на рис. 3 максимальное давление достигается при плоском сонотроде, находящемся от подложки на расстоянии  $d=0,0005$  м. При увеличении расстояния от сонотрода до подложки среднее амплитудное значение переменного давления уменьшается, а значит уменьшается и эффективность передачи ультразвука в зону лазерного воздействия.

Полученные кривые распределения давления вдоль подложки, для расчётов 1-4 представлены на рис. 4.



*Рис. 4. Влияние расстояния от плоского наконечника до обрабатываемой поверхности на распределение давления вдоль подложки*

Сравнив расчеты 1-4, также получили, что при приближении соноотрода к обрабатываемой поверхности давление вдоль подложки увеличивается, а значит эффективность передачи ультразвука к месту проведения лазерной сварки или наплавки повышается.

Построенная модель распространения ультразвука в зоне контакта металла и соноотрода позволяет оценить акустическое давление, поступающее к месту воздействия лазерного луча и потенциально влияющее на перемешивание металла при застывании.

#### Список литературы

1. Павлова, А.А. Расчет массопереноса в результате кавитации, вызванной переменным акустическим давлением/ А.А. Павлова // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Междунар. молодёжная науч. конф., 7–8 ноября 2019 г.: матер. конф.. Сб. докладов. – Казань, 2019. – Т 6. –С. 614-618.
2. Патент № 2704874, Российская Федерация, 2018. Способ гибридной лазерной сварки с ультразвуковым воздействием и устройство для его осуществления/ Калашников К.Н., Бахшаев В.А., Иванов А.Н., Рубцов В.Е., Воронцов А.В., Дмитриев А.В.
3. Павлова, А.А. Моделирование акустических волн в зоне контакта металла и соноотрода для лазерной сварки / Павлова А.А., Цивильский И.В. // I Всероссийская науч.-практ. конф. молодых авиаторов России, 29-30 ноября 2019 г.: материалы конференции. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2019. – С. 234-237.
4. Хамидуллин, Б.А. Математическое моделирование акустических течений вблизи ультразвукового соноотрода / Хамидуллин Б.А., Цивильский И.В., Гильмутдинов А.Х. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева (2019). – Т 75. – № 2. – С. 22 – 27.

*Материал поступил в редколлегию 09.10.20.*

В.А. Лебедев

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ КУЗОВА ДВУХЭТАЖНОГО  
ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА**

ANALYSIS OF THE FEM RESULTS OF SIMULATION OF VIBRATION TESTS  
OF THE BODY OF A DOUBLE-STOREY PASSENGER CAR

*Выполнен сравнительный анализ результатов вибрационных испытаний подробной и упрощенной расчетных схем кузова двухэтажного пассажирского вагона.*

*A comparative analysis of the results of vibration tests of detailed and simplified design schemes for the body of a double-deck passenger car is carried out.*

*Ключевые слова: метод конечных элементов, двухэтажный вагон, кузов, собственная частота, расчетная схема, модель.*

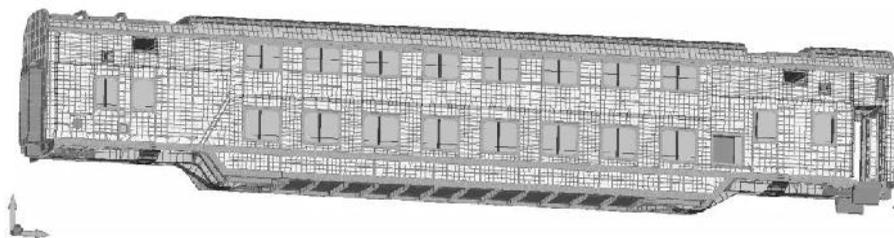
*Keywords: finite element method, double-deck car, body, natural frequency, design scheme, model.*

Методом конечных элементов выполнялось компьютерное моделирование вибрационных испытаний кузова двухэтажного пассажирского вагона модели 61-4465 [1]. Определялась собственная частота первого тонового изгибного колебания кузова в вертикальной плоскости. В соответствии с требованиями ГОСТ 34093-2017 [2], предъявляемыми к пассажирским вагонам, величина этой частоты должна быть ограничена наименьшим значением:

- для стендовых испытаний оборудованного кузова – 8 Гц;
- для предварительных расчётов (по соответствующей формуле) – 10 Гц;
- для уточненных расчетов с применением расчетных схем (в том числе МКЭ) – 9 Гц.

Уточненный расчет выполнялся на основе подробной конечно-элементной, пластинчатой модели металлоконструкции кузова (рис. 1), по жесткостным и инерционным параметрам, приближенной к реальному кузову [3]. Она состоит из более 72 тыс. элементов, связанных 65 тыс. узлами. В расчетной схеме учтено распределение массы брутто кузова по несущей конструкции. Также учитывалось влияние перегородок купейных и служебных помещений на изгибающую жесткость кузова.

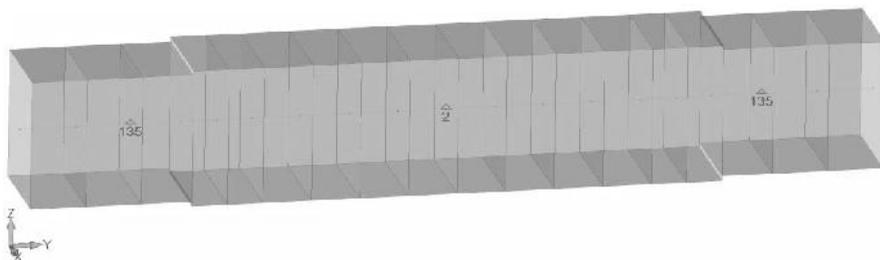
КЭ расчет модели показал искомое значение частоты в 10,3 Гц, что соответствует требованиям ГОСТ 34093-2017 и всего на 8,8% меньше результата натурных стендовых испытаний (11,3 Гц).



*Рис. 1. Подробная КЭ модель кузова двухэтажного вагона*

Для сравнения была создана упрощенная модель кузова (рис. 2), состоящая из 18 элементов и 19 узлов. Она представляющая собой КЭ расчетную схему в виде пространственной балки с кусочно-постоянными по длине геометрическими и массовыми характеристиками.

Поскольку кузов двухэтажного вагона имеет разную высоту сечения в средней (4,8 м) и концевых частях (4,2 м), то это было учтено в модели. Момент инерции сечения средней части кузова составил  $J_{Xcp} = 0,11 \text{ м}^4$ , для концевых частей (средний) –  $J_{Xcp} = 0,10 \text{ м}^4$ . Масса кузова брутто (59,1 т) учитывалась путем изменения плотности материала конечных элементов, который по жесткостным характеристикам соответствует стали.



*Рис. 2. Упрощенная КЭ модель кузова двухэтажного вагона*

Наложение связей выполнялось аналогично подробной КЭ модели.

В результате расчёта балочной схемы собственная частота первого тонового изгибного колебания составила 11,6 Гц, что также соответствует требованиями ГОСТ 34093-2017 и является близкой к показателю стендовых испытаний (на 2,7% больше).

Проведя анализ результатов расчетов обоих схем можно сделать вывод. На начальном этапе проектирования пассажирских вагонов для общей оценки изгибной жесткости несущей конструкции кузова можно использовать упрощенные расчётные схемы. Но и при использовании более подробных моделей для оценки как общей, так и локальной картины напряженно-деформированного состояния частей кузова необходимо выполнять данный проверочный расчет.

Меньшее значение частоты колебаний для подробной схемы, в сравнении с упрощенной, может быть обусловлено податливостью материала в наиболее нагруженных зонах, в том числе и зоне опирания кузова.

### Список литературы

1. ОАО «Тверской вагоностроительный завод». – Режим доступа: <http://www.tvz.ru/> (дата обращения: 07.10.20).

2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34093-2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 41 с. – Электрон. копия доступна на сайте Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200145835> (дата обращения: 07.10.20).

3. Лебедев, В.А. Обоснование динамической модели упругого кузова двухэтажного пассажирского вагона / В.А. Лебедев, В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, С.Д. Коршунов // Вестник БГТУ, 2015. – №4. – с. 50-53.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

DOI: 10.51932/9785907271739\_39

УДК 629.014.7

В.А. Лебедев, А.И. Глазов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

### **ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОЛУВАГОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

ESTIMATION OF THE STRESS STATE OF THE BEARING STRUCTURE  
OF THE UNIVERSAL GONDOLA CAR BY THE FINE ELEMENT METHOD

*Методом конечных элементов выполнена оценка напряженного состояния кузова полувагона с луками в полу от действия эксплуатационных нагрузок.*

*The finite element method was used to assess the stress state of a gondola car body with bows in the floor from the action of operational loads.*

*Ключевые слова: метод конечных элементов, полувагон, кузов, расчет, модель, нагрузка.*

*Keywords: finite element method, gondola car, body, calculation, model, load.*

Среди всех типов грузовых вагонов, эксплуатирующийся в России, большую часть занимают полувагоны с разгрузочными люками (до 400 тысяч вагонов на 2019 год). Они предназначены для перевозки соответствующих насыпных и штучных грузов открытым способом.

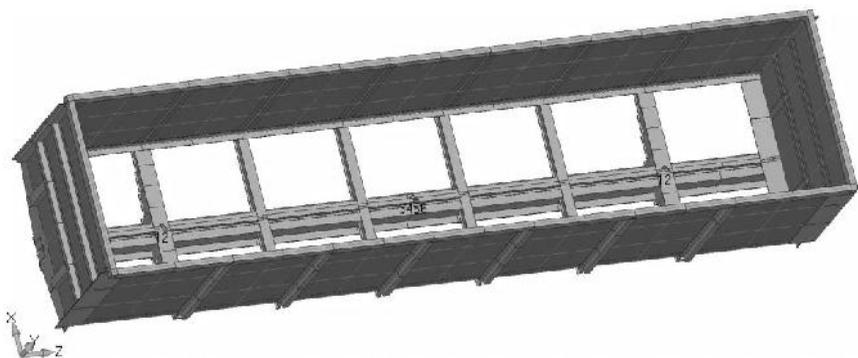
Каждый год из эксплуатации выводятся тысячи вагонов этого типа по причине большого физического износа несущих элементов. Им на замену промышленность выпускает полувагоны, как уже «проверенных временем», так и новых моделей, обладающих повышенными эксплуатационными параметрами.

На этапе проектирования вагона применяют методы компьютерного, математического моделирования, позволяющие оценить прочность и надежность элементов его несущей конструкции.

В работе выполнена оценка напряженного состояния металлоконструкции кузова четырехосного универсального полувагона при действии эксплуатационных нагрузок с применением метода конечных элементов.

Объектом исследования был принят четырехосный полувагон с разгрузочными люками в полу модели 12-783М [1]. Он предназначен для эксплуатации по сетям железных дорог колеи 1520 мм. Имеет габарит 1-ВМ, грузоподъемность 70 т и максимальную тару 24 т.

Для исследования была выполнена упрощенная компьютерная конечно-элементная (КЭ) модель, состоящая из 178 стержневых и 108 пластинчатых элементов, объединенных 165 узлами (рис. 1). Пластину моделировалась обшива кузова. При этом, так как модель выполнена в упрощенном виде, влияние гофров не учитывалось. Элементы каркаса представлены стержнями, геометрическими параметрами, приближенными к реальным.



*Рис. 1. Упрощенная МКЭ модель кузова универсального полувагона*

Все элементы модели обладают свойством изотропного материала приближенного к физико-механическим свойствам стали ( $E = 2,1 \times 10^5$  МН/м<sup>2</sup>;  $G = 0,808 \times 10^5$  МН/м<sup>2</sup>;  $\mu = 0,3$ ).

Для моделирования стендовых испытаний на модель были наложены ограничения в соответствующих зонах кузова. В зонах расположения пятников – вертикальные и горизонтальные поперечные связи типа шарнирная опора. В средней части кузова на хребтовой балке – горизонтальная продольная связь (шарнирная неподвижная опора) и закрепления от поворота вокруг всех трех осей (скользящие заделки).

В соответствии с требованиями ГОСТ 33211-2014 [2], предъявляемыми к грузовым вагонам при испытании на прочность, модель нагружалась по I и III расчетным режимам (табл. 1).

Таблица 1. Силы, действующие на модель кузова полувагона

Расчетные режимы нагружения	
I режим	III режим
Продольная сила	
Растяжение – 2,5 МН	Растяжение – 1 МН
Сжатие – 3,5 МН	Сжатие – 1 МН
Вертикальная сила	
Вес брутто кузова вагона – 922 кН	Вес брутто кузова с учетом коэффициента вертикальной динамики вагона – 1291 кН

Вертикальная нагрузка прикладывалась распределенной силой по раме в следующем соотношении: 5/8 от общей силы по хребтовой балке, 3/16 – по нижней обвязке.

Продольная нагрузка растяжения и сжатия прикладывалась в местах расположения задних и передних упоров автосцепки с обоих концов вагона. Совместно с продольной нагрузкой, к каждому концу хребтовой балки, прикладывался момент для нивелирования момента, возникающего от эксцентрично приложенной продольной силы (отдельно при сжатии и растяжении).

При выполнении расчетов совместно с продольными силами учитывалось влияние вертикальной нагрузки. Результаты расчетов показали, что наибольшие напряжений возникают в местах приложения нагрузки – 261 МПа (концевая балка, сжатие 3,5 МН) или зонах возникновения реакций – 227,6 МПа (хребтовая балка, пятниковая зона, растяжение 2,5МН). В сечении кузова наибольшие напряжения распределились следующим образом: в хребтовой балке – -166,1 МПа (сжатие 3,5 МН); в нижней обвязке – 70,7 МПа (растяжение 1 МН); в верхней обвязке – -25,7 МПа (растяжение 1 МН). Среди поперечных промежуточных балок наиболее нагруженными были балки средней части кузова – 152,8 МПа (сжатие 1 МН).

Учитывая, что величина допускаемых напряжений для материала металлоконструкции кузова составляет 297 МПа, то можно сделать вывод, что при действии эксплуатационных нагрузок прочность конструкции кузова универсального полувагона обеспечена.

### Список литературы

1. ПАО «Крюковский вагоностроительный завод». – Режим доступа: <http://www.kvsz.com/index.php/ru/> (дата обращения: 06.10.20).
2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 53 с. – Электронная копия доступна на сайте Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200121493> (дата обращения: 06.10.20).

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

С.И. Мамедова, Н.Ф. Гилемханова, З.Х. Захарова  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА НАЛОГОПЛАТЕЛЬЩИКОВ В ОРГАНЫ ФЕДЕРАЛЬНОЙ НАЛОГОВОЙ СЛУЖБЫ В СИСТЕМЕ ANYLOGIC**

**SIMULATION OF THE FLOW OF TAXPAYERS TO THE FEDERAL TAX SERVICE  
IN ANYLOGIC SYSTEM**

*Приводится описание имитационной модели обслуживания клиентов в налоговой инспекции, разработана имитационная модель обслуживания потока налогоплательщиков к терминалу на входе налоговой инспекции и к работнику налоговой инспекции в системе AnyLogic, получена статистика обслуживания налогоплательщиков.*

*A description of a simulation model of customer service in the tax inspectorate is given, a simulation model of servicing the flow of taxpayers to the terminal at the entrance of the tax inspectorate and to the employee of the tax inspectorate in the AnyLogic system is developed, statistics of taxpayer services are obtained.*

*Ключевые слова: налоговая инспекция, имитационное моделирование, моделирование процесса обслуживания клиентов, время ожидания, статистика обслуживания.*

*Keywords: tax office, simulation modeling, customer service process modeling, waiting time, service statistics.*

Федеральная налоговая служба (ФНС России) является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по контролю и надзору за соблюдением законодательства о налогах и сборах, за правильностью исчисления, полнотой и своевременностью внесения в соответствующий бюджет налогов, сборов и страховых взносов, в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации [1-2].

Имитационное моделирование – это замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели [3]. Таким образом, моделирование может быть определено как представление объекта моделью для получения информации об этом объекте путем проведения экспериментов с его моделью.

Создадим простую модель, в которой будет имитирована работа налоговой инспекции с налогоплательщиками, а также сбор статистики по работе некоторых блоков диаграммы процесса. В налоговой службе налогоплательщик сначала проводит операции с терминалом, далее идет к работникам (назначено 9 работников) налогового органа для получения информации или внесения необходимых данных в автоматизированную

информационную систему Федеральной налоговой службы (АИС «Налог-3»).

Создаем новую модель. Называем ее Nalog. В ней уже имеется один тип агента Main и эксперимент Simulation. Агенты - это главные строительные блоки модели AnyLogic [4]. В нашем случае агент Main послужит местом, где мы зададим всю логику модели: здесь мы расположим чертеж первого этажа холла налоговой инспекции и зададим диаграмму процесса потока налогоплательщиков.

Зададим динамику процесса, создав диаграмму из блоков «Библиотеки моделирования процессов». Каждый блок задает определенную операцию, которая будет производиться над проходящими по диаграмме процесса агентами.

Усложним нашу модель, добавив в нее служащих – работников налоговых органов. Диаграмма моделирования процесса движения представлена на рис.1.

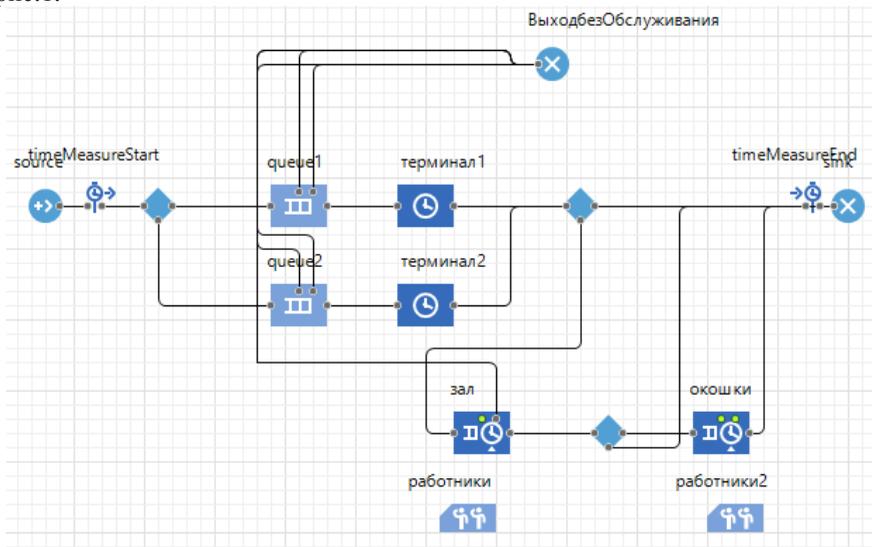


Рис.1. Моделирование процесса движения

Нарисуем места ожидания клиентов, нахождения работников, нахождения клиентов при обслуживании. Поставим два терминала обслуживания, пост КПП. Разметим территорию холла стенами согласно схеме здания. Расставим блоки освещения.

Для разметки пространства использовался элемент Прямоугольный узел. С помощью этого элемента мы разметили зал ожидания, зал обслуживания 1 и 2, места работников 1 и 2. С помощью элемента Путь мы разметили движения налогоплательщиков до терминала 1 и 2. Данный элемент привязан к блокам Queue 1 и 2. Поставим два Точечных узла, это будут наши терминалы. Свяжем

их с блоками Delay (терминал 1 и 2). Точечный узел будет менять цвет в 2D анимации, когда терминал свободен цвет зеленый, когда занят красный.

Можем запустить модель и изучить, как клиенты проводят операции с терминалом, далее идут к работнику налогового органа.

Визуализация работы блоков представлена на рис.2.

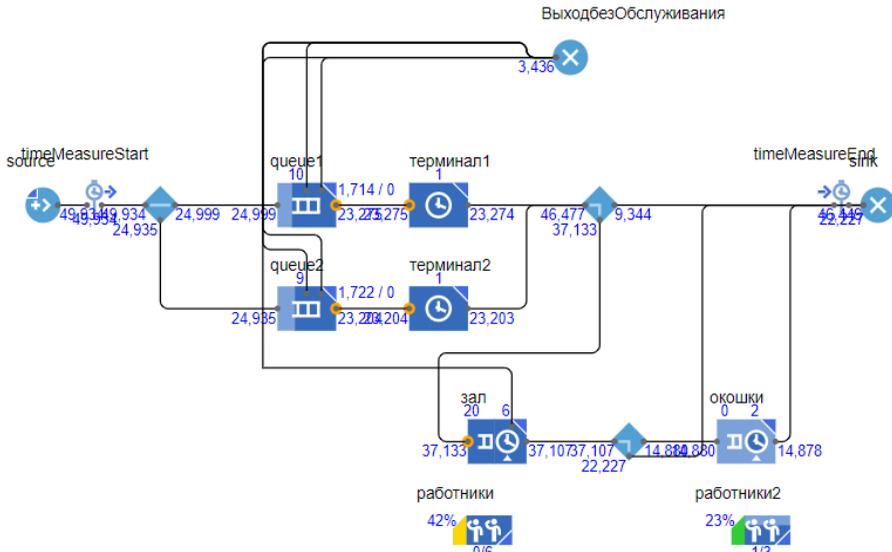


Рис.2. Работа блоков

2D и 3D визуализация объектов представлена на рис.3.

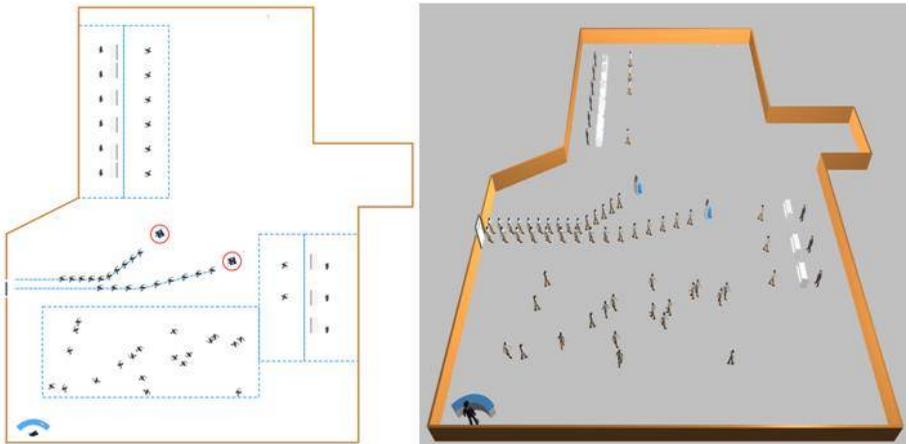


Рис.3. 2D и 3D визуализация объектов

Добавим диаграмму для отображения статистики работы системы. Запустим модель. Включим режим виртуального времени и посмотрим статистику работы терминалов, очереди к терминалам, среднего времени нахождения клиента в инспекции и обслуженных клиентов.

Статистика работы всей системы представлена на рис.4.

Терминал 1 занятость - 0.34, терминал 2 занятость - 0.33. Очередь к терминалу 1 -1.72, к терминалу 2 – 1.69. Среднее время нахождения налогоплательщика в инспекции – 38.13. Обслужено налогоплательщиков – 93%, не обслужено налогоплательщиков – 7%.

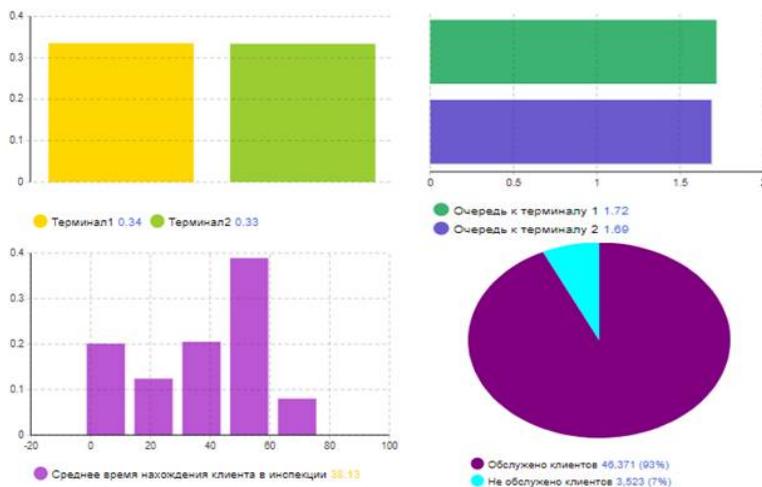


Рис.4. Статистика работы системы

Итогом проделанной работы является созданная имитационная модель посещения налогоплательщиком ИФНС. Дальнейшее совершенствование модели возможно добавлением критических ситуаций, которые часто или с большой вероятностью могут произойти в налоговой инспекции. Так же можно улучшить анимацию, чтобы привести имитацию сценариев к наиболее реалистичному виду.

#### Список литературы

1. Разработка Концепции АИС «Налог-3». Государственный контракт от 13 сентября 2010 г. – № 5-6-02/113. – п. 4.2.1.4. – 68 с.
2. ФНС России. Подготовка к переходу на АИС «Налог-3». Государственная регистрация и учет налогоплательщиков: учеб. пособие для работников налоговых органов. – Москва, 2014. – 65 с.
3. Каталевский, Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении/ Д.Ю. Каталевский. – М.: Издательство Московского университета, 2013. – 304 с.
4. Боев, В.Д. Компьютерное моделирование. Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2014. – 432 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Э.Б. Рейимова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА В СИСТЕМЕ ANSYS**

### **INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR WHEEL IN THE ANSYS SYSTEM**

*Исследуется возможность проектирования центробежного колеса компрессора энергетической установки. Проектирование производилось с использованием пакета программ КОМПАС – 3D. Прочностные расчеты центробежного колеса компрессора были выполнены с использованием пакета программ ANSYS.*

*The article examines the possibility of designing a centrifugal compressor wheel for a power plant. The design was carried out using the KOMPAS - 3D software package. The strength calculations of the centrifugal compressor wheel were carried out using the ANSYS software package.*

*Ключевые слова: центробежное колесо, ANSYS, компрессор, SOLID187.*

*Keywords: centrifugal wheel, ANSYS, compressor, SOLID187.*

В настоящее время компрессоры используются в различных областях техники, например, в авиадвигателестроении и дальнем газоснабжении. На компрессорных станциях магистральных газопроводов используются в качестве привода газоперекачивающих агрегатов.

Для проектирования и для прочностных расчетов были назначены следующие параметры:

- частота вращения - 14000 об/м;
- степень повышения давления в компрессоре – 3;
- диаметр центробежного колеса – 658,6 мм;
- радиус – 329,3 мм;
- материал центробежного колеса – ЭИ698-ВД (сплав жаропрочный на никелевой основе);
- плотность материала – 4800 кг/м<sup>3</sup>.

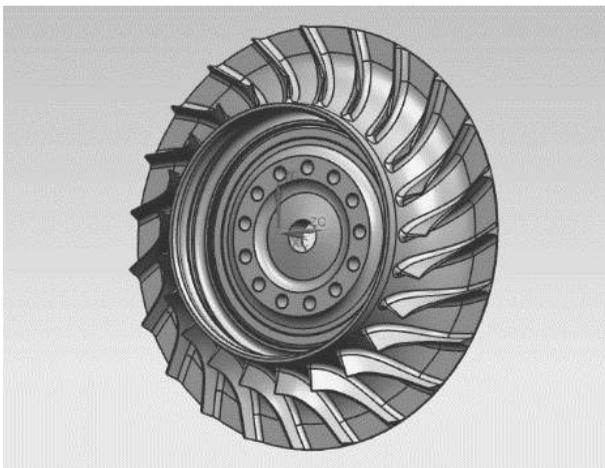


Рис. 1. 3D модель центробежного колеса

В полном соответствии с методикой, описанной в [1; 2; 3], с использованием пакета программ ANSYS были проведены прочностные расчеты.

В книге [3] указывается, что центробежные колеса компрессоров являются одними из наиболее ответственных деталей, так как при их разрушении может привести к опасным последствиям.

Напряжения в центробежных колесах возникают от сил инерции самого колеса и присоединенных к нему лопаток, от неравномерного нагрева колеса по радиусу, от натяга, создаваемого прессовой посадкой колеса на вал, если центробежное колесо соединено с валом таким способом.

Напряженность центробежного колеса определяется эквивалентным напряжением в соответствии с критерием прочности Мизеса-Губера-Генки:

$$\sigma_i = \sigma_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 \pm (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \sigma(\sum x^2 y + \sum y^2 z + \sum z^2 x)}$$

Местный коэффициент запаса прочности по напряжениям:

$$K_M = \frac{\sigma_{\text{дл}}(T, \tau)}{\sigma_{\max}}$$

где  $\sigma_{\text{дл}}(T, \tau)$  - предел длительной прочности материала центробежного колеса, зависящий от температуры T и длительности работы  $\tau$ ;

$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{экв}}$  на данном радиусе колеса. Запас  $K_M$  вычисляется для всех радиусов центробежного колеса.

В качестве запаса прочности центробежного колеса принимается

$$K_M = \min(K_{M_i}); K_M > 1,45.$$

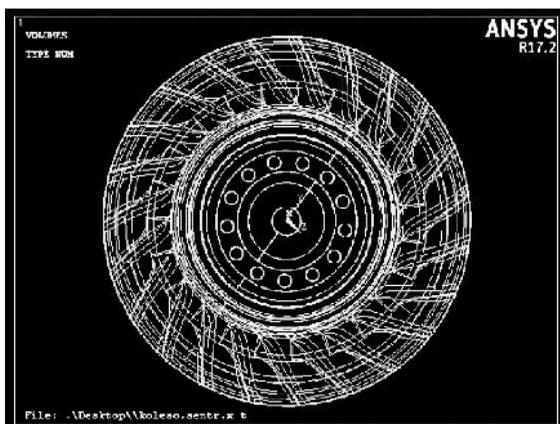


Рис. 2. 3D модель центробежного колеса

У каждого типа элементов обычно необходимо задать опции. Эти опции позволяют управлять различными параметрами элемента. Для центробежного колеса был выбран элемент SOLID187. Элемент SOLID187 (рис. 3) представляет собой трехмерный, 10-узловой конечный элемент. В каждом узле имеются три степени свободы: перемещения в направлениях осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Элемент обладает пластичностью, гиперэластичностью, ползучестью, большим прогибом и различными видами деформации. SOLID187 имеет квадратичную аппроксимацию поле перемещений и хорошо подходит для моделирования нерегулярных сеток (например, из различных систем CAD / CAM).

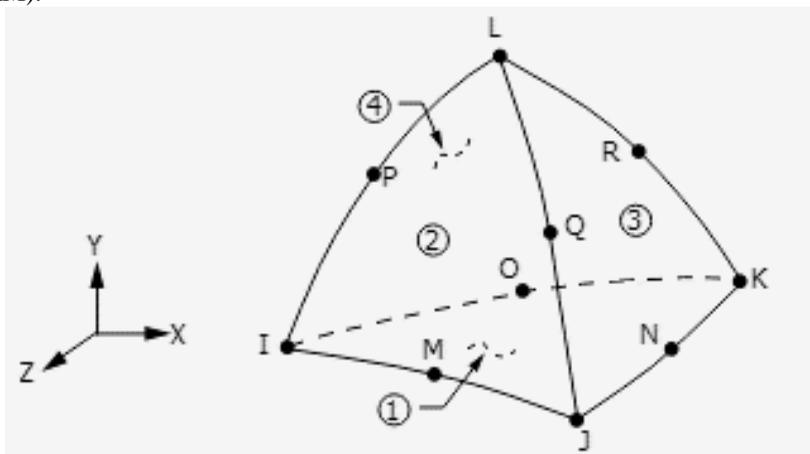


Рис. 3. Геометрия элемента SOLID187

Центробежное колесо рассчитывается в линейно-упругой подстановке, используя модель идеального упругого материала.

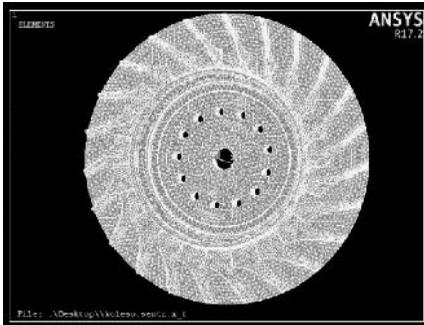


Рис. 4. Разбиение на конечные элементы SOLID187

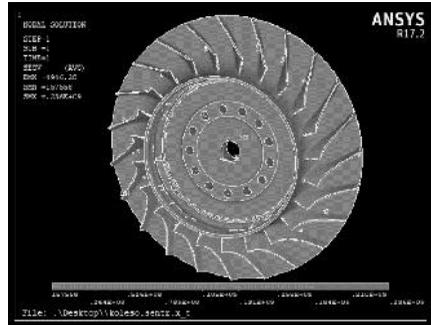


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по теории прочности Мизеса-Губера-Генки

Местный коэффициент запаса прочности по напряжениям:

$$K_M = \frac{\sigma_{дл}(T, \tau)}{\sigma_{max}} = \frac{110 \cdot 10^7}{0.236 \cdot 10^9} = 4.66 .$$

Условия прочностной надежности:

$$K_M = 4.66 > 1,45 .$$

Условия прочностной надежности по местным напряжениям выполняется.

### Список литературы

1. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1979. – 702 с.
2. Бондарчук, П.В. Прочностное проектирование лопаток и дисков ГТД в конечно-элементном комплексе ANSYS: учеб. пособие. / П.В. Бондарчук, С.В. Фалалеев. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 42 с.
3. Великанова, Н.П. Расчет на прочность основных деталей ГТД. Лабораторный практикум по дисциплине «Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок»: учеб. пособие. / Н.П. Великанова, Ф.К. Закиев, П.Г. Великанов. - Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. - 83 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Ф.А. Суфьянова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИИ ОТЖИГА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕГУЛЯРНОГО РАСКРОЯ ФИГУРНЫХ ЗАГОТОВОК

APPLICATION OF THE SIMULATED ANNEALING METHOD FOR AUTOMATING  
REGULAR CUTTING OF SHAPED WORKPIECES

*Рассматривается решение задачи регулярного раскроя фигурных заготовок на основе метода имитации отжига. Разработано информационное и математическое обеспечение задачи. Метод имитации отжига модифицирован для решения задачи раскроя фигурных заготовок. Проведено исследование эффективности применения метода имитации отжига для решения задачи раскроя фигурных заготовок.*

*In this paper, we consider the solution of the problem of regular cutting of shaped blanks based on the method of simulated annealing. Information and mathematical support for the problem has been developed. The method of simulated annealing is modified to solve the problem of cutting shaped blanks. The study of the effectiveness of using the method of simulated annealing to solve the problem of cutting shaped blanks.*

*Ключевые слова: карта раскроя, упаковка, алгоритм имитации отжига.*

*Keywords: cutting map, packaging, annealing simulation algorithm.*

Исходными данными задачи являются: габариты листа и заготовок. В результате решения будет получена карта раскроя.

Таким образом, задача раскроя фигурных заготовок состоит в том, чтобы оптимально разместить заготовки на листе. [3]

Математически задача сводится к задаче упаковки в контейнеры. Для формализации будем использовать аппарат теории множеств и теории оптимизации.

Так как целевой функцией задачи является минимальная неиспользуемая площадь листа (отходы), формулировка критериев задачи будет следующий:

$$F_1 = \frac{S - \sum_{i=1}^n s_i}{S} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$S = W \cdot L_{\text{исп}}; \quad s_i = w_i \cdot l_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $S$  – израсходованная площадь листа,  $s_i$  – площадь  $i$ -й размещенной заготовки,  $W$  – ширина листа,  $L_{\text{исп}}$  – длина использованной части листа,  $l_k$  – длина заготовок, расположенных вертикально,  $w_k$  – ширина заготовок, расположенных горизонтально,  $w_i$  – ширина  $i$ -й размещенной заготовки,  $l_i$  – длина  $i$ -й заготовки,  $n$  – количество заготовок для размещения на листе. [1]

Ограничения для данной задачи в совокупности представляют набор условий (2), (3) и (4), выполнение которых означает допустимость упаковки. Условия (2) и (3) означают не пересечение уже размещенных прямоугольников по оси  $Ox$  и оси  $Oy$  с размещаемым, условие (4) - гарантирует, что размещаемый прямоугольник не выйдет за границы листа.

$$x_i \geq (x_j + l_j) \vee x_j \geq (x_i + l_i) \vee x_i \geq (x_j + w_j) \vee x_j \geq (x_i + w_i), \quad (2)$$

$$y_i \geq (y_j + w_j) \vee y_j \geq (y_i + w_i) \vee y_i \geq (y_j + l_j) \vee y_j \geq (y_i + l_i), \quad (3)$$

$$x_i \geq 0 \wedge y_i \geq 0 \wedge y_i + w_i \leq W \vee y_i + l_i \leq W, \quad (4)$$

для  $i$  и  $j = \overline{1, n}$ .

Для решения данной задачи был выбран алгоритм имитации отжига, основанный на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества, в том числе при отжиге металлов. Является вероятностным методом аппроксимации глобального оптимума заданной функции.

Порядок выполнения алгоритма:

1. Задание начальной температуры.
2. Вычисление целевой функции.
3. Понижение температуры.
4. Проверка условия допустимости.
5. Если условие допустимости соблюдается, то принимается решение о дальнейшем преобразовании, иначе вычисляется критическая величина и случайное число для сравнения. Если критическая величина больше случайной величины, то маршрут принимается, в противном случае - возврат к предыдущему маршруту.
6. Проверка условия окончания.

В общем случае, достоинства алгоритма:

- «Идейная» простота алгоритма.
- Простота реализации.
- Высокая вероятность нахождения решения, близкого к оптимальному.

Недостатки:

- Очень быстро падающая вероятность нахождения оптимального решения с возрастанием  $N$ .
- Из-за вероятностной природы есть возможность некорректного решения при нахождении локального минимума[2].

Для решения поставленной задачи алгоритм имитации отжига был использован как часть алгоритма раскладки фигурных заготовок на листе материала.

Пример решения поставленной задачи с использованием метода имитации отжига на листе габаритами  $1000 \times 1200$  мм<sup>2</sup>:

Таблица 1. Входные данные

№	Габариты заготовок, мм		Количество, шт.	Площадь, мм <sup>2</sup>
	Длина	Ширина		
1	200	150	10	30 000
2	400	300	5	120 000

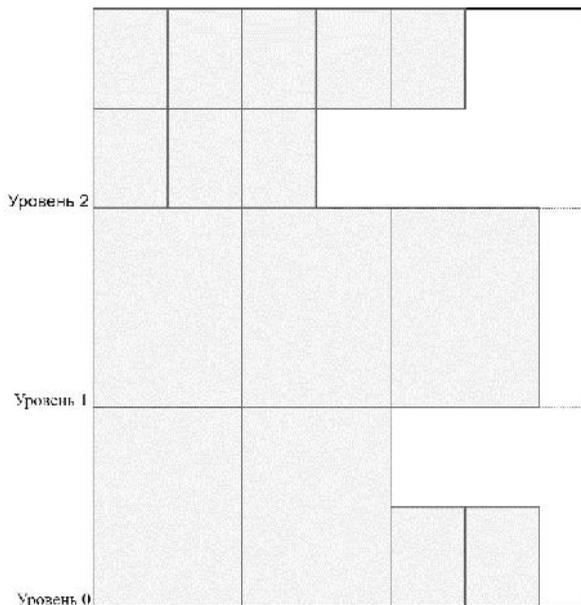


Рис. 1. Результат решения

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что использование алгоритма имитации отжига для решения задачи регулярного раскроя фигурных заготовок реально, но не вполне рационально. Возможно, лучшим выбором для решения данной задачи мог бы быть другой алгоритм, к примеру, метод ветвей и границ.

### Список литературы

1. Гиниатуллина, Р.А. Оптимизация раскроя листового материала на прямоугольники различных размеров/ Р.А. Гиниатуллина, Ш.И. Галиев // Электронный сборник статей по материалам XXI студенческой международной заочной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки». – Новосибирск, 2014. – С. 38.
2. Smart Blog. Метод отжига [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://smart-blog.net/post/1773>. - Заглавие с экрана.
3. Планирование и рациональное экономное использование материальных ресурсов [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5270167/page:4/>. - Заглавие с экрана.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

О.В. Филипович, М.И. Гарматюк, М.М. Майстришин  
(г. Севастополь, Севастопольский государственный университет)

## **ПРИМЕНЕНИЕ САПР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КНОПОЧНОЙ ПАНЕЛИ ЭНДОСКОПИЧЕСКОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ**

THE USE OF CAD IN THE DESIGN OF THE ENDOSCOPIC VIDEO SYSTEM KEYPAD

*Представлены результаты создания печатной платы кнопочной панели автономной эндоскопической видеосистемы медицинского назначения.*

*The results of creating a printed circuit board for the keypad of an autonomous endoscopic video system for medical purpose are presented.*

*Ключевые слова: кнопочная панель, видеосистема, печатная плата, САПР.*

*Keywords: keypad, video system, printed circuit board, CAD.*

Выполнение эндохирургических операций требует специального, достаточно сложного и дорогостоящего оборудования и инструментария, одним из основных элементов которого является видеосистема. Подавляющее большинство интегрированных эндохирургических операционных в России оснащены импортным оборудованием, поэтому разработка и модернизация отечественных эндоскопических видеосистем является актуальной задачей.

Данная работа посвящена описанию процесса проектирования одного из элементов универсальной автономной эндоскопической видеосистемы медицинского назначения – кнопочной панели. Панель представляет собой печатную плату (ПП), для производства которых наиболее широкое распространение получили такие сервисы как JLCPCB (jlcpcb.com) и PCBWay (pcbway.com). Первый имеет и собственную онлайн среду разработки плат EasyEDA, в которой можно создать схему, развести печатную плату и заказать ее производство. Для заказа печатных плат на производстве применяются файлы Gerber RS-274X и Excellon N/C Drill.

Рассмотрим процесс создания Gerber-файлов для платы кнопочной панели, разработанной в среде DipTrace 4. Разработана схема ПП (рис. 1), выполнена разводка верхней и нижней стороны ПП (рис. 2) и 3D модель платы (рис. 3) для дальнейшего проектирования в среде Autodesk Inventor. Все файлы создаются в программе PCB Layout из пакетов DipTrace.

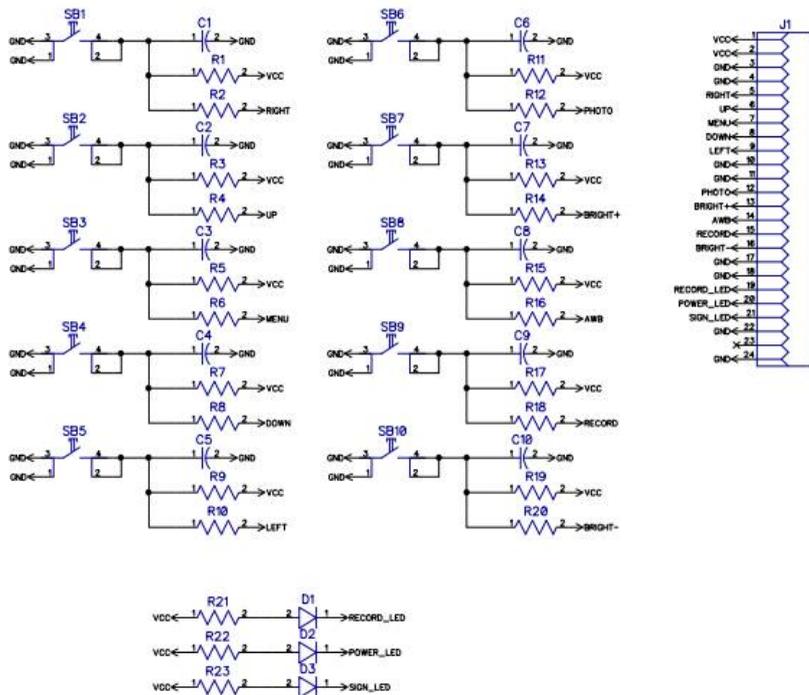
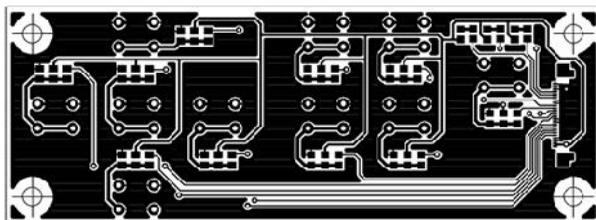


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

Top side



Bottom side

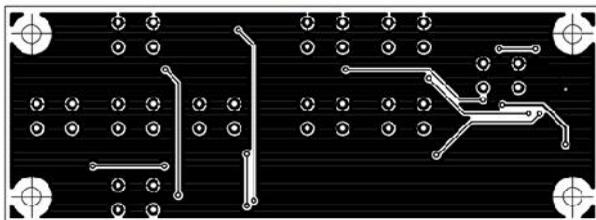


Рис. 2. Разводка верхнего и нижнего слоя ПП (обозначение элементов отключено)

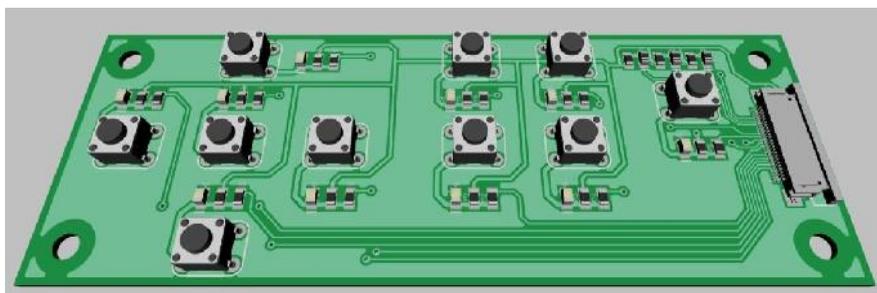


Рис. 3. 3D модель ПП

Gerber – универсальный файловый формат, который описывает проект ПП для изготовления фотошаблонов на самом разнообразном оборудовании, поддерживаемый практически всеми современными САПР электронных устройств. Формат подразумевает, что каждый слой платы помещается в отдельный файл. Большинство сервисов придерживаются соглашения по именованию файлов, указанного в таблице 1.

Таблица 1. Имена файлов

Имя файла	Альтернативное	Примечание
Top.GBR	<boardname>.GTL	Верхний слой меди
Bottom.GBR	<boardname>.GBL	Нижний слой меди
Topmask.GBR	<boardname>.GTS	Верхний слой маски
Bottommask.GBR	<boardname>.GBS	Нижний слой маски
Topsilk.GBR	<boardname>.GTO	Верхний слой маркировки
Bottomsilk.GBR	<boardname>.GBO	Нижний слой маркировки
BoardOutline.GBR	<boardname>.GKO	Контур платы
Through.drl	<boardname>.TXT	Отверстия платы

Данных слоев достаточно для изготовления платы. Слои Toppaste и Bottompaste – верхний и нижний слой трафарета нанесения паяльной пасты, используются при автоматической пайке деталей. Далее плата проверяется на наличие ошибок. Если ошибки отсутствуют, то производится проверка расстановки и разводки элементов согласно техническому заданию и только затем экспортируются Gerber файлы. N/C Drill файл описывает параметры всех отверстий на плате и создается для их экспорта.

Указанные файлы используются для изготовления двусторонней печатной платы кнопочной панели с маской и маркировкой элементов. Для удобства заказа на сервисах все созданные файлы помещаются в архив.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Н.М. Шевцова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS**

### **ANALYSIS WELD CONNECTION'S STREIGHT IN SOLIDWORKS**

*В данной статье моделируются нагрузки на сварное соединение стальной детали по следующим критериям: на кручение, при воздействии давления, распределённая масса. Расчёт прочности производится с помощью метода конечных элементов.*

*This article simulates the load on a welded joint of a steel part according to the following criteria: torsion, under pressure, distributed mass. Strength is calculated using the finite element method.*

*Ключевые слова: моделирование нагрузки, сварное соединение, метод конечных элементов.*

*Keyboards: simulates the load, weld connection, finite element method.*

Необходимость в создании прочных сварных соединений чрезвычайно высока, так как они используются во многих конструкциях и применяются для разного вида работ. В наше время, с помощью технологий и вспомогательных средств, точность расчетных данных для сваривания крепких и долговечных сварных швов увеличивается. Без швов создание большинства привычных и нужных для человека конструкций было бы невозможно.

Большинство предприятий стремятся создавать проекты в трехмерном пространстве. Наряду с быстротой, такие системы позволяют повысить точность проектирования: облегчается отслеживание спорных моментов в конструкции.

Существуют различные виды сварных соединений, в данном исследовании представлен расчёт прочности стыкового соединения без скоса кромок с двусторонним швом. Обладает высокой прочностью при любом характере нагрузок и отличается высокой экономичностью. Исходная модель сварного соединения представлена на рис. 1.

Наиболее эффективным приближённым методом расчёта прочности является метод конечных элементов (МКЭ) [1-3]. Аппроксимация производится тетраэдральными изопараметрическими элементами с линейным полем перемещений (деформации постоянные, грани плоские) и с параболическим полем перемещений (деформации линейные, грани – полиномы второго порядка).

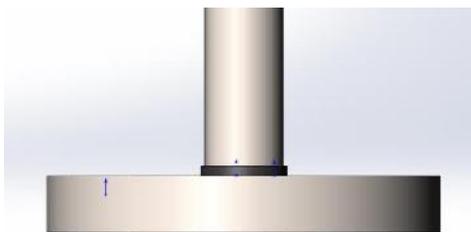


Рис. 1. Исходная модель сварного соединения

В табл. 1 представлены нагрузки, применённые к исходной модели сварного соединения.

Таблица 1. Описание нагрузок

Наименование	Внешние нагрузки	Параметры нагрузки
Статический 1	Вращающий момент	Величина: 1000 Н/м
Статический 2	Распределённая масса	Величина: 100 кг

На рис. 2 представлены эквивалентные деформации статистического расчёта №1.

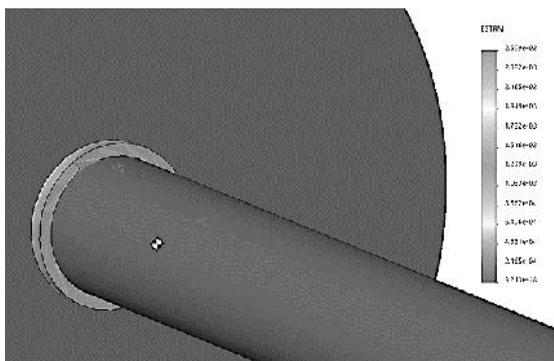


Рис.2. Эквивалентные деформации нагрузки №1

Оценка жёсткости конструкции при нагрузке №1 осуществлялась при расчёте на вращающий момент.

На рис. 3 представлены эквивалентные деформации статистического расчёта №2. Оценка жёсткости конструкции при нагрузке №2 осуществлялась при расчёте на распределение массы и силу тяжести.

Все нагрузки, использованные при расчете, наглядно показали, что данное сварное соединение устойчиво к распределённой силе, распределённой массе и вращающему моменту, следовательно, сварной шов достаточно прочный. В табл. 2 представлены результаты прочностного анализа для нагрузки №1. В табл. 3 представлены результаты прочностного анализа для нагрузки №2.

Таким образом, выбранный метод МКЭ и инструмент для моделирования позволяют решить задачу анализа прочности сварного соединения при различных типах нагрузки. Аналогично, МКЭ позволяет эффективно решать и

задачи связанные с электромагнитными полями, например электромагнитной совместимости [4, 5].

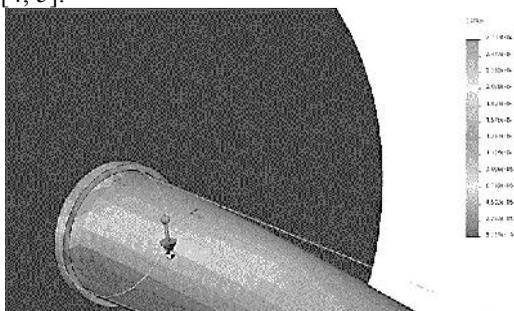


Рис.3. Эквивалентные деформации нагрузки №2

Таблица 2. Результаты прочностного анализа для нагрузки №1

Значения	Допустимые	Полученные	Вывод
Предел прочности, Мпа	470	440,03	Удовлетворяет допустимому значению
Коэффициент запаса	1	2	Удовлетворяет допустимому значению
Коэффициент жёсткости, Н/мм	80 000	≈2	Удовлетворяет допустимому значению

Таблица 3. Результаты прочностного анализа для нагрузки №2

Значения	Допустимые	Полученные	Вывод
Предел прочности, Мпа	470	7,212	Удовлетворяет допустимому значению
Коэффициент запаса	1	2,5	Удовлетворяет допустимому значению
Коэффициент жёсткости, Н/мм	80 000	≈3	Удовлетворяет допустимому значению

### Список литературы

1. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы/ Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
2. Мухин, А. Метод конечных элементов для инженеров, конструкторов и технологов/ А.Мухин // САПР и графика. – 2003. – №7.
3. Самарский, А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры/ А.А Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
4. Гизатуллин, З.М. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №9. – С. 7.
5. Гизатуллин, З.М. Целостность информации в USB флэш-накопителе при воздействии импульсного магнитного поля / З.М. Гизатуллин, Ф.М. Фазулянов, Л.Н. Шувалов, Р.М. Гизатуллин // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №8. – С. 8.

Материал поступил в редколлегию 06.10.20.

D.M. Umurzakova

(Uzbekistan, Tashkent, Tashkent State Technical University)

**DEVELOPMENT OF MODELS AND ALGORITHMS FOR STUDYING  
THE DYNAMICS OF MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS  
WITH PULSE-WIDTH MODULATION**

*The problems of synthesizing optimal control actions in systems with pulse-width modulation encounters difficulties associated with the obtained sufficiently simple expressions, which gives a correct solution, intended use of the results in control problems for complex discrete dynamic objects in real time. The use of existing methods does not give acceptable results even with the use of modern computing facilities, due to the cumbersomeness of the results obtained, as well as the difficulty of ensuring the physical realizability of the expressions obtained. In this regard, the development of machine-oriented methods for the synthesis of optimal control actions in a system with pulse-width modulation, the use of which does not require a large mathematical calculation, and having a large degree of formalization, is undoubtedly an urgent scientific and technical problem.*

*Keywords — nonlinear signal modulation, interpretation of the dynamics of impulse systems, iterative search for control actions, pulse-width modulation, optimization problem, microprocessor controller.*

Quite a lot of works, methods and algorithms are devoted to the solution of the problem of synthesis of optimal control actions in systems with linear modulation of signals [1]. The main disadvantages of these methods are their extremely cumbersome and complex mathematical apparatus, a large number of simplifying sentences and calculations, and the complexity of interpreting the results obtained. In addition, the use of these methods often leads to obtaining systems of partial differential equations or algebraic transcendental equations, the exact solution of which is impossible: if some calculations are incorrect, in principle, there may be no solution; the use of numerical methods for solving with a large dimension of the resulting system, even when using the capabilities of modern computers, can give an absolutely unacceptable result [2].

As an example, below is a simulation model of a pulse width modulator (PWM). The considered PWM circuit consists of pulse width modulators and a continuous linear part. The duration of the  $n$ -th pulse at the output of each of the modulators  $i = 1, 2, \dots, N$  is determined by the value of the error signal  $e(nT_i)$  calculated at discrete moments of time, i.e.

$$\tau_n^i = \begin{cases} \varphi^i[e(nT_i)] \text{ npu } \varphi^i[e(nT_i)] \leq T_i, \\ T \text{ npu } \varphi^i[e(nT_i)] > T_i, \end{cases}$$

where  $T_i$  - pulse repetition period at the PWM output;  $\varphi^i$  - modulation characteristic of the width modulator.

The use of this method for systems with nonlinear modulation of the control action requires a modification of the known algorithm for solving the problem of transferring a multidimensional linear dynamic plant with  $M$  input and  $N$  output controlled variables from a given initial state to the required final state in a minimum number of control cycles. It is assumed that the sampling period is the same for all input signals. The minimum possible number of translation ticks in accordance with the  $N$ -interval theorem is determined by the expression:

$$L = \text{Int} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} / M + 0.5 \right\} \quad (1)$$

where  $P_{ij}$  - order of the transfer function (differential equation) of the channel;  $j$ -th entrance;  $i$  -th output of the control object.

The required state of the control object is determined by the conditions

$$Y_i(L + K) = G_i(L + K), i = \overline{1, N}; K = 0, \widetilde{N}_i, \quad (2)$$

where  $Y_i(L + K)$  - is the value of the  $i$  -th output variable in the  $(L + K)$ -th cycle;  $G_i(L + K)$  - the required value of the  $i$  -th output variable;  $G_i$  - the number of cycles of fixing the  $i$  -th output variable.

Based on the analysis of the dynamics of the behavior of the control object, we will change conditions (2) to the following::

$$Y_i(L + K) = E_i(L + K), i = \overline{1, N}; K = 0, \widetilde{N}_i, \quad (3)$$

where

$$E_i(L + K) = G_i(L + K) - Y_i^*(L + K), \quad (4)$$

$Y_i^*(L + K)$  - the predicted value of the  $i$  -th output variable provided:

$$U_j(m) = 0, j = \overline{1, M}; m = \overline{1, L} \quad (5)$$

In the case of zero initial conditions, these dependencies will have the form:

$$Y_i(L + K) = \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^L U_j(m) * \omega_{ij}((L + K - m + 1) * T), \quad (6)$$

$$i = \overline{1, N}; K = 0, \widetilde{C}_i,$$

where  $T$  - control signal sampling period;  $\omega(qT)$  - the value of the weighting function (response to a pulse of duration  $T$ ) in the  $q$  -th cycle.

Combining the system of expressions (6) with conditions (3), we obtain the system of linear algebraic equations:

$$W * U = E \quad (7)$$

where  $W$  - weighting function coefficient matrix:

$$W = \left[ \omega_{ij} (L + K - m + 1) \right] \quad (8)$$

$U$  - vector column of predicted error values:

$$U = \begin{bmatrix} U_1(1), U_2(2), \dots, U_1(L), U_2(1), \dots \\ U_2(L), U_m(1), \dots, U_m(L) \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$E$  column vector of predicted error values:

$$A = \begin{bmatrix} A_1(1), A_1(2), \dots, A_1(L), \\ A_2(1), \dots, A_2(\tilde{N}_2 + L), A_n(L), \dots, E_n(C_i + L) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

The dimension of system (7) is:

$$M * L = \sum_{i=1}^N C_i \quad (11)$$

Having solved system (7), we obtain the desired control actions in the form of linear combinations of predicted errors:

$$U_j(m) = \sum_{i=1}^N \sum_{K=0}^{C_i} R_{im} \left( \sum_{s=1}^{i-1} C_s + K \right) * E_i(L + K) \quad (12)$$

where  $R_{im}$  - vector row matrix  $\omega^{-1}$ .

The obtained expressions (12) are actually the main correcting procedure in the iterative search for control actions modulated in width. But first, let us consider some necessary conditions, the fulfillment of which should ensure the solution of the task. First, the pulse repetition period for pulse width modulation must be equal to the sampling period of the control signal during synthesis for a linear pulse system. Secondly, the condition must be met:

$$\left| U_j(m) \right| < A_j \quad (13)$$

where  $A_j$  - amplitude of width modulated control actions.

Let us assume that the solution of the synthesis problem for a linear impulsive system with the number of translation cycles determined by expression (1) led to the failure of condition (13). Let's increase the number of translation ticks by  $J$ . Let's take it first  $J = 1$ . Then the values of the predicted errors change and will be determined by the expression:

$$E_i^j(L + K) = E_i(L + K) - \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^J U_j(m) * \omega_{ij}(L + K - m + 1), \quad (14)$$

$$i = \overline{1, N}; K = \overline{1; C_i + J}$$

We substitute the found expressions for the predicted errors for expression (12), which allows us to express  $L$  of the main control actions for each input variable  $J$  through additional controls

$$U_j(J+m) = U_j(j+m) + \sum_{K=1}^M \sum_{i=1}^J \omega_{ij}(L+k-m+1+J) * U_k(i) \quad (15)$$

Now it is necessary to solve the optimization problem associated with minimizing the criterion:

$$F = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{L+J} U_j^2(i) \rightarrow \min; (j = \overline{1, M}; i = \overline{1, J}) \quad (16)$$

This problem is solved simply by using the least squares method. As a result of its solution, the values of auxiliary control actions are found  $U_j(k), (k = \overline{1, J})$ . If they all satisfy condition (13), then using formula (14) we find the values of the predicted errors, substitute them into expression (12) and find the values of control actions  $U_j(k), (k = \overline{J+1, L+J})$ . They also need to be checked for the fulfillment of condition (13). If it is fulfilled, then you can proceed to the next stage of the synthesis. Otherwise, the value of  $J$  must be increased by one and the procedure for minimizing the sum of the squares of the control actions must be repeated.

In the article, the method is based on the representation of the dynamics of impulse systems in the form of a space of state variables and the use of the N-interval theorem, which allows the system to be transferred to the required state in a minimum number of control cycles. The use of nonlinear modulation of signals of the pulse-width modulation type, based on an increase in control cycles, taking into account the predicted control errors during an iterative search for control actions modulated along the width. The solution to this problem is based on the proposition that the total area of control pulses for each output for a linear pulse system and a system with pulse-width control modulation must be equal. In this case, the values of the control actions found during the synthesis for a linear impulse system are corrections in the form of a change in the area of the corresponding control signals, modulated in width. The found control actions provide a control error of less than 3%.

## References

1. *Rotach, V.Ya.* The Theory of Automatic Control. Moscow: Publishing House Moscow Power Engineering Institute, 2008. - 396 p.
2. *Siddikov I.X., Umurzakova D.M., Yadgarova D.B.* (2020) Structural-Parametric Synthesis of an Adaptive Fuzzy-Logical System // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. ISSN: 2332-3299 (Online). Volume 7 No. 2. 2020 y. P. 94-102. DOI: 10.13189/ujeee.2020.070204.

*Материал поступил в редколлегию 15.10.20.*

**СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**  
**INFORMATIONAL MEASURING SYSTEMS**

DOI: 10.51932/9785907271739\_63

УДК 681.518

Н.В. Андрянов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**РАСПОЗНАВАНИЕ ИНТЕРЕСУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ВОЗДУХЕ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ DETECTNET**

**RECOGNITION OF OBJECTS OF INTEREST IN THE AIR  
USING THE DETECTNET NEURAL NETWORK**

*Приводятся результаты распознавания объектов с помощью метода DetectNet. Формируется вывод по примененному методу.*

*The article presents the results of object recognition using the DetectNet method. The conclusion is also formed according to the applied method.*

*Ключевые слова: компьютерное зрение, автоматизированные информационные системы.*

*Keywords: computer vision, automated information systems.*

В настоящее время очень распространены беспилотные аппараты, принятие решений в которых строятся за счет обработки множества датчиков, в том числе данных с камеры, которые поступают на обработку, для определения каких - либо объектов интереса. Данные объекты распознаются с использованием стандартных методов обработки и(или) нейронных сетей.

Имеется задача обработки изображений, для решения которой был собран стенд.

При создании стенда для отработки методов распознавания. Были использованы следующие методы:

- 1) Метод Виолы Джонса.
- 2) Нейронная сеть DetectNet.
- 3) Нейронная сеть Yolo2.

В данной работе рассмотрена часть бортовой системы беспилотного летательного аппарата, которая отвечает за распознавание объектов интереса с помощью метода DetectNet [3].



Рис. 1. Результат обработки сетью DetectNet

На рис. 1 можно увидеть, что точность данной сети в результате и правда не плоха. В результате тестирования была получена точность распознавания порядка 85-90%, но так же был процент ложного срабатывания, который связан с малым количеством примеров на разном фоне. То есть данный параметр улучшаем, но появилась новая проблема относительно метода Виолы Джонса, это довольно большое время обработки кадра.

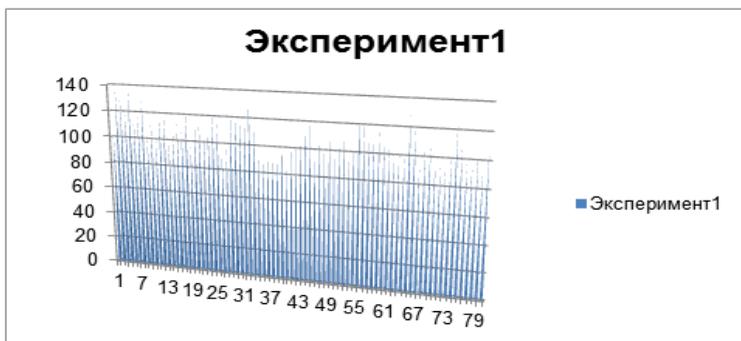


Рис. 2. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока метод Виола Джонса



Рис. 3. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока с помощью сети DetectNet

Как можно увидеть из рис. 2 и рис. 3 среднее время обработки одного кадра методом Виола Джонса равно в среднем 122мс, когда те же кадры с помощью DetectNet в среднем обрабатываются за 13412 мс один кадр.

Разница в 110 раз. Данный результат можно объяснить тем, что вычисления не распараллелены в вычислениях на GPU с помощью фреймворка OPENCV и методов

```
//net.setPreferableBackend(DNN_BACKEND_OPENCV);  
//net.setPreferableTarget(DNN_TARGET_OPENCV);
```

Была сделана попытка распараллелить вычисления, но в результате на JetsonTX1 лучших результатов достигнуто не было [2].

Тогда было решено провести эксперимент на стационарном компьютере с процессором intel core i7 4770 и видеокартой geforce gtx 1060 6GB.

Вычисления сначала были посланы на CPU (рис. 4), а в дальнейшем с помощью фреймворка описанного выше вычисления были посланы на карту компьютера (рис. 5).

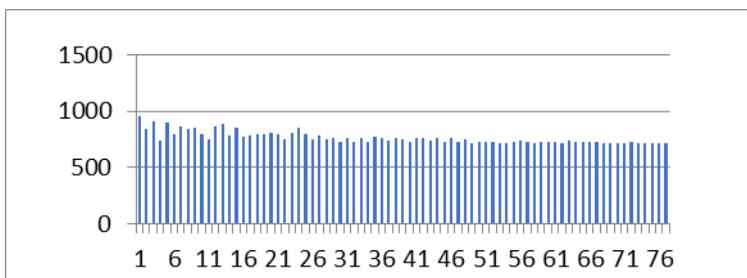


Рис. 4. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока с помощью сети DetectNet(CPU\_PC)

На PC с расчетами на CPU среднее время обработки одного кадра с помощью DetectNet 763мс.

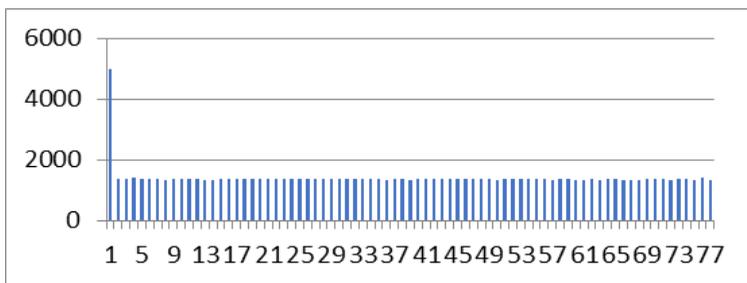


Рис. 5. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока с помощью сети DetectNet(GPU\_PC)

На PC с расчетами на GPU среднее время обработки одного кадра с помощью DetectNet 1402мс.

Так как на GPU расчеты идут медленнее, чем на CPU, сделаем вывод, что фреймворк плохо оптимизирован для передачи вычислений на разветки сети на слабые ядра GPU [1].

Так же здесь можно заметить, что первый кадр обрабатывался долго, связано это с инициализацией, так как в случае с PC видео подается в виде mp4 файла.

Данная особенность имеет место быть во всех методах, так как инициализируется файл во всех случаях.

Также метод Виола Джонса был протестирован на стационарном компьютере с вышеописанными характеристиками (рис. 6) [2].

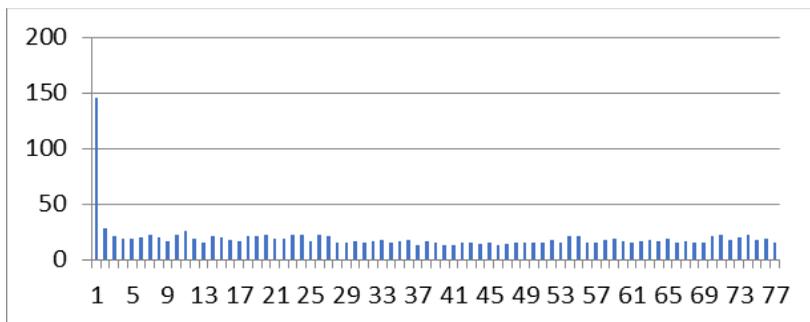


Рис. 6. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока с помощью метода Виолы Джонса(PC)

Как и в случае с jetson TX1 на PC становится видно, что метод Виолы Джонса выигрывает по среднему времени обработки кадра и составляет 20 мс.

В результате относительно распознавания с помощью DetectNet на CPU и метода Виолы Джонса получаем разницу в 38 раз.

Из данного эксперимента следует вывод, что нейронная сеть DetectNet точнее, но намного медленнее работает относительно математического метода.

### Список литературы

1. *Макс Шлее*. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.
2. *Gary Bradski, Adrian Kaehler*. Learning OpenCV. O'Reilly Media, October 2008.
3. *Hoiem, D., Chodpathumwan, Y., and Dai, Q.* Diagnosing Error in Object Detectors. Computer Vision – ECCV 2012, Springer Berlin Heidelberg, 340–353.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

Н.В. Андреянов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **РАСПОЗНАВАНИЕ ИНТЕРЕСУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ВОЗДУХЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВИОЛЫ ДЖОНСА**

RECOGNITION OF OBJECTS OF INTEREST IN THE AIR USING THE VIOLA JONES METHOD

*Приводятся результаты распознавания объектов с помощью метода Виолы Джонса. Формируется вывод по примененному методу.*

*The article presents the results of object recognition using the Viola Jones method. The conclusion is also formed according to the applied method.*

*Ключевые слова: компьютерное зрение, автоматизированные информационные системы.*

*Keywords: computer vision, automated information systems.*

В настоящее время широко применяются беспилотные аппараты. Важной чертой данных аппаратов является отсутствие человека на борту. Говоря про беспилотные летательные аппараты, можно сказать, что они способны долгое время находиться в воздухе, следовательно, совершать полёты на большие расстояния, нести различную полезную нагрузку, обрабатывать и передавать данные полученные всевозможными системами, внедренными в данный аппарат. Эффективность выполнения поставленных, перед беспилотным летательным аппаратом задач зависит от точности и отлаженности алгоритмов, систем установленных на беспилотном летательном аппарате, таких как камеры и всевозможные датчики.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что задача распознавания в беспилотных летательных аппаратах одна из самых важных. В следствии чего был создан стенд для отработки методов распознавания интересующих объектов.

При создании стенда для отработки методов распознавания. Были использованы следующие методы:

- 1) Метод Виолы Джонса.
- 2) Нейронная сеть DetectNet.
- 3) Нейронная сеть Yolo2.

В данной работе рассмотрена часть бортовой системы беспилотного летательного аппарата, которая отвечает за распознавание объектов интереса с помощью метода Виолы Джонса [2].

Условия проведения эксперимента:

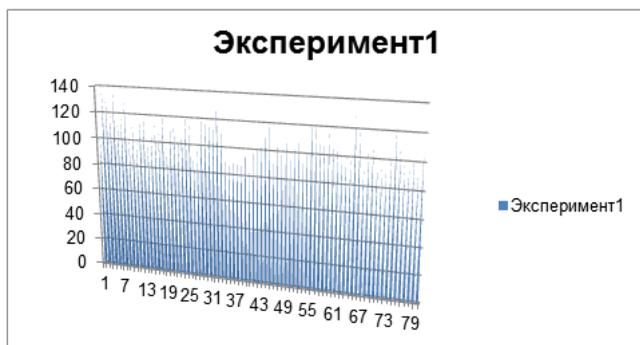
- освещенность во время съемки: дневной свет (пасмурный и солнечный день, 500-1000 и 10000 лк соответственно);
- чувствительность камеры (ISO): от 100 до 400, авто-настройка;
- формат полученных кадров: 1280x760, 1920x1080.

Ниже представлены результаты трех проведенных экспериментов. При проведении первого эксперимента обработка видео была остановлена на 80 кадрах, соответственно выборка первого эксперимента составила: 80 кадров.

При проведении второго эксперимента обработка видео была остановлена на 2100 кадрах, соответственно выборка второго эксперимента составила: 2100 кадров.

При проведении третьего эксперимента обработка видео была остановлена на 12787 кадрах, соответственно выборка третьего эксперимента составила: 12787 кадра.

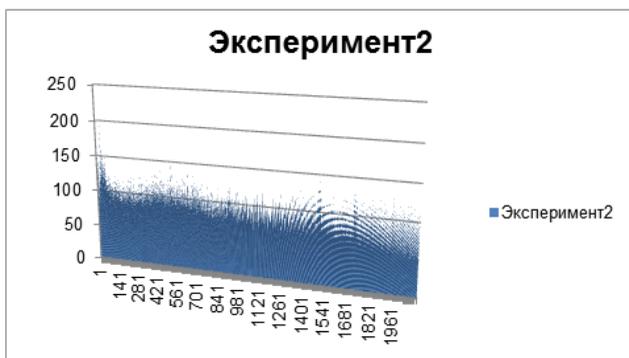
На рис. 1 представлены результаты обработки 80 кадров видеопотока с камеры (время обработки каждого кадра), где по оси Oy отложено время обработки кадра в мс, по оси Ox отложен номер кадра.



*Рис.1 Диаграмма времени обработки кадров видеопотока*

Итак, среднее время обработки кадра без искомого объекта составило 101,78 мс. Среднее время обработки кадра с самолетом (с искомым объектом) составило 122,16 мс. Таким образом, на 20,39 мс возрастает время обработки кадра, если на вход поступает искомый объект, но это не критично, так как среднее время обработки кадра составило 109,68мс. При этом, минимальное время обработки кадра составило 87мс.. Максимальное время обработки кадра составило 137мс.

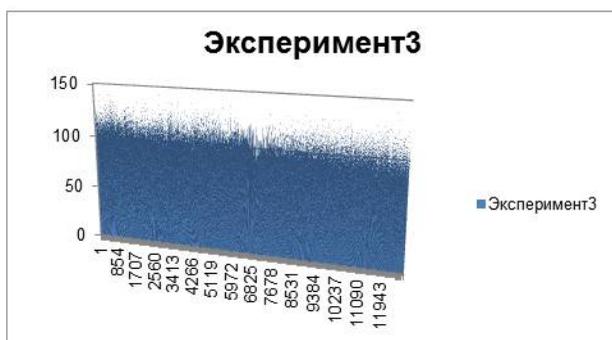
На рис. 2 представлены результаты обработки 2100 кадров видеопотока с камеры (время обработки каждого кадра), где по оси Oy отложено время обработки кадра в мс, по оси Ox отложен номер кадра.



*Рис.2. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока*

Итак, среднее время обработки кадра без искомого объекта составило 103,87мс. Среднее время обработки кадра с самолетом (с искомым объектом) составило 121,86мс. Таким образом, на 17,99мс. возрастает время обработки кадра, если на вход поступает искомый объект, но это не критично, так как среднее время обработки кадра составило 110,7мс. При этом, минимальное время обработки кадра составило 83мс.. Максимальное время обработки кадра составило 207мс..

На рис. 3 представлены результаты обработки 12787 кадров видеопотока с камеры (время обработки каждого кадра), где по оси Oy отложено время обработки кадра в мс, по оси Ox отложен номер кадра.



*Рис.3. Диаграмма времени обработки кадров видеопотока*

Итак, среднее время обработки кадра без искомого объекта составило 103,7 мс. Среднее время обработки кадра с самолетом (с искомым объектом) составило 119,6 мс. Таким образом, на 15,9 мс возрастает время обработки кадра, если на вход поступает искомый объект, но это не критично, так как

среднее время обработки кадра составило 109,19 мс. При этом минимальное время обработки кадра составило 81мс. Максимальное время обработки кадра составило 145мс.

Подведем итог: при оптимальном разрешении камеры (1280x760) данный метод позволяет с достаточно высокой скоростью обработать кадры видеоизображения (табл.1).

*Таблица 1. Время обработки одного кадра*

Формат кадра	1280x760
Минимальное время обработки кадра, мс.	81
Максимальное время обработки кадра, мс.	207

При проведении эксперимента было выявлено, что HD разрешение недостаточно, в связи с чем при проведении эксперимента было использовано разрешение Full HD. Проведенные эксперименты показали, что разрешение Full HD не влияет на время обработки кадра (табл.2).

*Таблица 2. Время обработки одного кадра*

Формат кадра	1920x1080
Минимальное время обработки кадра, мс.	81
Максимальное время обработки кадра, мс.	207
Средняя скорость распознавания одного кадра	144 мс

Воспользовавшись в первом опыте классификатором Хаара и получив некоторые результаты, в среднем количество распознанных объектов стремится к 80-90% распознанных объектов самолета на поданных изображениях и при этом небольшом времени обработки [1], но также присутствует процент ложных срабатываний, связанных с несколькими проблемами:

1. Недостаточное количество примеров объекта интереса, а также изображений подложек для объекта интереса, в связи с чем на некоторых фонах объект был не распознан.

2. Изменение освещения при получении кадра, данный момент постарались нивелировать с помощью применения фильтров на полученный кадр из библиотеки OpenCV перед подачей каскаду на обработку [2].

#### **Список литературы**

1. *Макс Шлее*. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.
2. *Gary Bradski, Adrian Kaehler*. Learning OpenCV. O'Reilly Media, October 2008.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

Ч.Ш. Габдрахманова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
ТОРГОВЛИ НА ВИРТУАЛЬНЫХ ТОРГОВЫХ ПЛОЩАДКАХ**

**AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF TRADING ON VIRTUAL SALES**

*Описана разработка приложения, предоставляющего возможность разместить его на выделенный виртуальный сервер и позволяющего получать пассивный доход, путем торговли на данной площадке.*

*This article describes the development of an application that provides the ability to place it on a dedicated virtual server and allows you to receive passive income by trading on this site.*

*Ключевые слова: информационная система, трейдер, виртуальная площадка.*

*Keywords: information system, trader, virtual platform.*

В современном мире интернет является мощным инструментом в руках человека. По статистике, более половины жителей планеты имеют доступ к сети Интернет. По отчётам аналитического агентства «NewZoo» выяснилось, что сейчас на нашей планете насчитается около 2,3 миллиарда геймеров. Отрасль видеоигр постепенно становится одной из главных частей индустрии развлечений, забирая аудиторию у традиционного спорта, кино и телевидения, например, через киберспорт или онлайн трансляции. Ежедневное количество активных пользователей Steam (онлайн-сервис цифрового распространения компьютерных игр): 16 445 226 (по состоянию на 17.09.2020) [5]. Помимо игр пользуются спросом и внутриигровые предметы на торговой площадке Steam. Такое большое количество пользователей генерируют миллионы транзакций ежедневно. В статье описывается создание удобной и простой в использовании системы для автоматизации рутинной работы трейдера, и максимизации прибыли. Основной деятельностью является перепродажа игровых предметов на торговой площадке. Особенность перепродажи заключается в поиске недооценённых продавцом предметов с наклейками, их покупке и последующему выставлению на продажу. Цена наклеек может варьироваться от пары рублей до одного миллиона рублей. Цена обусловлена редкостью и эксклюзивностью наклейки.

Онлайн игры — уникальная сфера, где люди могут тратить десятки тысяч ради развлечения. Коллекционирование внутриигровых предметов для множества игроков создают убедительную причину продолжать играть, а иногда привлекают пользователей к играм, на которые иначе бы даже не обратили внимание.

Объектом исследования в данной статье является процесс создания расширения для браузера Google Chrome[3].

Основными задачами автоматизации информационной системы торговли на виртуальной площадке являются:

- Устранение рутинных операций поиска предмета трейдером;
- Ускорение процессов поиска, покупки и оценки стоимости предметов;
- Максимизация прибыли путем увеличения количества сделок;

Как же выглядит процесс организации торговли на торговой площадке:

-Аккаунт на торговой площадке, предоставляющий доступ к информации с торговой площадки, возможность покупки и продажи с данного аккаунта.

-База данных предметов, хранящая названия предметов.

-База данных стикеров, где собраны названия и наценки.

Процессы и процедуры данной организации делятся на 3 этапа: поиск выгодных предметов, покупка предмета, выставление на продажу.

Входная информация: Аккаунт на торговой площадке, База данных предметов, база данных стикеров. Выходная информация: Предмет на продаже. Процессом непосредственно будет руководить трейдер. Процесс и процедуры: поиск выгодных предметов, покупка предмета, выставление на продажу. Изначально идет загрузка цен, после поиск подходящих по фильтрам предмета, затем проверка найденного предмета, покупка предмета и выставление на продажу купленного предмета.

Логическая модель спроектированной системы продаж отображена на рис. 1.

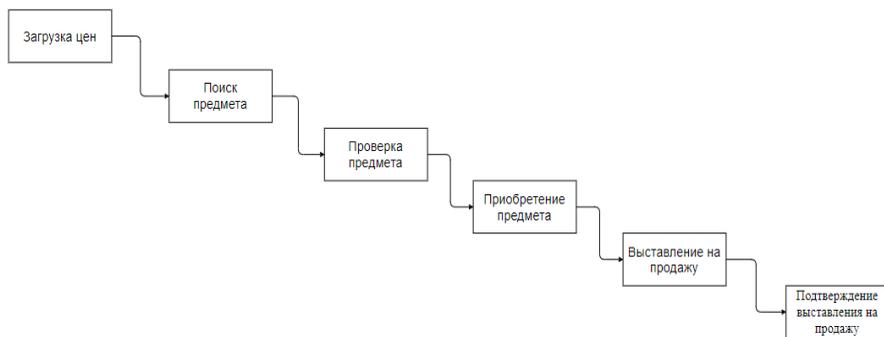
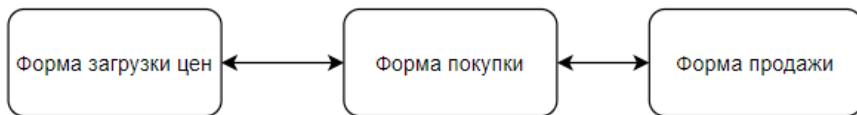


Рис. 1. Логическая модель системы продаж

Для достижения поставленных целей и реализации проекта используется среда разработки Brackets, ориентированная на работу с HTML, CSS и JavaScript [1].

Приложение имеет три формы и служит как сервис для автоматического подбора предметов со стикерами [4]. На каждой форме несколько зон которые служат для работы с определенными задачами. Структура приложения изображена на рис. 2.



*Рис. 2 Структура расширения для торговли на торговой площадке*

Разработка дизайна разделена на несколько этапов. Для начала создается макет в графическом редакторе. По окончании создания макета блоки приложения элементы и блоки приложения ставятся поверх уже созданного макета. Так формируется структура блоков будущего расширения, каждая из которых будет отвечать за свою роль.

Пользовательский интерфейс приложения состоит из основного блока, сайдбара с настройками, в котором находится информация по предметам, а также инструменты для манипуляции с ними.

Разработанная система предназначена для частных лиц и не очень масштабная. Установка происходит путем запуска исполняющего файла, системные требования минимальны: ОС 32 -разрядная версия Windows 7, процессор Intel Core® 2 Duo 2.0 GHZ, оперативная память 1,5 GB ОЗУ, место на диске более 60Gb, периферия: мышь и клавиатура

В процессе разработки приложения реализована структура и содержимое информационной системы и проведен анализ работоспособности информационной системы.

### Список литературы

1. Дронов, В. JavaScript в Web-дизайне / В. Дронов. - М.: БХВ-Петербург, 2015. - 736 с.
2. Вдовенко, Л. А. Информационная система предприятия / Л.А. Вдовенко. - М.: Вузовский учебник, Инфра-М, 2016. - 240 с.
3. Путькина, Л. В. Интеллектуальные информационные системы / Л.В. Путькина, Т.Г. Пискунова. - М.: СПбГУП, 2015. - 228 с.
4. Бельнская, М. Н. Администрирование в информационных системах / М.Н. Бельнская, С.Т. Малиновский, Н.В. Яковенко. - М.: Горячая линия - Телеком, 2014. - 400 с.
5. Статистика Steam и игровая статистика. -Текст: электронный //STEAM официальный сайт для игроков и разработчиков. - URL: <https://store.steampowered.com/stats/>.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

Г.И. Гаптуллазянова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОПЕРАТОРА ПРИ ОБРАБОТКЕ  
ОПЕРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

DEVELOPMENT OF AN OPERATOR'S INTERFERENCE RESEARCH APPLICATION  
DURING OPERATIONAL INFORMATION PROCESSING

*Рассмотрена возможность оптимизировать процесс тестирования оператора за счет автоматизации теста на помехоустойчивость. Предполагается, что разрабатываемая программа позволит проходить тестирование дистанционно, что подразумевает создание веб-приложения.*

*Информационная система может быть успешно внедрена и использована в различных сферах, в частности, способствовать ускорению отбора кандидатов при прохождении собеседований.*

*The possibility of optimizing the operator testing process by automating the noise immunity test is considered. It is assumed that the developed program will allow remote testing, which implies the creation of a web application. The information system can be successfully implemented and used in various fields, in particular, to help speed up the selection of candidates during interviews.*

*Ключевые слова: оператор, кандидат, тест, помехоустойчивость, таблица Горбова – Шульте, веб – приложение, автоматизация.*

*Keywords: operator, candidate, test, noise immunity, Gorbov - Schulte table, web application, automation.*

В современных условиях происходит усложнение технических средств и технологических процессов. Такой подход существенно меняет условие, характер и содержание труда. Человек все более освобождается от трудоемких, энергетических, транспортных и других функций, требующих физического напряжения, а основными для него все больше становятся функции контроля за работой машин, программирования и управления.

Технический прогресс со всей остротой поставил проблему “человек–машина” [1]. Возникла задача согласования конструкции машин с рабочими характеристиками человека. Оптимизация условий трудовой деятельности возможна лишь при комплексном подходе и проектированию систем “человек – орудие труда – производственная среда” [2].

Изучение и проектирование таких систем обусловили появление новых исследовательских задач.

Во–первых, это задачи, связанные с описанием характеристик человека как компонента автоматизированной системы. Речь идет о процессах восприятия информации, памяти, принятия решений, исследования движений, проблемах мотивации, готовности деятельности, стресса, коллективной деятельности операторов.

С точки зрения обеспечения эффективности деятельности человека важное значение имеют такие факторы, как утомление, монотонность операций, интеллектуальная нагрузка, условия работы, физические факторы окружающей среды, биомеханические и физиологические факторы.

Во–вторых, это задачи проектирования новых средств деятельности, относящихся преимущественно к обеспечению взаимодействия человека и машины. К таким средствам относятся визуальные и слуховые индикаторы, органы управления, специальные входные устройства ЭВМ, новые инструменты и приборы.

В–третьих, это задачи системного характера, связанные с распределением функций между человеком и машиной, с организацией рабочего процесса, а также задачи подготовки, тренировки и отбора операторов.

Уровень автоматизации современного производства обуславливает деятельность оператора, при которой эффективность целенаправленной деятельности во многом определяется скоростью реагирования на производственные сигналы, способностью к быстрой и качественной переработке различных объемов оперативной информации.

В формировании быстродействия основная роль принадлежит оперативной и кратковременной памяти, переключаемости, объему и концентрации внимания, в связи с чем возникает необходимость разрабатывать систему тестов, позволяющих получить количественную оценку перечисленных психофизиологических процессов.

Одной из наиболее подходящих методик для настоящего исследования является методика эксперимента с таблицами Горбова–Шульте [3]. По времени, затраченному на выполнение задания, судят о скорости переключения внимания.

Ф. Д. Горбов предложил сделать таблицы черно–красными [4]. При этом испытуемые должны отыскивать черные цифры в восходящем, а красные– в нисходящем порядке, называя их попарно. Этот метод использован при создании специального устройства– тахистоскопа, позволяющего высветить на табло цифровые обозначения или черно–красные таблицы. При появлении

очередной таблицы испытуемый должен отыскать и назвать нужную пару цифр. Время поиска и сообщения регистрируются устройствами (магнитофон, счетчик времени).

Существует метод, при котором испытуемый, отыскав нужные цифры на металлической таблице прикасается к ним металлическим пером, в результате чего возникает отметка на движущейся ленте самописца.

Для решения данной задачи необходимо разработать веб–приложение, что позволит тестировать оператора на помехоустойчивость.

Актуальность разработки заключается в том, что оно позволит обеспечить более удобный способ ввода и обработки результатов теста, повысить быстродействие, обеспечить автоматизированные вычисление результатов с высокой скоростью, а также надёжное хранение результатов теста.

В процессе изучения данной проблемы было принято решения применить тест “Таблица Горбова – Шульте” и реализовать программный продукт применяя современные средства разработки программного обеспечения: язык программирования C#. Результаты работы системы будут заносится в базу данных, созданную в MS SQL Server 2017.

#### Список литературы

1. Система человек – машина [Электронный ресурс] // URL: [http://www.astronaut.ru/bookcase/books/sharp01/text/24.htm?reload\\_coolmenus](http://www.astronaut.ru/bookcase/books/sharp01/text/24.htm?reload_coolmenus) (дата обращения: 01.08.2020)
2. Человек – орудие труда – производственная среда [Электронный ресурс] // URL: <https://bgdstud.ru/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti--konspekt-lekczij-dlya-studentov/711-ergonomika-i-technicheskaya-estetika.html> (дата обращения: 03.08.2020)
3. *Крылова, А.А.* Практикум по общей, экспериментальной и прикладной психологии / Под. общ. ред. А.А. Крылова, С.А. Маничева. – СПб.: Питер, 2000. – 560 с.
4. Техника красно–черных таблиц Шульте: рекомендации по развитию скорочтения [Электронный ресурс]// URL: <https://geek–tips.github.io/articles/048046317222455004/index.html> (дата обращения: 10.05.2020).

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

А.В. Глазырин, Е.С. Воробьёв  
(г. Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»)

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДИСКРЕТНЫХ И АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ**

### DISCRETE AND ANALOGUE CONVERTERS AT DIGITAL SUBSTATION

*Установка цифровых трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, при реализации цифровых подстанций второй и третьей архитектуры, не всегда целесообразна, из-за их относительно высокой цены. Преобразователи дискретных и аналоговых сигналов устанавливаются на цифровых подстанциях для оцифровки аналоговых сигналов тока и напряжения и дискретных сигналов. В статье сравниваются традиционные и цифровые подстанции, описаны устройства ПДС и ПАС для цифровых подстанций.*

*The installation of digital current transformers and voltage transformers when implementing digital substations of the second and third architecture is not always advisable, because of their relatively high price. Discrete and analog signal converters are installed in digital substations to digitize analog current and voltage signals and discrete signals. The article compares traditional and digital substations, describes DMU and AMU devices for digital substations.*

*Ключевые слова: цифровая подстанция, ПДС, ПАС, GOOSE, SV.  
Keywords: digital substation, DMU, AMU, GOOSE, SV.*

Цифровая подстанция (ЦПС) – это подстанция, на которой внедрена система автоматизации и управления на основе стандартов МЭК 61850. Такая подстанция подразумевает цифровой обмен информацией во вторичных цепях между терминалами релейной защиты и другим оборудованием. Цифровая подстанция позволяет эффективно работать с большими объемами данных. Целью статьи является изложение принципов информационного обмена, возможность применения дополнительного оборудования (преобразователей дискретных и аналоговых сигналов) на ЦПС.

Для осуществления цифрового обмена в информационной среде подстанции используются протоколы стандарта МЭК 61850. MMS-сообщения (протокол МЭК 61850-8-1) служат для сбора данных телесигнализации и телеизмерений и передачи команд телеуправления устройствами подстанции. Протокол МЭК 61850-8-1 так же описывает передачу дискретных сигналов между устройствами РЗА в цифровом виде (GOOSE-сообщений). Передача в SV-потоках оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений описывает протокол МЭК 61850-9-2 [1].

Три степени цифровизации (три архитектуры) определяются глубиной внедрения цифровых протоколов в информационную среду подстанции

(рис. 1) [2]. Первая архитектура представляет собой традиционную подстанцию за исключением того, что для сбора и передачи команд устройствами подстанции используются MMS-сообщения. Вторая архитектура помимо использования MMS-сообщений предполагает взаимодействие между устройствами через GOOSE-сообщения. Третья архитектура подразумевает наибольшую оцифровку информации на всех уровнях подстанции: использование MMS, GOOSE, SV.



Рис. 1. Реализация цифровых протоколов на ПС

Для построения ЦПС второй и третьей архитектуры требуется использование цифровых трансформаторов тока (ЦТТ) и цифровых трансформаторов напряжения (ЦТН). Применение ЦТТ и ЦТН на ЦПС может быть не всегда обосновано в виду их относительно высокой стоимости, по отношению к традиционным ТТ и ТН. При реконструкции некоторых подстанций, где уже установлены ТТ и ТН, возможна нецелесообразность замены (которая должна определяться при проектировании подстанции) их на ЦТТ и ЦТН. Тогда альтернативой выступает использование уже установленных ТТ и ТН с преобразователем аналоговых сигналов (ПАС). А для оцифровки и передачи дискретных сигналов – преобразователя дискретных сигналов (ПДС).

Использование ПАС и ПДС даёт возможность реконструировать существующие традиционные подстанции дешевле, чем с установкой новых ЦТТ и ЦТН. Например, для реконструкции ПС по схеме 5Н «Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий» (рис. 2) необходимо в несколько раз меньше устройств чем при традиционной реализации (таблица 1).

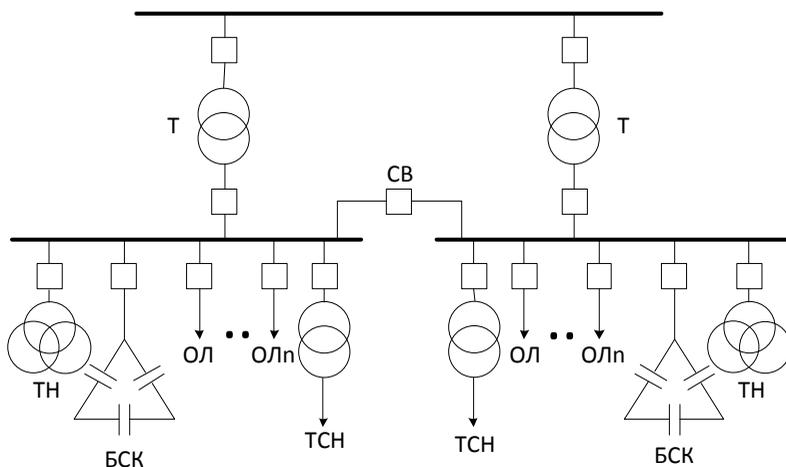


Рис. 2. Схема подстанции «Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий»

Таблица 1. Сравнение технических решений реализации ЦПС

Показатель	Традиционная ПС	ЦПС III архитектуры (MMS, GOOSE, SV)
<b>Количество поставляемого оборудования</b>		
Количество шкафов РЗА	6	2
Общее количество терминалов	≤40	≤50
Количество шкафов АСУ	1	2
<b>Дискретные сигналы</b>		
Количество дискретных связей	значительное	минимальное
Характеристика дискретных связей	значительная длина	минимальная длина
Количество цифровых связей между терминалами	отсутствует	~100%
Дополнительное оборудование для дискретных связей по GOOSE	отсутствует	более десятка единиц
<b>Аналоговые сигналы</b>		
Количество аналоговых связей	значительное	минимальное
Характеристика аналоговых связей	значительная длина	минимальная длина

Применение цифровых протоколов связи позволяет отказаться от аналоговых блоков и уменьшить до минимума количество дискретных блоков, в пользу цифровых портов связи это позволяет существенно уменьшить размеры терминала.

В 2020 году ПАО «ФСК ЕЭС» ввела в действие стандарты [3,4], которые определяют корпоративные требования к типовым шкафам преобразователей

аналоговых сигналов (ШПАС) и шкафам преобразователей дискретных сигналов (ШПДС), выполняемым в соответствии с архитектурами второго и третьего типа. Данный стандарт определяет общие требования к конструктивному исполнению и идентификации шкафов. Эти типовые технические требования должны учитываться всеми организациями, выполняющими работы по созданию, модернизации и проектированию указанных устройств для объектов ПАО «ФСК ЕЭС».

ООО НПП «ЭКРА» г. Чебоксары предоставляет решения по реализации ПАС и ПДС на основе терминалов БЭ2704v750 и БЭ2704v752 соответственно (рис. 3), которые успешно внедрены на цифровых подстанциях (например, ПС Медведевская).



Рис. 3. Задняя панель терминалов БЭ2704v752 и БЭ2704v750

## Вывод

Сравнение традиционной и цифровой подстанции показало относительно меньшее количество устройств на подстанции. Очевидна потребность в разработке и внедрении в опытную эксплуатацию устройств ПДС и ПАС для подстанций, где установка ЦТТ и ЦТН нецелесообразна.

## Список литературы

1. Воробьев, Е.С. Цифровизация энергообъектов: задачи и их решения / Е.С. Воробьев и др. // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалов III Междунар. науч.-техн. конф. / Чуваш. ун-т. – Чебоксары. – 2019.
2. Воробьев, Е.С. Функциональная совместимость устройств рза мультивендорных цифровых подстанций / Е.С. Воробьев и др. // Журнал «Релейная защита и автоматизация». –Чебоксары, 2019.
3. СТО 56947007-29.240.10.301-2020 Типовые шкафы. Шкафы преобразователей дискретных сигналов (ШПДС). ПАО "ФСК ЕЭС". – Москва, 2020.
4. СТО 56947007-29.240.10.300-2020 Типовые шкафы. Шкафы преобразователей аналоговых сигналов (ШПАС) ПАО "ФСК ЕЭС". – Москва, 2020.

*Материал поступил в редколлегию 05.10.20.*

А.А. Глушак

(г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет,  
Институт ядерной физики СО РАН)

**АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ  
АППАРАТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
СУПЕР С-Т ФАБРИКИ**

THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE REGISTERING EQUIPMENT  
OF THE SUPER C-T ELECTROMAGNETIC CALORIMETER

*Описан алгоритм функционирования регистрирующей аппаратуры электромагнитного калориметра, приведен алгоритм обработки сигналов и оценка точности вычисления параметров методом Монте-Карло.*

*The paper describes the algorithm of functioning of the recording equipment of the electromagnetic calorimeter, provides an algorithm for signal processing and estimates the accuracy of calculating parameters by the Monte Carlo method.*

*Ключевые слова: регистрирующая электроника, метод наименьших квадратов, метод минимизации функции  $\chi^2$ , метод Монте-Карло.*

*Keywords: the registering electronics, the method of least squares, the minimization method of the function  $\chi^2$ , Monte Carlo method.*

В настоящее время в Институте ядерной физики (ИЯФ СО РАН) ведется работа над проектом нового ускорительно-накопительного комплекса Супер с-т фабрика [1]. Для данного проекта был выбран ряд новых технических решений, в частности использование быстрых неорганических кристаллов CsI в калориметре. Использование быстрых кристаллов позволяет снизить вероятность наложения фонового и полезного сигнала, но в то же время требует создания новой регистрирующей аппаратуры для работы с быстрыми сигналами.

Структура регистрирующей аппаратуры электромагнитного калориметра представлена на рис. 1. Световые импульсы с кристаллов CsI с помощью фотоприемников и зарядочувствительных предусилителей (ЗЧУ), расположенных непосредственно на кристаллах, преобразуются в электрические импульсы, которые далее поступают в платы формирователей-оцифровщиков-анализаторов (ФОА). Платы ФОА содержат формирующие усилители для усиления и формирования сигналов симметричной формы, аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифровые процессоры для вычисления характеристик сигналов (амплитуда, время появления и параметр качества аппроксимации) (рис. 2) [1].

После этого, данные с плат ФОА поступают в плату коллектора электромагнитного калориметра. Его основной задачей является

формирование пакетов и их передача данных по оптическому интерфейсу в систему сбора данных детектора (ССД).

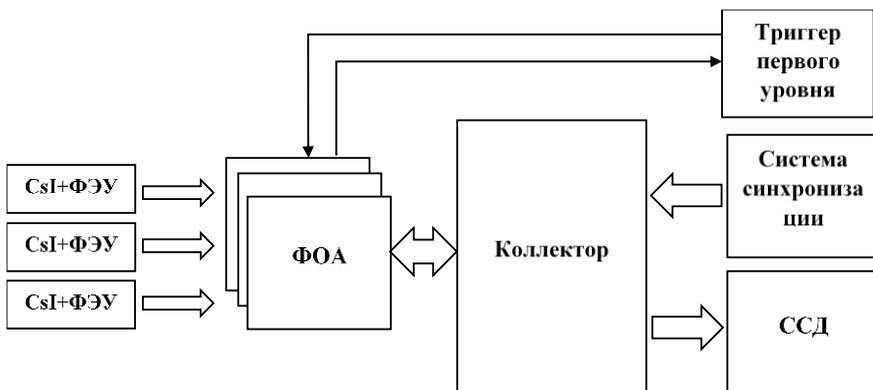


Рис. 1. Структура регистрирующей электроники калориметра

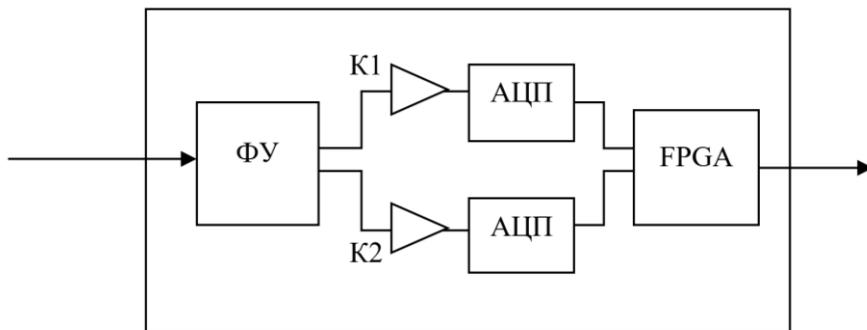


Рис. 2. Блок-схема платы ФОА. ФУ – формирующий усилитель; АЦП – аналогово-цифровой усилитель; FPGA – программируемая пользователем вентильная матрица; К1, К2 – усилители с разными коэффициентами усиления

**Целью работы** является разработка регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с-т фабрики. Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создание прототипа регистрирующего электронного тракта калориметра;

2. Отладка работы прототипа;

3. Создание итоговой регистрирующей электроники калориметра.

Первая задача разбивается на следующие **подзадачи**:

1. Разработка печатной платы модуля сбора данных.

2. Разработка алгоритма работы модуля сбора данных и его реализация в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС, FPGA).
3. Разработка печатной платы коллектора.
4. Создание алгоритма работы коллектора и его реализация в ПЛИС.
5. Организация системы передачи данных между модулями сбора данных и коллекторами.

В 2019 году была рассчитана и промоделирована работа формирующей части платы прототипа модуля сбора данных. С начала 2020 года ведется работа по разработке алгоритма обработки выходного сигнала формирующего усилителя и его реализация в FPGA.

Блок-схема обработки данных в FPGA представлена на рис. 3. Оцифрованные сигналы формирующего усилителя в последовательном виде поступают на вход FPGA, где в начале они десериализуются (преобразуются из последовательного вида в параллельный), а затем записываются в кольцевой буфер. По приходу сигнала триггерной системы, блок управления данными проверяет сигнал готовности (сигнал Ready) обрабатывать данные блоком DSP (блок цифровой обработки данных), генерирует адреса, по которому записаны советующие данные. По этим адресам с кольцевого буфера данные сначала проходят фильтрацию (отбираются сигналы выше порогового значения), а затем они обрабатываются в блоке DSP. После этого характеристики сигнала (амплитуда, пьедестал и параметр качества подгонки) формируются в кадр в упаковщике и отправляются по волоконно-оптической линии в коллектор [2].

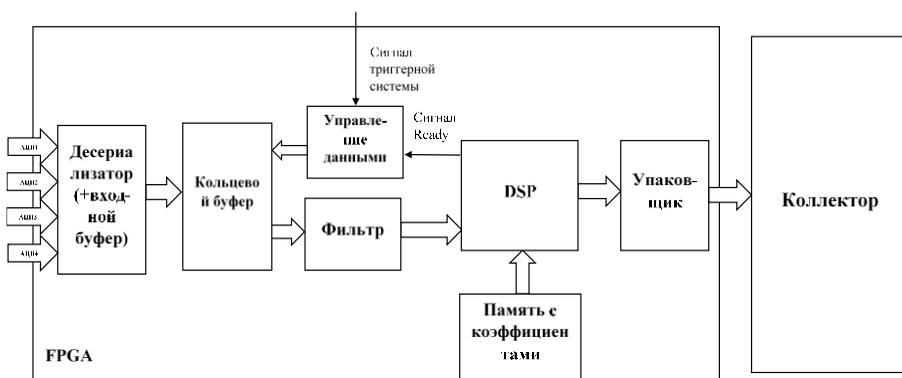


Рис. 3. Блок-схема проекта обработки сигналов в FPGA

Сигналы в блоке DSP обрабатываются с помощью коэффициентов, вычисленными по методу наименьших квадратов. Алгоритм обработки сигналов представлен с помощью формул (1-3). Оценка качества подгонки рассчитывается как сумма квадратов из-за ошибки (параметр SSE) по формуле (4).

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - (AF(t_i - t_0) + P))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$AF(t_i - t_0) = AF(t_i) + F'(t_i)\Delta tA = AF(t_i) + F'(t_i)B, \quad (2)$$

$$A = \sum a_i y_i, B = \sum b_i y_i \Rightarrow t_0 = \frac{-B}{A}, P = \sum p_i y_i. \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - AF(t_i - t_0) - P)^2, \quad (4)$$

где  $y_i = AF(t_i - t_0) + P$  – величина выборки;  $A$  – амплитуда,  $P$  – пьедестал,  $t_0$  – время появления сигнала относительно сигнала триггерной системы;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $p_i$  – коэффициенты, которые записаны в блок памяти FPGA.

Алгоритм вычисления параметров аппроксимирующей функции  $F$  был реализован в пакете MATLAB (студенческая версия), оценена точность определения амплитуды, пьедестала и времени появления по методу Монте-Карло [3]. Требуемая точность для диапазона амплитуд входного сигнала от 120 мВ до 2 В составляет 0,001. В случае незашумленного сигнала вычисленная точность составила 0,0125 В, в случае зашумленного – 0,0134 В.

После этого был выполнен поиск массивов коэффициентов  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $p_i$ . Эти коэффициенты определялись из того, какой вклад в сумму соответствующего коэффициента (4) они могут дать. После определения коэффициентов была определена точность вычисления параметров  $A$ ,  $B$ ,  $P$ . Точность вычисления получилась около 0,01.

Таким образом, в данной работе описана структура функционирования регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с-т фабрики, приведен алгоритм обработки сигналов и оценка точности вычисления параметров аппроксимирующей функции методом Монте-Карло. На данный момент идет реализация алгоритма обработки сигналов в FPGA.

### Список литературы

1. *Анашин, В.В.* Супер Чарм – Тау фабрика. Концептуальный проект. Часть 1 (физическая программа, детектор) / В.В. Анашин, А.В. Анисёнков, В.М. Аульченко и др. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2018. – 136 с.
2. *Аульченко, В.М.* Структура и алгоритм функционирования аппаратуры многоканального кристаллического калориметра для работы при больших нагрузках / В.М. Аульченко, В.Н. Жилич, В.В. Жуланов и др. // Автометрия. – Т. 51. – №1. – Новосибирск, 2015. – С.39-47.
3. *Семенов, К.К.* Достоверность результатов применения метода Монте-Карло в задачах интервального анализа / К. К. Семенов // Вычислительные технологии. – Т.21. – №2. – ИВТ СО РАН, 2016. – С. 42-52.

*Материал поступил в редколлегию 07.10.20.*

Д.В. Залялов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **ВЫБОР МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НОМЕРОВ**

### SELECTION OF APPROACHES TO RECOGNITION OF CAR NUMBERS

*Выполнен анализ существующих методов и алгоритмов, которые могут использоваться в системах распознавания автомобильных номеров. Приведены рекомендации по выбору оптимальных алгоритмов.*

*This paper analyzes the existing methods and algorithms that can be used in license plate recognition systems. Recommendations for choosing the optimal algorithms are given.*

*Ключевые слова: автоматическое распознавание, локализация, нормализация, сегментация, синтаксический анализ.*

*Keywords: automatic recognition, localization, normalization, segmentation, syntactic analysis.*

Поиск и распознавание автомобильного номера можно свести к последовательному выполнению пяти шагов [1]: локализация, нормализация, сегментация, распознавание и синтаксический анализ. У каждого такого шага есть несколько устоявшихся реализаций. Произведем обзор методов и алгоритмов, которые предпочтительнее всего использовать для разработки систем распознавания. Выбор предполагается производить на основе точности, скорости работы, а также на лучших практиках использования.

Для локализации, то есть поиска номера можно использовать метод Виолы – Джонса, либо контурный анализ.

В методе Виолы–Джонса основным является:

1. Интегральное представление изображения по признакам Хаара.
2. Принцип сканирующего окна.
3. Построение классификатора на основе алгоритма AdaBoost.
4. Построение каскадного классификатора.

Все это позволяет осуществлять поиск объекта в режиме реального времени.

Признаки Хаара представляют собой отображение изображения во множество смежных прямоугольных областей.

На этапе обнаружения заданной области используется сканирующее окно, которое перемещается по изображению.

Процесс его работы можно описать как:

1. Фиксируется размер окна  $W \times H$ .
2. Определяется  $W_{max}, H_{max}, SF$  (scale factor, параметр увеличения окна).
3. Пока  $W \leq W_{max}$  или  $H \leq H_{max}$ :
  - 3.1. Окно проходит по всему изображению.
  - 3.2. Для каждого его положения рассчитываются признаки.
  - 3.3.  $W = W * SF, H = H * SF$ .
4. Делается вывод о том, где находится искомый объект.

Для оптимизации большого количества операций по расчету признаков Хаара вводится понятие интегрального представления изображения и являет собой матрицу размером с исходное изображение. В каждом элементе матрицы хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и выше данной ячейки. Элементы матрицы вычисляются по формуле:

$$L(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{i < x, j < y} I(x, y),$$

где  $I(x, y)$  – яркость пикселя исходного изображения.

Наличие или отсутствие искомого предмета в окне определяется разницей между обучаемым порогом и значением признака.

Для вычисления значения конкретного признака, необходимо:

1. Сложить яркости пикселей изображения в первой и второй группах прямоугольных областей.
2. Вычесть из первой полученной суммы вторую.

Полученная разность и есть значение конкретного признака Хаара.

Для выбора признаков, лучше всего подходящих для исходного изображения, используется алгоритм адаптивного бустинга, при помощи которого выбираются примитивы больше всего подходящие для изображения.

Далее, из найденных слабых классификаторов можно составить каскад, являющийся набором сильных классификаторов, через которые последовательно проходит проверяемое изображение.

Контурный анализ, в свою очередь, посвящен обработке изображения на основе методов и алгоритмов по нахождению контуров объектов и работе с границами объектов на изображении.

Рекомендуется использовать метод Виолы – Джонса для локализации, в виду его большой точности и относительно неплохой скорости обработки кадра.

На следующем этапе происходит нормализация изображения. Она состоит из двух важных шагов:

1. Исправления искажений перспективы – углы рамки номера становятся прямыми в своей системе координат. Данный шаг чаще всего реализуется с помощью перспективных преобразований.

2. Выравнивание изображения таким образом, чтобы ориентация номера совпала с осями глобальной системы координат.

Метод выравнивания, в свою очередь, состоит из нескольких этапов [2]:

1. Определение границ.
2. Определение прямых линий.
3. Определение наиболее интенсивных линий.
4. Вычисление угла между найденной линией и центром.
5. Поворот изображения на найденный угол.

Для сегментации отлично подойдет контурный анализ из-за своей простоты и точности выделения символов.

Для распознавания полученных символов можно использовать готовые OCR библиотеки, которые чаще всего совмещают в себе высокую скорость работы, легкую настройку и хорошие результаты распознавания или можно заняться обучением собственной нейронной сети.

### Список литературы

1. *Кирпичников, А.П.* Автоматическое распознавание автомобильных номеров. / А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, А.В. Обухов, М.П. Шлеймович. // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2015. – Т.18. – №4. – С. 218 – 222.
2. *Обухов, А.В.* Методы автоматического распознавания автомобильных номеров / А.В. Обухов, С.А. Ляшева, М.П. Шлеймович // Вестник Чувашского университета. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – №3. – С. 201 – 208.

*Материал поступил в редколлегию 11.10.20.*

С.А. Зарайский, А.А. Конюхов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ ДЛЯ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ОСТАТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**MOBILE ROBOT CONTROL SYSTEM FOR A SECURITY SYSTEM BASED  
ON RESIDUAL NEURAL NETWORKS**

*Целью исследования является разработка системы управления мобильным роботом для системы безопасности здания с использованием глубоких остаточных нейронных сетей. Приведены результаты распознавания «посторонних предметов» мобильным роботом для безопасности здания.*

*The aim of the research is to develop a mobile robot control system for building security systems using deep residual neural networks. The results of recognition of "foreign objects" by a mobile robot for building security are presented.*

*Ключевые слова: мобильные роботы, топология Residual Networks, остаточные нейронные сети, топология.*

*Keywords: mobile robots, topology of Residual Networks, residual neural networks, topology.*

Роботы для обеспечения безопасности зданий относятся к роботам для профессионального использования сервисной робототехники и имеют подтип для спасения и обеспечения безопасности. Робот должен без участия человека идентифицировать свое местоположение на маршруте патрулирования, осуществлять управление своим движением по маршруту и распознавать препятствия и предметы на изображениях, полученных с помощью видеокамеры (выявлять на изображениях людей, посторонние предметы типа коробки, сумки, задымление и т.д.). Это направление интенсивно развивается, но реализованные системы далеки от совершенства, а технологии реализации представляют коммерческую тайну.

В разрабатываемой системе управления задачи ориентации в пространстве решаются путем семантического анализа изображения и сегментирования поверхностей, пригодных для беспрепятственного передвижения мобильного робота по маршруту патрулирования, т.е. выделения пола, стен, дороги, тротуара, газона и других поверхностей.

Решение задачи обнаружения опасностей в разрабатываемой системе построено также на семантическом анализе и представляет собой сегментирование объектов на изображении, относящихся к классу опасных объектов (люди, коробки, сумки, чемоданы и т.д.).

Основной проблемой при решении поставленных задач в системе управления роботом является сложность в семантическом понимании сцены на получаемых изображениях, поскольку даже человек не всегда может точно и правильно распознать все объекты на изображении, поскольку использует различные признаки.

Ставилась задача исследования возможности реализации системы управления мобильным роботом с использованием библиотеки для языка программирования Python – Tensorflow [1-2].

Для решения задачи ориентации в пространстве (перемещение по маршруту патрулирования) и обнаружения опасных объектов (человека и посторонних предметов) в сегментах наблюдаемого пространства для систем управления роботами в системах безопасности зданий исследовался метод семантического понимания изображения, реализованный на алгоритмах и моделях машинного обучения остаточной нейронной сети. Для реализации остаточных глубоких нейронных сетей использовалась модель DeepLab-ResNet [3-7]. Модель ResNet101 обучена на наборе данных ImageNet 2012, состоящего из 1.28 миллионов изображений тренировочной выборки и 50 тысяч изображений для тестирования полученной модели. Данная модель способна различать до 1000 классов.

Построение остаточной нейронной сети - это процесс настройки параметров и череда попыток получить лучший результат.

В результате такой конструкции Res-блок учит, как входной сигнал  $x$  отличается от  $F(x)$ . Поэтому, если на некотором слое сеть уже достаточно хорошо аппроксимировала исходную функцию, порождающую данные, то на дальнейших слоях оптимизатор может в Res-блоках делать веса близкими к нулю, и сигнал будет почти без изменений проходить по shortcut-соединению. В некотором смысле можно сказать, что CNN сама определяет свою глубину.

На рис. 1 показано результирующее изображение после работ по подготовке данных для обучения, полученное после выделения классов на изображении, их описания, добавления в класс подклассов, если таковые имеются. Итог выполнения - файлы аннотаций в формате XML, использующиеся для последующего описания модели.

На рис. 2 показана пример результата работы модуля распознавания - это исходное изображение, полученное с камеры, результаты распознавания препятствий и посторонних предметов на полученном изображении, а также их наглядное сравнения для показа точности распознавания.

Модель ResNet101 проходит по всему изображению маской 224x224 пикселя и составляет описания для областей, в которых находятся объекты. Пример кадра из тестовой выборки показан на рис. 3.



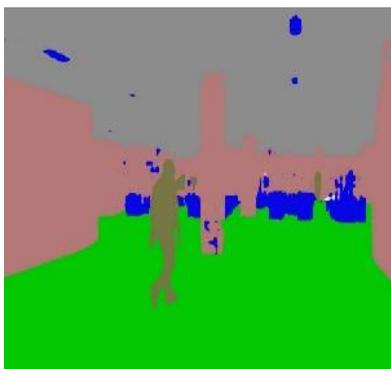
*Рис. 1. Изображение с выделением объектов классов и их частей*



*Рис. 2. Результаты работы модуля распознавания препятствий на изображении*



*Рис. 3. Пример изображения для распознавания объектов на ранее обученной модели*



*Рис. 4. Пример результата распознавания – выделение фигуры человека*

Результат решения задачи ориентации мобильного робота в пространстве (определение траектории перемещения по маршруту патрулирования) и обнаружения опасных предметов методом семантического понимания изображения с помощью остаточной нейронной сети представлен на рис. 4.

Программа выполняется последовательно: в первую очередь, загружается модель – создается объект модели и подгружаются веса связей нейронов, полученных на этапе обучения модели. Далее загружается кадр изображения, анализ которого будет проводиться. После этого запускается метод его обработки и выдается результат, который сохраняется в ранее определенную директорию.

### **Заключение**

Точность распознавания объектов составила 94% - это очень хороший результат (подвижные объекты обнаруживаются на 100%). Модель на основе остаточных нейронных сетей может использоваться в системе управления мобильным роботом для ориентации на маршруте патрулирования и для обнаружения опасных предметов в системах безопасности зданий. Для

применения данной системы управления требуется провести мобильный робот по маршруту патрулирования в условиях охранного освещения, отсутствия людей и предметов. Далее требуется проконтролировать правильность идентификации объектов по маршруту патрулирования. Далее провести тестирование мобильного робота на людях и обнаружение посторонних предметов.

К недостаткам системы управления на основе остаточных нейронных сетей можно отнести то, что для её подготовки, обучения и реализации требуются высокие вычислительные мощности. Система может в условиях слабого освещения не обнаруживать неподвижные «опасные предметы» типа коробки, чемодана и т.д., если цвета этих предметов близки к цветам фона.

Для повышения качества выполнения функций, возложенных на охранной робот в системе безопасности здания, возможно расширение функционала системы управления трэкингом (слежением) за обнаруженными объектами-угрозами и функционала детектирования лица на полученном изображении или сохранением лица в базу данных для последующего анализа.

#### Список литературы

1. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными: пер. с англ. - СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. - 480с.

2. TensorFlow Guide | TensorFlow Core | TensorFlow [Электронный ресурс]. –URL: <https://www.tensorflow.org/guide> (дата обращения 05.03.2020)

3. Обзор топологий глубоких нейронных сетей / Блог компании Mail.ru Group / Хабр [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/company/mailru/blog/311706/> (дата обращения 05.03.2020).

4. ResNet: остаточная CNN для классификации изображений [Электронный ресурс]. – URL: <https://neurohive.io/ru/vidy-nejrosetej/resnet-34-50-101/> (дата обращения 05.03.2020).

5. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf> (дата обращения 05.03.2020).

6. Review: ResNet—Winner of ILSVRC 2015 (Image Classification, Localization, Detection) [Электронный ресурс]. – URL: <https://towardsdatascience.com/review-resnet-winner-of-ilsvrc-2015-image-classification-localization-detection-e39402bfa5d8> (дата обращения 05.03.2020).

7. LabelMe. The Open annotation tool [Электронный ресурс]. – URL: <http://labelme.csail.mit.edu/Release3.0/> (дата обращения 05.03.2020).

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

В.Ф. Зотин

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МИКРОСХЕМ ДРАЙВЕРОВ ПЛАЗМЕННЫХ  
И ВАКУУМНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДИСПЛЕЕВ**

**CONTROL OF DYNAMIC PARAMETERS OF PLASMA  
AND VACUUM-LUMINESCENT DISPLAY DRIVERS**

*Разработана схема устройства для контроля динамических параметров микросхем драйверов плазменных и вакуумно-люминесцентных дисплеев. Предложен вариант конструктивного оформления устройства для испытания микросхем с применением климатической микрокамеры.*

*A device diagram for monitoring dynamic parameters of driver chips for plasma and vacuum-luminescent displays has been developed. A variant of the design of a device for testing microchips using a climate microchamber is proposed.*

*Ключевые слова: динамические параметры, микросхемы драйверов, плазменные дисплеи, климатическая микрокамера.*

*Keywords: dynamic parameters, driver chips, plasma displays, climate microchamber.*

Для управления плазменными и вакуумно-люминесцентными дисплеями применяются CMOS-микросхемы высоковольтных драйверов. К таким изделиям относятся микросхемы  $\mu$ PD16305 и  $\mu$ PD16337 [1, 2], разработанные фирмой NEC, и их аналоги.

На рис. 1 приведена функциональная схема микросхемы  $\mu$ PD16305. Она содержит 40-битный реверсивный сдвиговый регистр с информационными входами/выходами  $A$  и  $B$ , тактовым входом  $CLK$ , входом управления направлением сдвига  $R/L$  и входом асинхронного сброса  $/CLR$ .

Выходы сдвигового регистра сигналом  $/STB$  подключаются к регистру-защёлке. Высоковольтные CMOS-ключи с выходами  $O1...O40$  устанавливаются в состояние, определяемое регистром-защёлкой, или по сигналу бланкирования  $BLK$  в состояние, определяемое сигналом  $/PC$ .

Наряду со статическими параметрами производитель устанавливает контроль следующих динамических параметров микросхемы  $\mu$ PD16305 [1]:

- $t_{PHL1}, t_{PLH1}$  – задержка распространения сигналов  $CLK \rightarrow A/B$ ;
- $t_{PLH2}$  – задержка распространения сигналов  $CLR \rightarrow A/B$ ;
- $t_{PHL3}, t_{PLH3}$  – задержка распространения сигналов  $CLK \rightarrow On$ ;
- $t_{PHL4}, t_{PLH4}$  – задержка распространения сигналов  $STB \rightarrow On$ ;
- $t_{PHL5}, t_{PLH5}$  – задержка распространения сигналов  $BLK \rightarrow On$ ;
- $t_{PHL6}, t_{PLH6}$  – задержка распространения сигналов  $PC \rightarrow On$ ;
- $t_{TLH}$  – время нарастания сигнала  $On$ ;

-  $t_{THL}$  – время спада сигнала *On*.

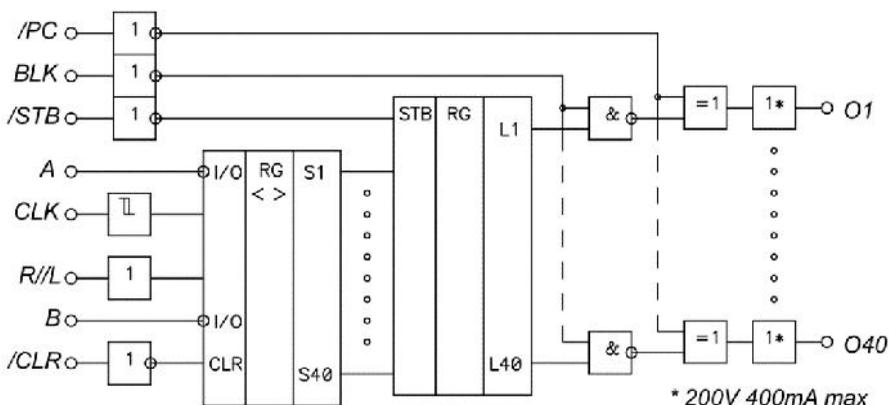


Рис. 1. Функциональная схема микросхемы  $\mu PD16305$

Для контроля указанных динамических параметров предлагается использовать устройство, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

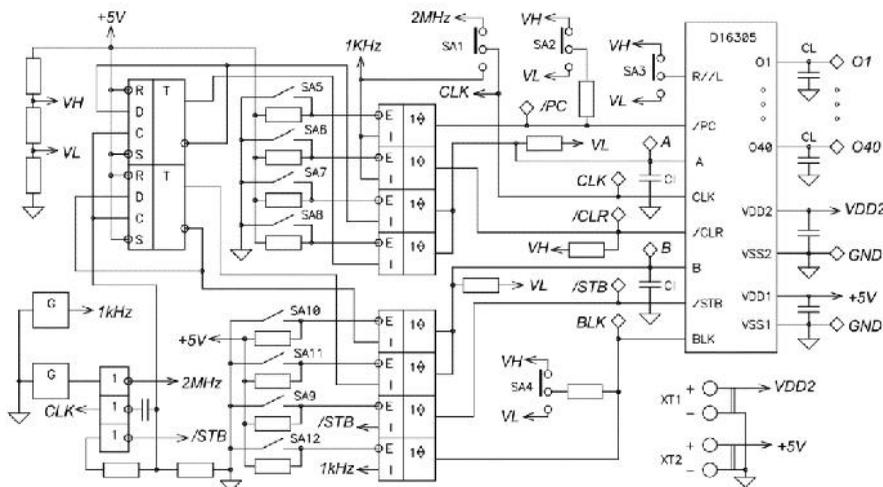


Рис. 2. Принципиальная схема устройства контроля динамических параметров микросхемы  $\mu PD16305$

Основными элементами схемы являются два модуля опорных генераторов меандра с частотами 1 кГц и 2 МГц, два Т-триггера, восемь повторителей с тремя состояниями выхода и комплект переключателей SA1 –

SA4 и выключателей SA5 – SA12. По условиям испытаний выходы O1 – O40 и A, B имеют ёмкостную нагрузку, соответственно CL=50 пФ и CI=15 пФ.

Функционирование устройства обеспечивается при подключении внешних источников электропитания напряжением VDD1 (допустимый диапазон 4,5...5,5 В) для логической части микросхемы и напряжением VDD2 (30...180 В) для высоковольтной части микросхемы. Статические входные сигналы для испытуемой микросхемы имеют следующие уровни: низкий уровень  $V_L=0,2 \cdot VDD1$ ; высокий уровень  $V_H=0,8 \cdot VDD1$ .

Измерение динамических параметров осуществляется с помощью двухканального цифрового осциллографа с полосой пропускания не менее 100 МГц. Щупы осциллографа подключаются к контрольным точкам, обозначенным на схеме рис. 2.

Схема и режим измерения конкретного динамического параметра формируются с помощью переключателей SA1 – SA4 и выключателей SA5 – SA12 установкой уровней входных сигналов согласно табл. 1. Параметры  $t_{TLH}$  и  $t_{THL}$  определяются в рамках выполнения тестов  $CLK \rightarrow On$ ,  $BLK \rightarrow On$  или  $PC \rightarrow On$ .

Таблица 1. Уровни входных сигналов

Тест	CLK	R/L	A	B	STB	BLK	PC	CLR
$CLK \rightarrow B$	P=2МГц	VH	P=1МГц	–	VL	VH	VH/VL	VH
$CLK \rightarrow A$	P=2МГц	VL	–	P=1МГц	VL	VH	VH/VL	VH
$CLR \rightarrow B$	P=2МГц	VH	VL	–	VL	VH	VH/VL	P=1кГц
$CLR \rightarrow A$	P=2МГц	VL	–	VL	VL	VH	VH/VL	P=1кГц
$CLK \rightarrow On$	P=1кГц	VH	P=0,5кГц	–	VL	VL	VL	VH
$STB \rightarrow On$	P=1кГц	VH	P=0,5кГц	–	↓1кГц	VL	VL	VH
$BLK \rightarrow On$	P=2МГц	VH	VL	–	VL	P=1кГц	VH	VH
$PC \rightarrow On$	P=1кГц	VH	VL	–	VL	VH	P=1кГц	VH

С помощью реализованного по схеме рис. 2 макета получены, в частности, следующие результаты измерения динамических параметров опытного образца аналога микросхемы  $\mu PD16305$  с применением осциллографа Hantek DS05202P (200MHz, 1GSa/s) при  $VDD1 = 5$  В,  $VDD2 = 60$  В.

$CLK \rightarrow B$ :  $t_{PHL1} = 62$  нс;  $t_{PLH1} = 64$  нс

$CLR \rightarrow B$ :  $t_{PLH2} = 63$  нс

$CLK \rightarrow A$ :  $t_{PHL1} = 62$  нс;  $t_{PLH1} = 63$  нс

$CLR \rightarrow A$ :  $t_{PLH2} = 65$  нс

$CLK \rightarrow O1$ :  $t_{PHL3} = 102$  нс;  $t_{PLH3} = 103$  нс;  $t_{THL} = 48$  нс;  $t_{TLH} = 46$  нс

$CLK \rightarrow O20$ :  $t_{PHL3} = 102$  нс;  $t_{PLH3} = 103$  нс;  $t_{THL} = 44$  нс;  $t_{TLH} = 44$  нс

$STB \rightarrow O1$ :  $t_{PHL4} = 105$  нс;  $t_{PLH4} = 102$  нс

$STB \rightarrow O20$ :  $t_{PHL4} = 97$  нс;  $t_{PLH4} = 101$  нс

$BLK \rightarrow O1$ :  $t_{PHL5} = 92$  нс;  $t_{PLH5} = 91$  нс

$BLK \rightarrow O20$ :  $t_{PHL5} = 88$  нс;  $t_{PLH5} = 88$  нс

$PC \rightarrow O1$ :  $t_{PHL6} = 87$  нс;  $t_{PLH6} = 84$  нс

$PC \rightarrow O20$ :  $t_{PHL6} = 83$  нс;  $t_{PLH6} = 80$  нс

Принципиальная схема макета позволяет реализовать тесты, не включённые в табл. 1, с применением инверсных сигналов, в том числе подаваемых на входы *A* и *B* испытуемой микросхемы.

Для контроля динамических параметров в широком диапазоне температур разработан модифицированный макет. Конструктивно он выполнен в виде модуля цилиндрической формы с печатными платами, расположенными в основаниях модуля.

На одной плате расположено контактное устройство, в которое устанавливается испытуемая микросхема, элементы ёмкостной нагрузки и блокировочные конденсаторы. На другой плате (рис. 3) размещены остальные компоненты схемы рис. 2, включая винтовые клеммники XT1, XT2 для присоединения внешних источников постоянного напряжения, выводы контрольных точек для подключения осциллографа, движковые переключатели SA1 – SA4 и DIP-выключатели SA5 – SA12 для формирования схемы и выбора режима тестирования.

Габаритные размеры и конструкция модуля обеспечивают размещение контактного устройства с установленной в нём испытуемой микросхемой в климатической микрокамере.

Изложенные принципы легли в основу разработки аналогичного устройства для контроля динамических параметров микросхемы  $\mu$ PD16337 и её аналогов.

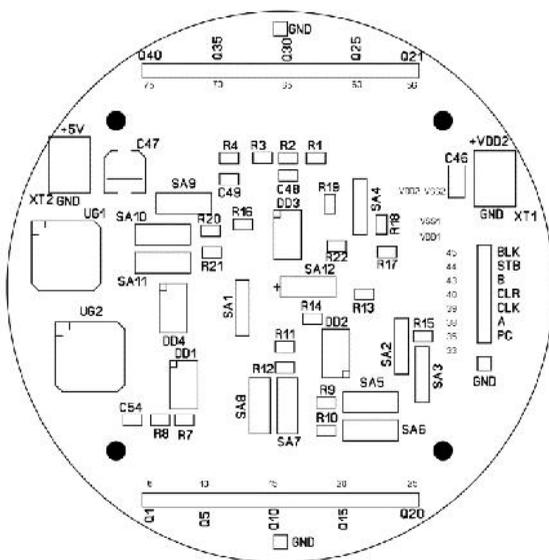


Рис. 3. Внешний вид платы макета

### Список литературы

1. MOS integrated circuit  $\mu$ PD16305GF. 40-bit Row Driver for AC-PDP. – Электронный ресурс. – URL: <https://datasheet.octopart.com/UPD16305GF-3L9-NEC-datasheet-109172.pdf> (дата обращения 05.10.2020).
2. MOS integrated circuit  $\mu$ PD16337. 64-bit AC-PDP Driver. – Электронный ресурс. – URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/6821/NEC/UPD16337.html> (дата обращения 05.10.2020).

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Д.А. Игнатъев, А.Л. Михайлов

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ РРЛ-22 И ИНТЕГРАЦИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ ТМ СТН-3000**

### **DIGITALIZATION OF THE COMMUNICATION SYSTEM**

*Связи с ужесточением требований по качеству технологической связи и систем телемеханики с одновременным увеличением количеством применяемых каналов связи, телемеханики, телеизмерения, телеуправления, а также сетей передачи данных с использованием существующих и эксплуатируемых мачт радиорелейной связи является основной задачей данного исследования. В работе показаны проблемные вопросы замены устаревшего аналогового радиорелейного и телемеханического оборудования на примере РРС-22 на современное оборудование. В итоге мы получаем решение задач, которое позволяет повысить надежность линии связи.*

*Connection with the tightening of requirements for the quality of technological communication and telemechanics systems with a simultaneous increase in the number of used communication channels, telemechanics, telemetry, telecontrol, as well as data transmission networks using existing and operated radio relay communication masts is the main task of this study. The paper shows the problematic issues of replacing outdated analog radio relay and telemechanical equipment on the example of RRS-22 with modern equipment. As a result, we get a solution to problems, which allows us to increase the reliability of the communication line.*

*Ключевые слова: канал связи, радиорелейная связь, аналоговое оборудование, телемеханика.*

*Keywords: communication channel, radio relay communication, analog equipment, telemechanics.*

РРЛ-22 - аналоговая радиорелейная линия связи вдоль газопровода Уренгой-Ужгород. Данная РРЛ предназначена для организации аналоговых каналов автоматики, линейной ТМ, УКВ-связи, телесигнализации и др.

В 2020г. на базе РРЛ-22 были организованы цифровые каналы Е-1 для передачи данных.

СТН-3000 – система телемеханики, предназначенная для автоматизации территориально распределенных объектов магистральных газопроводов. Основными структурными единицами системы являются:

- Контролируемый пункт (КП) телемеханики.
- Пункт управления (ПУ).
- Комплект средств связи.

- Контрольно-измерительные приборы.

Для системы телемеханики выделен отдельный аналоговый служебный канал РРЛ-22. Оборудование радиосвязи располагается в блок-боксах КПТМ и блок-контейнерах радиорелейных станций существующей РРЛ-22.

Старые антенны базовых станций ТМ были заменены антеннами типа DB224, показанной на рис. 1, а старые антенны линейных станций - на антенны типа АС-02.

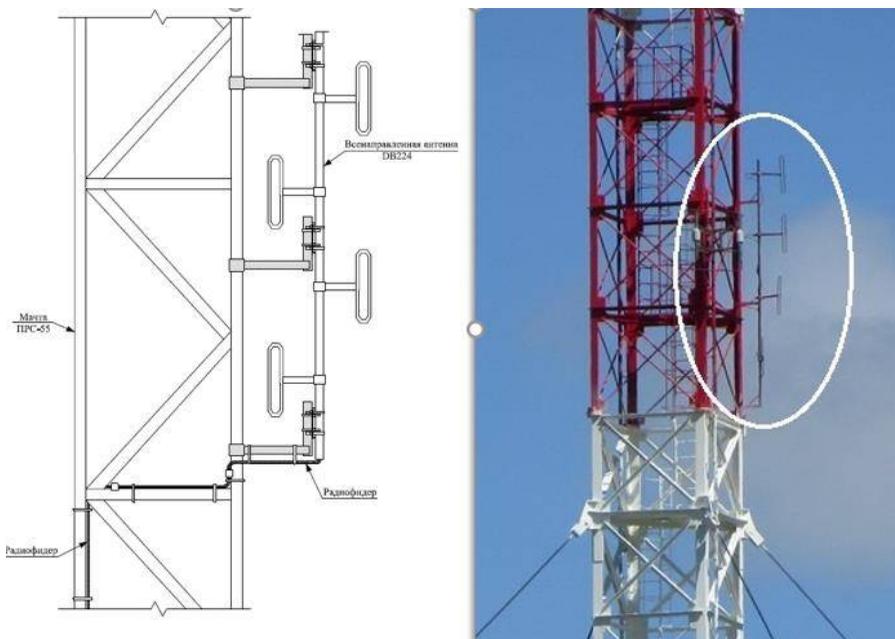


Рис. 1. УКВ антенна DB224 для системы ТМ

Связь между базовыми станциями и КП осуществляется с помощью радиоканалов, организованных на базе радиомодемов Integra-TR. Связь между базовой станцией и РРС организована на базе модемов Raymar telenetics Flashpoll DSP-9612 по существующим ТЧ-каналам РРЛ-22, принцип прохождения сигналов по которой показан на рис. 2. Связь между базовой станцией и компрессорной станцией организована по физической паре медно-жильного кабеля посредством модемов E2DSL Моха.

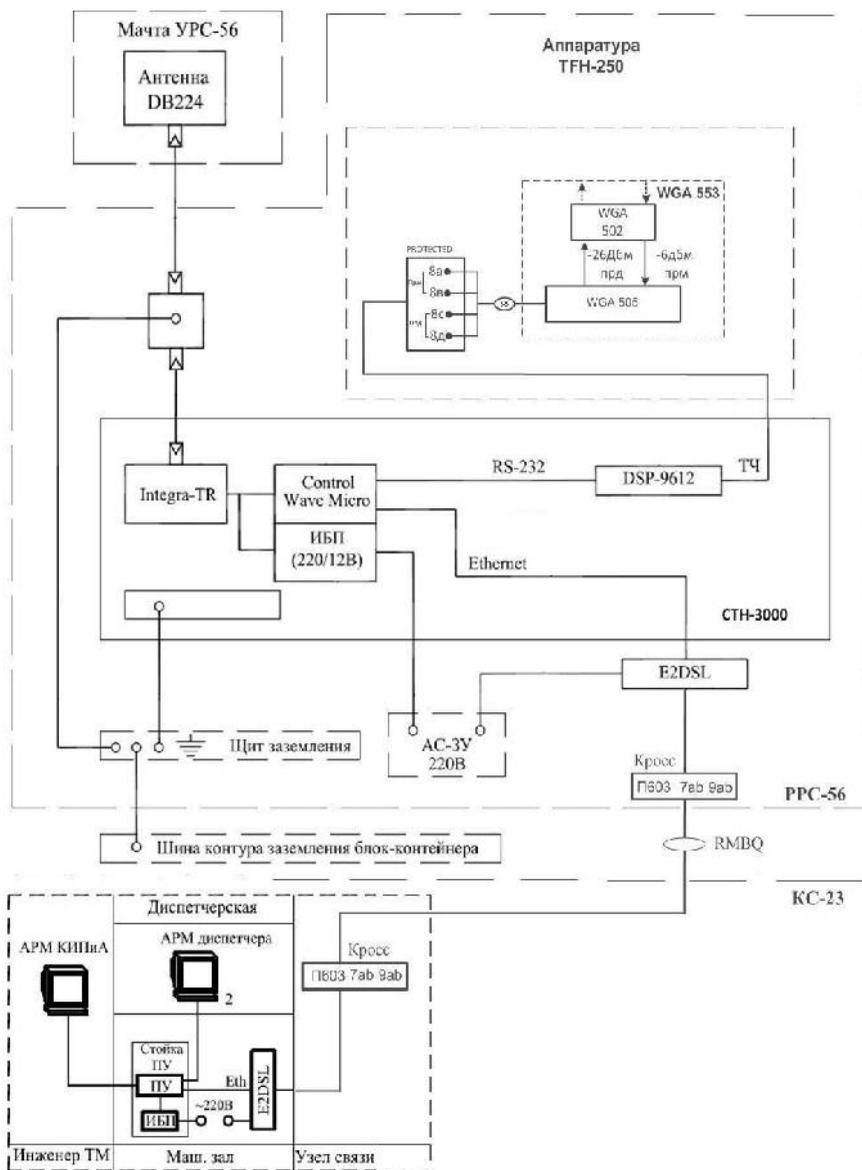


Рис. 2. Схема прохождения сигналов КП ТМ на участках PPC56 – KC23

Связь между модемами E2DSL Мохы, расположенных на PPC 56 и узле связи осуществляется по симметричной паре кабеля RMBQ 10x4x0,9 длиной

2,363 км. Соединение модема DSP-9612 с аналоговым служебным каналом ПРС РРЛ-22 осуществляется кабелем марки КМС 1x2x0,5.

Устройство Integra-TR представляет собой высокоскоростной радиомодем, разработанный специально для использования в составе АСУТП, радиосетей обмена телеметрической информацией и управления телемеханическими устройствами.

Настройка Integra-TR производится через основной COM-порт ПК. Программное обеспечение Integra-TR – это программное обеспечение для диагностики и настройки беспроводного модема Dataradio Integra-TR. Программное обеспечение позволяет пользователю редактировать и программировать доступные пользователю установки, интерактивно модернизировать модем и радиочастотные параметры.

MOXA IEX-402-SHDSL - управляемый Ethernet удлинитель начального уровня с одним 10/100BaseT (X) и одним DSL портом. Устройство поддерживает скорость передачи данных до 15,3 Мбит, а на больших расстояниях - до 8 км. MOXA IEX-402-SHDSL предназначена для использования в жестких условиях эксплуатации, имеет DIN крепление, широкий диапазон рабочих температур (от -40 до 75 ° C), и сдвоенное входное питание, что делают эти устройства идеальным для установки в промышленных приложениях.

Raymar Telenetics FlashPoll DSP-9612 – это промышленные модемы для выделенных линий, которые работают в схемах “точка - точка”, “точка – много точек на одной линии связи”. Модемы работают в режиме полного дуплекса по 4-м проводам и полудуплекса по 2-м проводам на выделенных медных линиях (до 26 км) или на каналах тональной частоты.

Для повышения надежности пункта управления в состав системы включены средства диагностики, позволяющие выполнять мониторинг работоспособности программно-технических средств. На специальном видеокадре отображается состояние аварийных сигнализаций радиомачт (дверь, связь, пожар...) и источников бесперебойного питания (режим работы ИБП, напряжение на входе и выходе, состояние батарей, % заряда батарей, доля загрузки ИБП, температура в серверной стойке). Оборудование для мониторинга установлено у диспетчера филиала, изображенно на рис. 3.



*Рис. 3. Вид с пульта диспетчера работоспособности программно-технических средств системы ТМ СТН-3000»*

На этом слайде указаны разрешенные частоты базовых и крановых станций Заволжского ЛПУ и соседнего филиала – Сеченовского ЛПУ. Как видно из таблиц, расположенных на рис. 4, радиоканалы организованы на одних и тех же частотах. Во избежание взаимного влияния каналы пространственно разнесены. При работе старой системы телемеханики взаимного влияния каналов не наблюдалось. Однако при эксплуатации системы СТН-3000 пришлось столкнуться с явлением, описанным на следующих слайдах.

### **Проблемный вопрос по СТН-3000**

За время эксплуатации из-за влияния сверхпроходимости радиоволн несколько раз возникали отказы работы телемеханики системы СТН-3000 в Заволжском ЛПУМГ.

Фактором, способствующим формированию отказа явилось:

1. 14.08.2016г. прием базовой станции ТМ на ПРС56 одновременно двух сигналов на частоте 160,475 МГц с одинаковым уровнем от системы СТН-3000 Заволжского и Сеченовского ЛПУМГ и отразилось на работе КП41.
2. 19.08.2016г. прием базовой станции ТМ на ПРС55 одновременно двух сигналов на частоте 160,450 МГц с одинаковым уровнем от системы СТН-3000 Заволжского и Сеченовского ЛПУМГ и отразилось на работе КП11.

Прием сигналов с Сеченовского ЛПУ приводит к сбою программного обеспечения контроллера Control Wave Micro системы TM СТН-3000.

#### Заволжское ЛПУМГ

Расположение р/модема	ПРС56	КП11	КП12	КП21	ПРС58	КП41	ПРС57	КП51	КП52
Short ID	16a	31	32	34	166	33	167	35	36
Частота ПРД/ПРИ	165,250	165,450	160,450	160,450	160,275	160,475	165,300	160,500	160,500
	160,450	165,250	165,250	165,250	160,475	165,275	160,500	165,300	165,300
Номер канала	1				2			3	

#### Сеченовское ЛПУМГ

Расположение р/модема	ОРС-12-1	КП21	ПРС59	КП11, КП12	КП41	КП51
Short ID	158	42	159	41	43	44
Частота ПРД/ПРИ	160,240	160,460	160,275	160,475	160,475	160,475
	160,460	165,250	160,475	165,275	165,275	165,275
Номер канала	1		2			

Short ID Номер определяемый пользователем (от 1 до 254, от 256 до 1023), который идентифицирует каждое отдельное устройство в сети.

Рис. 4. Частотное распределение УКВ ТМ Заволжское ЛПУМГ Сеченовское ЛПУМГ

Для устранения данного недостатка надо обратиться в проектную организацию с предложениями :

1. Работу базовых станций ТМ в смежных ЛПУ разнести по времени.
2. Доработать программное обеспечение для исключения сбоев при получении сигналов от КП ТМ соседних ЛПУ.

#### Список литературы

1. Катунин, Г.П. Телекоммуникационные системы и сети. Том 2. Радиосвязь, радиовещание, телевиденье. / Г.П. Катунин. – 2004. – С. 374 - 377.
2. Проект реконструкции системы связи газопроводов Уренгой-Ужгород, 2007.
3. Нормы и правила технологического проектирования магистральных, внутризоновых и местных радиорелейных линий связи [Текст]: СТО Газпром 11-004-2011 : [утвержден и введен в действие 23.03.2011 г. № 136 : введен впервые] : издание официальное. – Москва: Открытое АО "Газпром" [и др.], 2012. – 59 с.
4. СТО ВТГ-31-001.1-2008. Организация технической эксплуатации радиорелейных линий передач.

Материал поступил в редколлегию 20.10.20.

О.А. Капитонов, А.С. Третьяков

(Республика Беларусь, г. Могилев, Белорусско – Российский университет)

## **ОЦЕНКА ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

ESTIMATE OF CORRECTION COEFFICIENTS FOR CALCULATION OF PARAMETERS OF T-SHAPED REPLACEMENT CIRCUIT OF INDUCTION MOTOR

*Представлены краткие теоретические сведения об идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя, основные виды идентификации, а также представлена методика для оценки поправочных коэффициентов для проведения текущей идентификации параметров.*

*Brief theoretical information on the identification of parameters of the induction motor equivalent circuit, the main types of identification are presented, as well as a methodology for estimating correction coefficients for conducting the current parameter identification.*

*Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, схема замещения, идентификация параметров, программное обеспечение*

*Keywords: induction motor, equivalent circuit, parameter's identification, software*

Всякий раз, когда происходит первый раз подключение нового асинхронного электродвигателя к преобразователю частоты, для корректной работы всей системы необходимо проводить автонастройку преобразователя частоты, основной частью которой является идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя. Цель данной процедуры – получить всю необходимую информацию для корректной работы системы векторного управления.

На рис.1 представлена T-образная схема замещения асинхронного электродвигателя. В качестве активных сопротивлений выступают:

1.  $R_1$  – активное сопротивление фазы статора, Ом;
2.  $R_2'$  – приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора, Ом.

В качестве реактивных сопротивлений выступают:

1.  $X_1$  – реактивное сопротивление фазы статора, Ом;
2.  $X_2'$  – приведенное к статору реактивное сопротивление фазы ротора,

Ом.

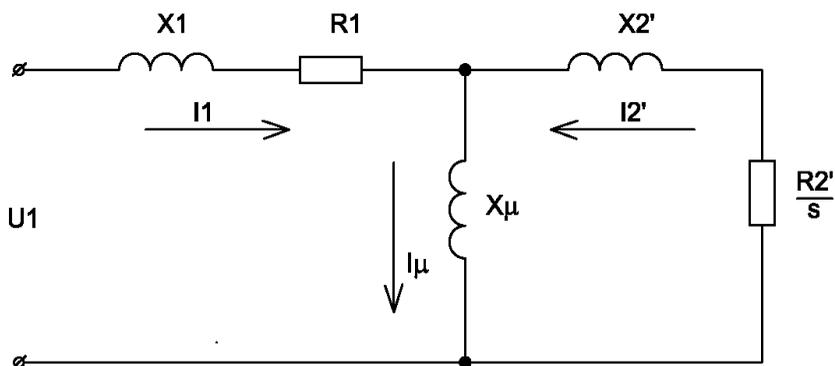


Рис. 1. Т-образная эквивалентная схема замещения асинхронного электродвигателя

Идентификация параметров – это процесс, при котором экспериментальным или расчетным путем определяются следующие параметры:

1. Активное сопротивление фазы статора;
2. Активное сопротивление фазы ротора;
3. Индуктивность фазы статора;
4. Индуктивность фазы ротора;
5. Индуктивность взаимоиндукции.

Существует большое разнообразие методов и способов проведения идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя [1]. Для решения текущей задачи был выбран метод, предложенный украинским ученым Приступой Д. В. [2], доработанный под нашу задачу.

В основе данного метода лежат несколько положений и условий:

1. Сопротивление фазы статора известно заранее;
2. Индуктивности статора и ротора принимаются равными друг другу;
3. В основе метода лежит двухфазная модель асинхронного электродвигателя.

Данный алгоритм выполняет идентификацию по следующему алгоритму:

1. Заранее любым методом определяется сопротивление фазы статора;
2. На статор асинхронного электродвигателя подается специально сформированный сигнал полифазного напряжения, и снимается сигнал тока;
3. Полученные сигналы тока и напряжения поступают в математическую модель, где по уравнениям Кларка и Парка преобразуются «из 3 в 2», фильтруются, и обрабатываются для исключения постоянной составляющей;
4. На основании полученных расчетов проходит расчет параметров схемы замещения. Расчет заканчивается по достижении требуемой точности расчетов.

В плане модификации было сделано следующее:

1. Весь математический аппарат был переведен на разностные уравнения. Это позволило ускорить время расчетов, и уменьшить количество аппаратных ресурсов, выделяемых под данную задачу. Полученный математический аппарат может быть скомпилирован в виде прошивки для современных микроконтроллеров для создания цифровых систем управления силовыми преобразователями;

2. В математический аппарат встроены необходимые фильтры для фильтрации входных сигналов, а также убиения постоянных составляющих;

Одним из минусов данной методики является оценивание поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты отвечают за динамику и характер протекания переходных процессов. Третья модификация и заключается в их оценке и корректировке.

На данный момент получена следующая методика оценки поправочных коэффициентов:

1. На основе опытов холостого хода и короткого замыкания оцениваются параметры схемы замещения;

2. На основе полученных данных оцениваются поправочные коэффициенты;

3. Формируются входные воздействия (сигналы тока и напряжения);

4. Запускается алгоритм идентификации данных;

5. При работе алгоритма для достижения заданной точности идет корректировка поправочных коэффициентов на каждом шаге расчета;

6. При достижении заданной точности процесс идентификации останавливается.

Дальнейшим развитием данной методики видится:

1. Исключение методов холостого хода и короткого замыкания;

2. Формирование базы данных для целых серий асинхронных электродвигателей.

Второй пункт заключается в том, чтобы сформировать готовые зависимости поправочных коэффициентов в функции параметров испытуемого асинхронного электродвигателя. При проведении идентификации параметров схемы замещения нового асинхронного электродвигателя алгоритм по паспортным данным должен из базы данных выбирать необходимые поправочные коэффициенты и, при необходимости, проводить их корректировку.

Создание такой базы данных – достаточно сложная задача, при которой необходимо проводить аппроксимацию большого числа данных, и устанавливать взаимосвязи между входными и выходными данными. Одним из вариантов для решения является использование искусственных нейронных сетей.

Полученный математический аппарат был реализован в виде математической модели Simulink Matlab, и в виде программы на языке C++. На рис.2 представлен скриншот программного обеспечения, написанного на кроссплатформенном фреймворке QT5, в котором реализована

идентификация параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя.

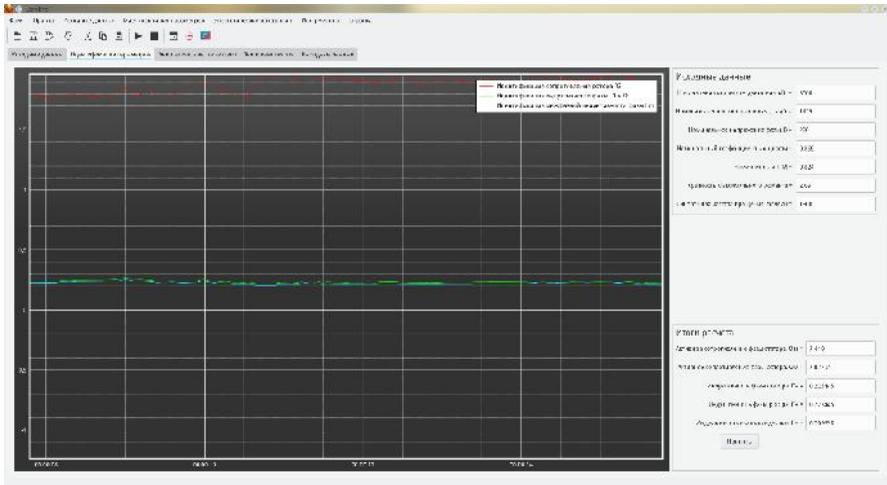


Рис. 2. Скриншот программного обеспечения для расчета параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя

Все расчеты проводились для асинхронного электродвигателя АИР100S4УЗ. При моделировании в программе Matlab, и программном обеспечении (рис.2), были получены следующие результаты:

1. Активное сопротивление фазы статора – 2,419 Ом;
2. Активное сопротивление фазы ротора – 2.078 Ом;
3. Индуктивность фазы статора – 0.223 Гн;
4. Индуктивность фазы ротора – 0.223 Гн;
5. Индуктивность взаимной индукции – 0.209 Гн.

Результаты расчетов в программах Matlab, и программном обеспечении, написанном на языке C++, совпали. Полученные результаты говорят о правильности самой методики.

### Список литературы

1. Терёхин, А. А. Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А. А. Терёхин, Д. А. Даденков // Вестник ПНИПУ. – 2017. – №22. – С. 55-66.
2. Пересада, С. М. Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование / С.М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. – № 34. – С. 27-34.

Матеріал надійшов в редакцію 05.10.20.

В.А. Кардаков

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **БЕЗОПАСНОСТЬ СМАРТ – КОНТРАКТОВ ДЛЯ САПР**

### **SMART CONTRACT SAFETY FOR CAD**

*Рассмотрена важность безопасности смарт-контрактов и их уязвимости. В данный момент все чаще и чаще ведутся разговоры о применении блокчейн – технологии в различных сферах: коммерческая деятельность, строительство, ИТ и т.д. Также блокчейн можно применить и в САПР: благодаря смарт-контрактам можно формировать, контролировать, предоставлять владение информацией.*

*At the moment, more and more often there are talks about the use of blockchain technology in various fields: commercial activity, construction, IT, etc. Blockchain can also be used in CAD: thanks to smart contracts, it is possible to form, control, using information ownership. Therefore, the security of smart contracts and their vulnerabilities are important.*

*Ключевые слова: блокчейн, смарт-контракты, информационная безопасность, Ethereum.*

*Keywords: blockchain, smart contracts, information security, Ethereum.*

Каких-то нескольких лет назад о блокчейн – технологии знало малое количество людей. Однако блокчейн уже применяется в финансовом секторе, в банковской сфере, реестре и для осуществления патентов, авторских прав. Так же мы можем использовать блокчейн в САПР. Например, в блоке может находиться уникальная информация о чертежах, также какие-то новые алгоритмы размещения, трассировки, компоновки и т.д. В общем и целом, в блоке может находиться любая информация, которая важна в САПР.

Что такое блокчейн? Блокчейн – это распределенный реестр, который обеспечивает безопасность и неизменность данных и представляет собой постоянно растущую последовательность блоков. В каждом блоке имеется хэш – сумма, которая высчитывается от всех транзакций, входящих в блок, и именно благодаря ей происходит неизменность данных, т.к. хэш – сумма одного блока зависит от хэш – суммы предыдущего блока. Благодаря данной взаимосвязи невозможно изменить данные внутри самого блокчейна [1].

Смарт – контракт – это, по сути, фрагмент кода, который хранится в блокчейне. Благодаря смарт – контракту имеется возможность читать данные, писать данные в блокчейн.

Одним из самых популярных блокчейн – технологии, которая направлена на работу со смарт – контрактами, является Ethereum. Только за первую половину 2018 года количество смарт – контрактов Ethereum возросло в два

раза, в сравнении с 2017 годом. Соответственно, с увеличением количества использования какой – либо технологии возрастает количество новых уязвимостей. Например, благодаря уязвимости контрактов была совершена кража 30 миллионов долларов из Parity и 53 миллиона долларов из DAO. Именно во время проектирования или построения проектов, которые будут использовать смарт-контракты в САПР, нужно обеспечить безопасность информации в смарт – контрактах от шпионажа, взлома и т.д.

Сам код контракта в Ethereum пишется на языке Solidity, после этого происходит его компиляция до байт – кода для виртуальной машины Ethereum [2]. За вычисления, которые производит контракт, разработчик платит узлу некое количество валюты (газа). И имеется прямая связь: чем выше сложность вычисления, тем больше газа оплачивает разработчик.

Для защиты информации у блокчейна имеются базовые методы защиты: Proof of Work и Proof of Stake. Однако имеются уже известные уязвимости, которые нужно учитывать при моделировании и разработки блокчейн – системы для САПР.

1. «Состояние гонки». Данная уязвимость заключается в ошибках написания кода, когда возможен повторный вызов внешнего кода, во время выполнения кода контракта. Следовательно, вызовы функции могут взаимодействовать способами, которые ломают логику контракта (рис. 1).

```
1 mapping (address => uint) private userBalances;
2
3 function withdrawBalance() public {
4     uint amountToWithdraw = userBalances[msg.sender];
5     require(msg.sender.call.value(amountToWithdraw)()); // 1
6     /* В строчке 1 вызывается внешний код, который может быть вызван повторно
7     до завершения первого вызова */
8     userBalances[msg.sender] = 0;
9 }
```

Рис. 1. «Состояние гонки»

2. Ошибка при переполнении типов данных. Переполнение может изменить значение, которую разработчик упустил при моделировании логики контракта (рис. 2).

```

1 mapping (address => uint256) public balanceOf;
2 // Небезопасный вариант
3 function transfer(address _to, uint256 _value) {
4     /* Проверка доступности суммы для отправки */
5     require(balanceOf[msg.sender] >= _value);
6     /* Add and subtract new balances */
7     balanceOf[msg.sender] -= _value;
8     balanceOf[_to] += _value;
9 }
10 // Безопасный вариант
11 function transfer(address _to, uint256 _value) {
12     /* Проверка доступности суммы для отправки и проверка на переполнение */
13     require(
14         balanceOf[msg.sender] >= _value &&
15         balanceOf[_to] + _value >= balanceOf[_to]
16     );
17     /* Изменить балансы */
18     balanceOf[msg.sender] -= _value;
19     balanceOf[_to] += _value;
20 }

```

Рис. 2. Ошибка при переполнении типов данных.

3. Атака с возможностью возврата информации. Данная уязвимость происходит во время попытки передачи информации обратно, т.е. предыдущему человеку. Однако происходит ошибка, когда контракт принимает начальное положение, но доступ к контракту остается за тем, кто переводил информацию обратно, а не наоборот (рис. 3). Так же может происходить ошибка с количеством газа контракта [3].

```

1 contract auction {
2     address highestBidder;
3     uint highestBid;
4     function bid() {
5         if (msg.value < highestBid) throw;
6         if (highestBidder != 0) {
7             /*если этот вызов постоянно возвращает ошибку,
8             никто не может сделать ставку*/
9             if (!highestBidder.send(highestBid)) throw;
10        }
11        highestBidder = msg.sender;
12        highestBid = msg.value;
13    }
14 }

```

Рис. 3. Атака с возможностью возврата информации.

4. Уязвимости мультиподписей. Наиболее распространены во многих смарт – контрактах мультиподписи. В Ethereum мультиподпись имеет совместную подпись и находится в смарт – контракте. Если отсутствует проверка на повторную инициализацию блока, то любой человек, который вызывает функцию инициализации, может стать полноправным владельцем информации, который находится в блоке (рис. 4).

```
1 function initWallet(address[] _owners, uint _required, uint _daylimit) {  
2     initDaylimit(_daylimit);  
3     initMultiowned(_owners, _required);  
4 }
```

*Рис. 4. Уязвимость мультиподписи*

Таким образом, нужно учитывать возможные уязвимости и слабые места при моделировании и создании системы, использующая блокчейн – технологию, а именно смарт – контракты. Это касается не только для САПР, но и для остальных сфер, где блокчейн может пригодиться для решения внутренних задач. Так же стоит учитывать, что при увеличении количества пользователей и компаний, которые используют смарт – контракты, тем выше шанс выявить злоумышленникам новые дыры и ошибки в информационной безопасности. Зная существующие проблемы, мы можем прогнозировать новые уязвимости, которые имеют места быть, для создания новых методов защиты и обновлении существующих.

#### **Список литературы**

1. Уильям Могайар. Блокчейн для бизнеса / Уильям Могайар, В. Бутерин. – Москва: ООО «Издательство «Эксмо», 2018. – 26 с.
2. Как работает Эфириум (Ethereum)? [Электронный ресурс]. – 21 октября 2017. – URL: <https://habr.com/ru/post/407583> (дата обращения: 01.10.2020).
3. Безопасность и тестирование смарт-контрактов. [Электронный ресурс]. – 01 ноября 2017. – URL: <https://inaword.ru/blokchejn/bezopasnost-i-testirovanie-smart-kontraktov/> (дата обращения: 02.10.2020).

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Р.П. Краснов

(г. Воронеж, Воронежский государственный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИООПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ**

### **MODELING OF RADIO-OPTICAL CHANNELS OF DISTRIBUTED SYSTEMS**

*Приведены результаты моделирования работы гибридных радиооптических каналов в распределенной системе, предложена новая система коммутации оптических и радиоканалов с применением ретранслятора. Получены зависимости вероятностей отказа канала и распределенной системы.*

*The results of modeling of the hybrid radio-optical channels operation in a distributed system are presented, and a new system for switching optical and radio channels using a relay is proposed. The dependences of the channel and distributed system outage probabilities are obtained.*

*Ключевые слова: гибридная система, атмосферная оптическая линия связи, радиоканал, вероятность отказа.*

*Keywords: hybrid system, free-space optics, radio channel, outage probability.*

Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) предоставляют высокоскоростные защищенные каналы передачи данных. Ограничения, связанные с сильным влиянием атмосферных условий на качество связи [1], могут быть преодолены за счет организации гибридных радиооптических линий связи.

Такие системы применяются для создания надежных широкополосных каналов распределенных систем дистанционного управления или мониторинга [1]. При проектировании подобных систем требуется корректная модель атмосферного канала связи для оптической и радиочастотной подсистем.

Известно [2], что одним из важнейших параметров, определяющих качество связи оптической линии, является степень атмосферной турбулентности, обусловленной движением воздушных масс. Наиболее универсальной моделью, адекватно работающей при любой степени турбулентности (от сильной до слабой) на сегодняшний день признается распределение Вейбулла [3]. Для радиочастотной линии в описываемых системах наиболее подходит  $m$  – распределение Накагами [4].

Ограничение на организацию оптической линии связи в пределах прямой видимости может быть преодолено организацией резервного канала с ретранслятором [5, 6] или использованием ячеистой топологии.

Предложена модель гибридной системы передачи, использующая канал прямой видимости в сочетании с каналом, содержащим ретранслятор, который

работает в режиме «усиление и передача». Линии АОЛС при этом являются основными, при падении отношения сигнал/шум ниже некоторого заданного порогового уровня система переключается на радиоканал. При снижении ниже порога отношений сигнал/шум во всех каналах система переходит в состояние отказа.

В каналах данные представляют собой цифровые потоки, промодулированные по схеме квадратурной фазовой манипуляции MPSK.

Экспоненциальное распределение Вейбулла задается аналогично [3],  $m$ -распределение Накагами представлено согласно [4], алгоритм выбора канала - по наибольшему отношению сигнал/шум (MRC) - подобно изложенному в [2].

Определяя вероятностные характеристики отношения сигнал/шум в каналах АОЛС и РЧ как функции пороговых уровней, определяем вероятности отказа  $P_{отк}$  как (1):

$$P_{отк} = F_{АОЛС}(\gamma_{пор}^{АОЛС})F_{РЧ}(\gamma_{пор}^{РЧ}), \quad (1)$$

где  $F_{АОЛС}(\gamma), F_{РЧ}(\gamma)$  - интегральная функция распределения вероятности отношения сигнал/шум в каналах АОЛС и РЧ соответственно,  $\gamma_{пор}^{АОЛС}, \gamma_{пор}^{РЧ}$  - пороговые уровни отношения сигнал/шум в каналах АОЛС и РЧ соответственно.

На рис. 1 представлены зависимости вероятности отказа  $P_{отк}$  от среднего отношения сигнал/шум линии АОЛС  $\gamma^{АОЛС}$  при сильной турбулентности.

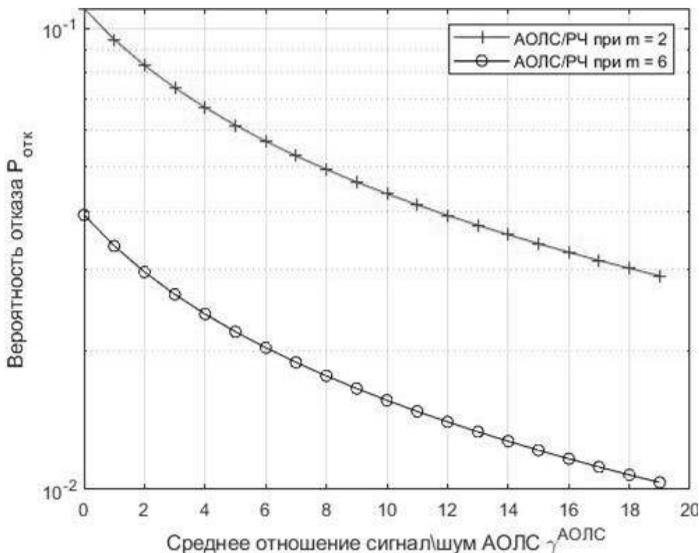


Рис. 1. Вероятность отказа в функции отношения сигнал/шум линии АОЛС

Для модели с  $m = 2$  и  $m = 6$  качество связи практически одинаково. На рис. 2 представлена зависимость  $P_{отк}$  от среднего отношения сигнал/шум в

линии АОЛС при фиксированных  $\gamma_{пор}^{АОЛС}$  и  $\gamma_{пор}^{РЧ}$ . Очевидно, что и при низком качестве связи в РЧ канале, система дает лучшее качество связи по сравнению с АОЛС.

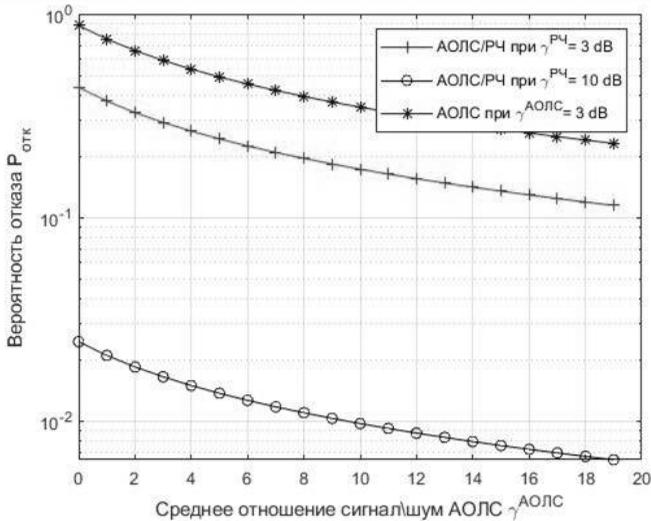


Рис.2. Вероятность отказа в функции отношения сигнал/шум линии АОЛС

### Список литературы

1. C. Basak, C.M.I. Hussain, A.M. Azad A New Approach to Improve the Reliability of DPDC SCADA Communication Systems Journal of Energy and Power Engineering July 2010, 4, No.7 PP 48-54.
2. L. Andrews, R. Phillips, C. Hopen, Laser Beam Scintillation With Applications. New York: SPIE Press, 2001, 416 p.
3. Yura, T. Rose Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment, Opt. Express, 2012, 20, No. 18, PP. 20 680–20 683.
4. M. Usman, H.-C. Yang, M.-S. Alouini Practical switching-based hybrid FSO/Rf transmission and its performance analysis, IEEE Photonics J., 2014, 6, No 5, PP. 1–13.
5. A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell User cooperation diversity—Part I: System description, IEEE Trans. Commun., 2003, 51, No. 11, PP. 1927–1938.
6. A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell User cooperation diversity—Part II: Implementation aspects and performance analysis, IEEE Trans. Commun., 2003, 51, No. 11, PP. 1939–1948.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

М.М. Ляшева

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ)

## **СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

### **IMAGE COMPRESSION IN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS**

*Приведена классификация процедур обработки изображений и определено место в рамках данной классификации процедур сжатия. Рассмотрена общая схема сжатия изображений и описаны основные шаги этой схемы. Приведены сведения о подходах к сжатию изображений на основе вейвлет-преобразования. Описан подход с использованием весовой модели.*

*The classification of image processing procedures is given and the place of compression procedures within this classification is determined. The general scheme of image compression is considered and the main steps of this scheme are described. Information about approaches to image compression based on the wavelet transform is provided. An approach using a weight model is described.*

*Ключевые слова: процедуры обработки изображений, методы сжатия изображения, вейвлет-преобразование, весовая модель.*

*Keywords: image processing procedures, image compression methods, wavelet transform, weight model.*

Многие современные информационно-измерительные системы базируются на технологиях компьютерного зрения. В таких системах необходимо обеспечить обработку больших объемов статических и/или динамических изображений.

Процедуры обработки изображений условно делятся на три класса по виду входных и выходных данных [1]. Эту классификацию предложил Д. Марр и она отражает процессы восприятия видеоинформации зрением человека и высокоорганизованных животных. Согласно концепции Д. Марра все процедуры обработки делятся на процедуры низкого, среднего и высокого уровня. Процедуры низкого уровня предназначены для получения и первичной обработки изображений. Процедуры среднего уровня обеспечивают формирование векторов признаков для описания изображений. Процедуры высокого уровня решают задачи анализа изображений с целью их распознавания.

Среди других процедур среднего уровня важное значение имеет сжатие изображений, в результате которого обеспечивается сокращение их избыточности. Сжатие изображений позволяет снизить требования к устройствам хранения и передачи информации. При этом в зависимости от конкретных условий использования оптимально применение конкретных

методов сжатия изображений. Различают методы адаптивного и неадаптивного, симметричного и асимметричного, искажающего и неискажающего сжатия [2].

Для сжатия изображений наиболее эффективно применение методов адаптивного симметричного искажающего сжатия. Такие методы в общем случае работают по следующей схеме: (1) снижение межэлементной избыточности; (2) выделение наиболее существенной информации; (3) кодирование данных. Снижение межэлементной избыточности обеспечивает уменьшение взаимозависимости между элементами изображения, что позволяет уменьшить избыточность информации, содержащейся в изображении. Выделение наиболее существенной информации позволяет отбросить незначимые детали, не влияющие на восприятие изображения. Кодирование данных позволяет представить элементы изображения в наиболее компактной форме.

В настоящее время широко применяются методы на основе различных вейвлет-преобразований. В общем случае здесь выделяют два подхода – внутриподдиапазонный и межподдиапазонный. Внутриподдиапазонные методы основаны на устранении корреляции между соседними вейвлет-коэффициентами в каждом из поддиапазонов по отдельности. Межподдиапазонные методы основаны на устранении корреляции между вейвлет-коэффициентами, принадлежащими к разным поддиапазнам. Основной задачей при создании методов на основе вейвлет-преобразования является анализ значимости коэффициентов.

В данной работе предлагается подход на основе весовой модели. Данная модель позволяет оценить значимость векторов детализирующих коэффициентов с помощью значений их энергии. Это связано с тем, что наиболее значимыми являются вектора детализирующих коэффициентов с большими по абсолютной величине значениями. Поэтому можно вычислить евклидову норму вектора детализирующих коэффициентов, которая и представляет собой значение энергии.

Процедура сжатия заключается в выполнении вейвлет-преобразования, определении значимых детализирующих коэффициентов и их кодировании с помощью метода Хаффмена. Реализация этой процедуры на языке C++ в системе программирования Microsoft Visual Studio позволило для стандартных полутоновых изображений из коллекции USC-SIPI [3] получить средний коэффициент сжатия, равный четырем.

#### **Список литературы**

1. *Гонсалес, Р.* Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. *Сэломон, Д.* Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
3. The USC-SIPI Image Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sipi.usc.edu/database/database.php> (дата обращения: 04.10.2020).

*Материал поступил в редколлегию 08.10.20.*

М.М. Ляшева

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ)

## **КОНТУРНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

### **CONTOUR ANALYSIS OF IMAGES IN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS**

*Приведены задачи обработки и анализа изображений в информационно-измерительных системах. Рассмотрены подходы к контурной сегментации изображений. Описан многомасштабный подход к выделению контуров на изображениях. Предложен подход на основе вейвлет-преобразования с использованием весовой модели. Описаны соотношения, на базе которых строится весовая модель.*

*The problems of image processing and analysis in information and measurement systems are presented. Approaches to contour segmentation of images are considered. A multiscale approach to contour selection in images is described. An approach based on the wavelet transform using a weight model is proposed. The relations on the basis of which the weight model is built are described.*

*Ключевые слова: процедуры обработки и анализа изображений, сегментация изображений, контурная сегментация, многомасштабные методы, вейвлетные методы, весовая модель.*

*Keywords: image processing and analysis procedures, image segmentation, contour segmentation, multiscale methods, wavelet methods, weight model.*

В настоящее время активно развиваются информационно-измерительные системы, в которых реализуются дистанционные измерения на основе анализа изображений. В таких системах решаются задачи формирования изображений, их первичной обработки, вычисления признаков и анализа признаков [1]. Эффективные решения всех указанных задач одинаково важны для функционирования подобных систем. Однако в рамках данной работы будут рассматриваться только процедуры вычисления признаков.

Процедуры вычисления признаков базируются на сегментации изображений [2]. Среди других методов сегментации важное практическое значение имеют методы выделения контуров. Основными подходами здесь являются локальные методы, контекстуальные и глобальные методы, многомасштабные методы.

В рамках данной работы рассматривается многомасштабный подход к выделению контуров на изображениях. В основе данного подхода лежит основная идея, которая заключается в учете многомасштабной природы объектов реального мира, связанной с тем, что объекты могут восприниматься

по-разному в зависимости от масштаба их рассмотрения. Поскольку заранее неизвестно на каких масштабах следует рассматривать объекты сцены на изображениях, то естественным является подход одновременного рассмотрения представлений сцены сразу на всех масштабных уровнях. Среди различных многомасштабных подходов к сегментации изображений, используемых на практике, активно развиваются вейвлетные методы [3].

Часто при разработке методов выделения контуров на изображениях предполагают, что контур – это местоположение точек, в которых наблюдается перепад значения яркости между областями изображения. Свойством локализации изменений характера сигналов, в том числе двумерных (к которым относятся изображения), обладают процедуры на основе анализа коэффициентов вейвлет-преобразования.

Для устойчивого определения точек, в которых наблюдается значительный перепад яркости, можно использовать весовую модель, которая строится на основе ортогонального дискретного кратно-масштабного вейвлет-преобразования. Весовая модель отражает значимость точек изображения с точки зрения характеристик энергии в точках перепада яркости, которые оцениваются через значения вейвлет-коэффициентов на различных уровнях.

Построить весовую модель можно на основе следующих соотношений:

$$w(j_0, m_{j_0}, n_{j_0}) = d_H^2(j_0, m_{j_0}, n_{j_0}) + d_V^2(j_0, m_{j_0}, n_{j_0}) + d_D^2(j_0, m_{j_0}, n_{j_0}),$$

$$w(j, m_j, n_j) = \frac{1}{4} w(j-1, m_j/2, n_j/2) + d_H^2(j, m_j, n_j) + d_V^2(j, m_j, n_j) + d_D^2(j, m_j, n_j),$$

$$j = \overline{j_0 + 1, J - 1},$$

где  $j$  – уровень вейвлет-преобразования;  $m_j, n_j$  – координаты детализирующих коэффициентов;  $d_H, d_V, d_D$  – горизонтальный, вертикальный и диагональный детализирующие вейвлет-коэффициенты;  $j_0$  – начальный уровень вейвлет-преобразования;  $J$  – число уровней вейвлет-преобразования.

Для определения контурных выполняется анализ значимости весовых значений всех уровне вейвлет-преобразования. Для этого вводятся пороговые значения и значимыми полагаются веса, не меньшие этих пороговых значений.

После выделения контуров осуществляется их описание с помощью фурье-дескрипторов или цепных кодов.

### Список литературы

1. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Д. Стокман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
  2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
  3. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 672 с.
- Материал поступил в редколлегию 08.10.20.*

Д.Н. Маряшина

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ)

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИОС

### INFORMATION AND METHODOLOGICAL SUPPORT FOR DESIGNING IOS

*Рассмотрена роль интеллектуальных обучающих систем (ИОС) в электронном обучении (e-Learning). Представлено описание возможностей инструментальных средств проектирования ИОС.*

*The paper considers the role of intelligent learning systems (ITS) in e-learning. The description of the capabilities of the tools in the design of ITS is presented.*

*Ключевые слова: интеллектуальная обучающая система (ИОС), инструментальные средства проектирования, e-Learning, самообразование.*

*Keywords: intelligent tutoring system (ITS), design tools, e-Learning, self-education.*

Недавняя пандемия внесла существенные корректировки во все сферы жизнедеятельности человека, исключением не стала и образовательная среда. Большинство образовательных организаций не было готово к стремительному переходу от традиционной системы образования к формату электронного обучения (e-Learning).

Особенно значимым для e-Learning является проблема создания информационно-методического обеспечения учебного процесса [1]. На сегодняшний день все чаще в образовательном процессе применяются автоматизированные обучающие системы (АОС). АОС представляют собой комплекс программных средств обучения, обладающих различной структурой и формой представления знаний [2]. Комплекс программных средств дополняют системы диагностики и контроля знаний обучаемого. На рис. 1 представлена классификация автоматизированных обучающих систем по своей структуре.



Рис. 1. Классификация автоматизированных обучающих систем

Вне зависимости от классификации, все АОС должны обеспечить оптимальный уровень обучения: максимизировать уровень получаемых знаний, при заданном времени обучения. Достичь оптимального уровня обучения возможно благодаря правильному построению структуры АОС, выбору методики и стратегии обучения. Однако, это довольно трудоемкий процесс. Помимо трудоемкости создания, АОС обладают низкой индивидуализацией обучения.

По мнению авторов статьи [3], одним из эффективных средств организации учебного процесса в условиях e-Learning служат интеллектуальные обучающие системы (ИОС). Отличительной особенностью которых является отсутствие жесткого сценария. ИОС динамически, в зависимости от текущего состояния процесса обучения, формируют программу обучения для каждого отдельно взятого обучаемого, опираясь на ранее заложенные в систему исходные данные: знания о предметной области обучения, знания об обучаемом и знания о процессе обучения.

Разработка ИОС и последующая ее интеграция в образовательный процесс общеобразовательных, средне-специальных, высших учебных заведений – сложная задача, включающая в себя множество различных этапов. В этой связи актуальной является задача разработки средств автоматизации проектирования интеллектуальных обучающих систем.

Наиболее инвариантным к широкому классу предметных областей обучения является инструментальное средство МОНАП (модель обучения навыкам алгоритмической природы). Процесс проектирования ИОС с использованием инструментального средства МОНАП представлен на рис. 2.

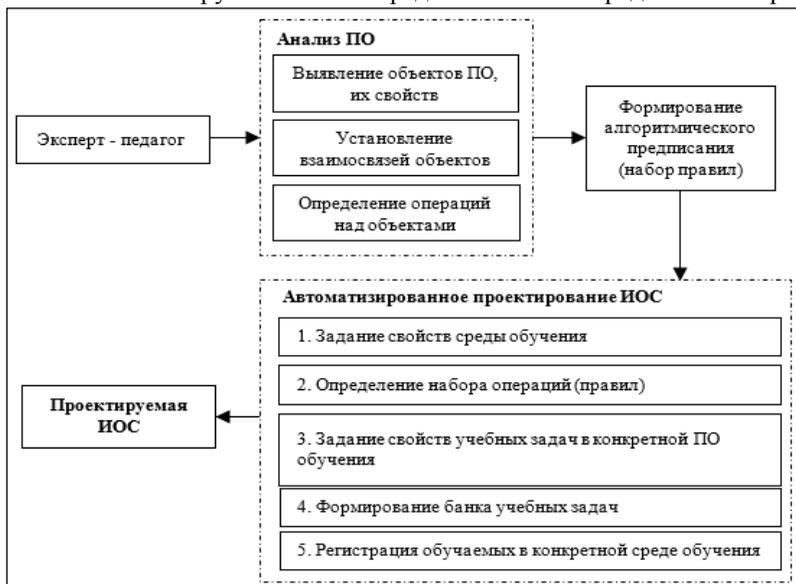


Рис. 2. Процесс проектирования ИОС средствами МОНАП

Одним из основных этапов проектирования ИОС является этап формирования набора операций (правил) решения учебных задач. Каждое правило описывается в формате «если ..., то ....» [4]. Более детально процесс формирования набора операций (правил) представлен на рис. 3.

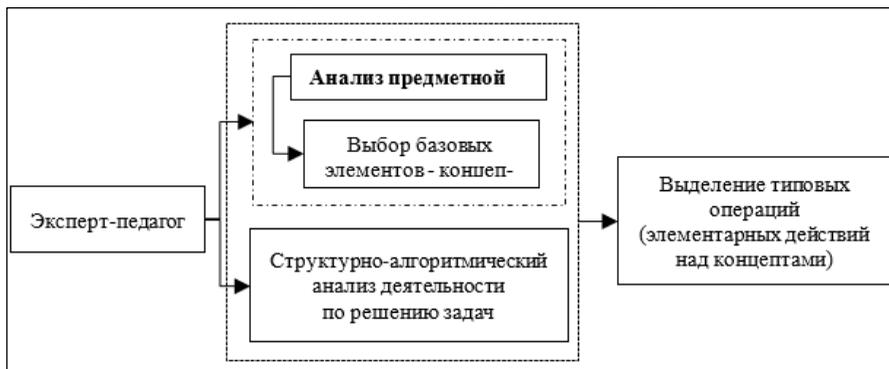


Рис. 3. Процесс формирования набора операций (правил)

После того как набор операций (правил) сформирован, осуществляется описание и создание свойств учебных задач. На рис. 4 представлен пример учебной задачи по физике, при решении которой обучаемый должен правильно применить четыре различных операции (правила). Рис.5 иллюстрирует процесс прохождения обучения обучаемым.

Класс	Подкласс	Число	?
1	1	2	4
1	2	2	6
1	2	6	6
1	3	5	7
1	3	8	7
1	4	7	8
1	4	8	8
1	5	3	13
1	5	10	13
2	1	11	8
2	1	2	8
2	2	12	7
2	2	14	7
2	3	15	8
2	3	16	8
2	4	11	8
2	4	18	8
2	5	19	12
2	5	20	17

На рисунке изображены участки цепи А) и Б) Даны кажущиеся сопротивления объектов соответственно. Для участка цепи А) определены напряжения на элементах, если сила тока в цепи на данном участке 10А. Для участка цепи Б) вычислите общее сопротивление, приходящее к этой цепи, если общее напряжение цепи равно 45 В.

Ответ:  
 а) -  $R_{\text{общ.А}} =$   Ом  
 б) -  $R_{\text{общ.Б}} =$   Ом  
 в) -  $U_1 =$   В  
 г) -  $I_{\text{общ.Б}} =$   А

Рис. 4. Пример учебной задачи

По результатам решения задачи ИОС рассчитывает вероятность правильного применения каждой примененной операции (правила). Эта

информация используется далее для пересчета значений трудностей созданных учебных задач для конкретного обучаемого, формируя тем самым учебную задачу оптимальной трудности

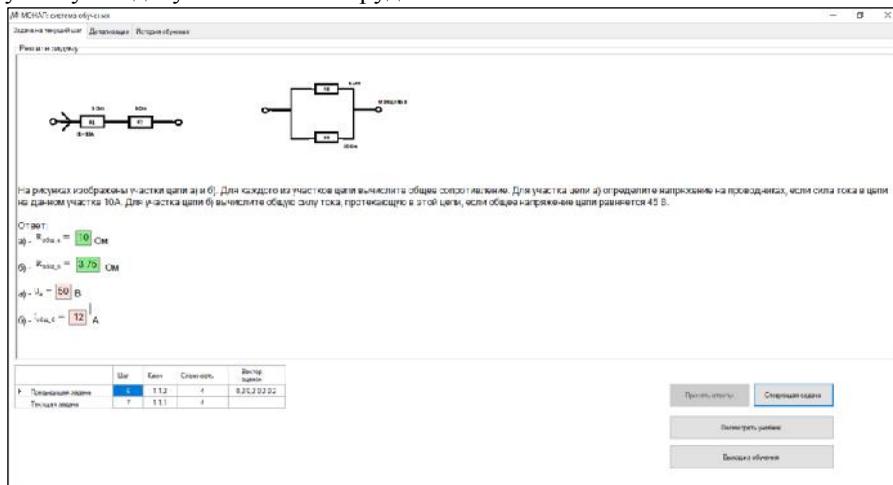


Рис. 5. Процесс прохождения обучения

Результатом проектирования ИОС является система, позволяющая для каждого отдельно взятого обучаемого построить уникальную траекторию обучения. Успех деятельности преподавателя и обучаемого во многом зависит от выбора программных средств и оболочек. МОУАП не только инвариантен к широкому классу предметных областей обучения, но и содержит интуитивно понятный инструментарий для проектирования ИОС.

### Список литературы

1. *Маряшина, Д.Н.* Опыт проектирования интеллектуальных обучающих систем / Д.Н. Маряшина, Ш.Д. Хайбуллин, А.В. Золотухин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. статей междунар. науч. конф., 31 января 2020 г.– Казань: ООО «Конверт», 2020. – Ч.2. – С. 18-25.
2. *Тулупова, Т.В.* Автоматизация проектирования обучающих систем / Т.В. Тулупова// Вестник евразийской науки, 2013. – №5 (18).
3. *Маряшина, Д.Н.* Интеллектуальные обучающие системы в образовательном процессе / Д.Н. Маряшина, А.В. Золотухин, Ш.Д. Хайбуллин // Цифровые технологии в социально-экономическом развитии России: взгляд молодых: сб. статей и тезисов докладов XVI национальной научно-практической конф. студентов, магистрантов и аспирантов с междунар. участием (18 февраля 2020 г.) / Уральский филиал Финиуниверситета. - Москва: Издательство «Перо», 2020.
4. *Galeev I.* Automation of the ETS Design // Educational Technology - September-October 1999. - V. XXXIX, No. 5. - P. 11-15.

Материал поступил в редколлегию 09.10.20.

Л.А. Назикова, М.В. Медведев  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ  
ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
СРЕДСТВАМИ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА**

RECOGNITION OF OBJECTS IN IMAGES USING A NEURAL NETWORK MEANS  
BY OF A MOBILE PHONE

*Представлен способ реализации мобильного приложения для распознавания продуктов питания на фотографии при помощи мобильного телефона. Рассмотрены метод классификации и распознавания объектов на изображении при помощи сверточной нейронной сети, метод хранения данных в мобильном приложении при помощи СУБД SQLite. Результатом является спроектированное и реализованное приложение.*

*The article presents a way to implement a mobile application for recognizing food products in a photograph using a mobile phone. A method of classification and recognition of objects in an image using a convolutional neural network, a method of storing data in a mobile application using the SQLite DBMS are considered. The result is a designed and implemented application.*

*Ключевые слова: нейронные сети, распознавание изображения, TensorFlow Lite, SQLite, Android.*

*Keywords: neural networks, image recognition, TensorFlow Lite, SQLite, Android.*

На данный момент одним из перспективных направлений развития информационных технологий можно считать разработку алгоритмов распознавания объектов на изображении или видео. Системы, которые способны быстро и качественно распознавать объекты, сразу же находят свое прикладное применение в таких задачах, как городское видеонаблюдение, мониторинг социальных медиа, медицина и т.д.

Целью данной работы является сокращение времени записи информации в электронный дневник питания путем автоматического распознавания продуктов на изображении при помощи нейронной сети средствами мобильного телефона.

Технология и теория для создания интеллектуальных машин, производящих обнаружение, детектирование и классификацию объектов называется компьютерным зрением [1].

Компьютерное зрение используется для создания интеллектуальных систем, обрабатывающих информацию из изображений и видео. Одним из самых популярных, успешных и широко распространённых подходов для

анализа видеоизображений являются нейронные сети. Наиболее эффективными в задачах распознавания изображений и речи являются сверточные нейронные сети [2]. Их особенность заключается в том, что сверточная сеть способна сама определять признаки (фильтры) для определённого объекта, т.е. нет необходимости вручную определять характерные признаки, а потом их выделять на примерах.

Самая распространенная и широко известная за счет открытой программной библиотеки для машинного обучения является платформа TensorFlow[3]. Ее дочерней платформой является TensorFlow Lite для работы на мобильных устройствах. Для решения поставленной задачи в библиотеке TensorFlow Lite предлагается обученная готовая модель для классификации более 1000 объектов. Среди них около 73 наименований, связанных с питанием человека: морепродукты, мясо, фрукты и овощи, готовые блюда, напитки и кондитерские изделия.

По умолчанию в Android используется SQLite – популярная и простая в освоении реляционная база данных. Использование SQLite является оптимальным решением при мобильной разработке, когда не требуется хранить данные на сервере, а только на самом мобильном устройстве.

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования приложения. Действующим лицом является пользователь, который обладает доступом к основным функционалам системы.

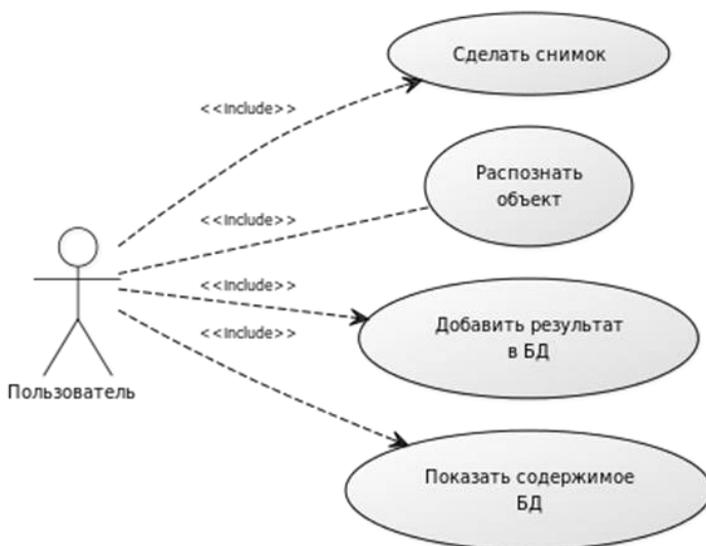


Рис. 1. Диаграмма использования приложения

В качестве среды разработки выбрана Android Studio. Интерфейс приложения представлен на рис. 2 и 3.

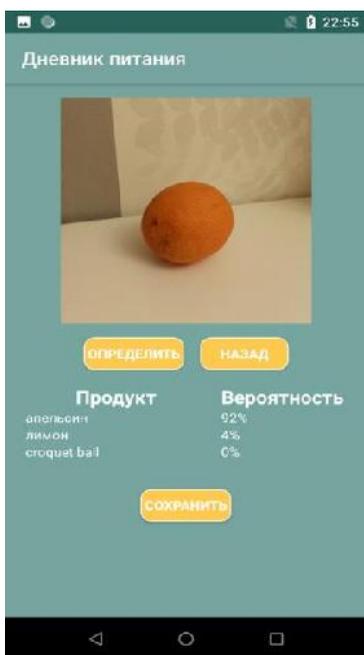


Рис. 2. Результат распознавания

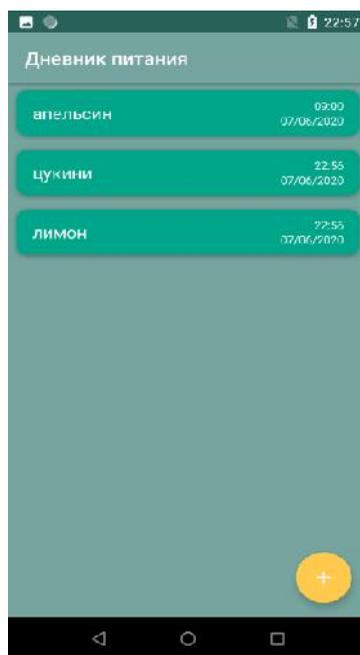


Рис. 3. Обновленная база данных

Данное приложение позволяет распознавать продукт питания, фотография которого получена с камеры мобильного телефона. В результате экспериментов процент правильного распознавания составляет 64%. Дальнейшее развитие приложения позволит расширить функциональные возможности и повысить удобство использования приложения. Можно добавить секцию «Спорт», что привлечет больше пользователей увлекающихся своим здоровьем. Это может быть дневник объемов тела, учет физических и полезных привычек, полезные статьи и рецепты.

### Список литературы

1. Болотова, Ю. А. Обзор алгоритмов детектирования текстовых областей на изображениях и видеозаписях / Ю. А. Болотова, В.Г. Спицын, П.М. Осина // Компьютерная оптика: научный журнал/ Институт систем обработки изображений Российской академии наук. – 2017. – Т.41, №3.– [С. 441-452]. – [Электронный ресурс]. – Свободный доступ из сети Интернет. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-3-441-452>
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning/ – Cambridge, MIT Press, 2016. – 800 с.
3. Geron A., Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems.: – Sebastopol, "O'Reilly Media, Inc.", 2019 , 856 с.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

А.Р. Никонорова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИОС ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЕ**

LINEAR ALGEBRE ITS DESIGN AUTOMATION

*Рассмотрена разработка адаптивной интеллектуальной обучающей системы (ИОС) в среде МОНАП. Данная среда содержит: банк задач, учебный материал и саму обучающую систему. Как предметная область выбрана линейная алгебра.*

*The article describes the development of adaptive intelligent learning system (ILS) in the environment of MONAP. This environment contains: a task bank, training material, and the training system itself. As a subject area, linear algebra is chosen.*

*Ключевые слова: целенаправленность, адаптивная обучающая система, интегративность, вариативность, учебный контент.*

*Keywords: purposefulness, adaptive learning system, integrativity, variability, educational content.*

Актуальность электронного обучения общеизвестна. Существует множество различных систем, поддерживающих электронное обучение. В тоже время имеет место невысокая оценка дидактического качества большинства обучающих систем. Одна из основных причин разрыва между потенциальными и реальными возможностями автоматизированных обучающих систем (АОС) заключается в недостаточно высокой индивидуализации обучения, обеспечиваемой существующими АОС [1]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования и разработки, направленные на повышение адаптивности процесса обучения. Наиболее значительные перспективы в этом направлении связаны с разработкой интеллектуальных обучающих систем (ИОС) и средств автоматизации их проектирования.

МОНАП (Модель Обучения Навыкам Алгоритмической Природы) – инструментальные средства (инвариантные к широкому классу предметных областей обучения) проектирования ИОС [2,3]. Спроектированные ИОС обеспечивают адаптацию к обучаемому при решении им учебных задач.

МОНАП имеет два составных компонента: среда преподавателя и среда обучаемого [2,3].

В «Среде преподавателя» осуществляется:

- Выбор и исследование предметной области, для которой будет реализовано интеллектуальное управление обучением.

- Описание обучающей среды (задание значений параметров).
- Формирование множества правил решения учебных задач.
- Описание свойств учебных задач и их создание.
- Регистрация обучаемых.

В «Среде обучаемого» осуществляется непосредственно процесс обучения – решение обучаемым учебных задач в выбранной предметной области обучения.

На начальном этапе проектирования необходимо определить среду обучения, настроить ее параметры.

Следующим этапом является формирование набора правил (операций) решения учебных задач, которые обучаемый должен использовать при решении задач. Формирование набора правил (операций) является, в общем случае, слабо формализуемой, многокритериальной задачей, решаемой экспертом-педагогом. В результате анализа предметной области обучения выбираются базовые элементы, представляющие собой простые понятия (концепты), на основе которых строится рассматриваемый учебный материал. С учетом выбранных концептов и на основе структурно-алгоритмического анализа деятельности по решению задач определенного класса осуществляется выделение типовых операций, составляющих содержание рассматриваемой деятельности. Под типовой операцией понимается законченная по смыслу, учитывающая специфику предметной области обучения операция, предполагающая элементарные действия над концептами. Правила желательно представлять в форме «условие-действие». Пример просмотра и редактирования правил по линейной алгебре представлен на рис. 1.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9

Если необходимо найти обратную матрицу, то нужно вычислить алгебраическое дополнение исходной матрицы:

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} * M_{ij}$$

$M_{ij}$  - матрица, которая образуется после вычеркивания  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца.

$$\left| \begin{matrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{matrix} \right|$$

$$A_{11} = (-1)^{1+1} * \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$A_{12} = (-1)^{1+2} * \begin{pmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$A_{13} = (-1)^{1+3} * \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} \text{ и т.д.}$$

Рис. 1. Набор правил среды обучения и окно редактирования

Далее в «Среде преподавателя» осуществляется описание свойств учебных задач и их создание [4]. На рис. 2 представлен пример учебной задачи

по линейной алгебре, при решении которой обучаемый должен правильно применить три различных правила(операции).

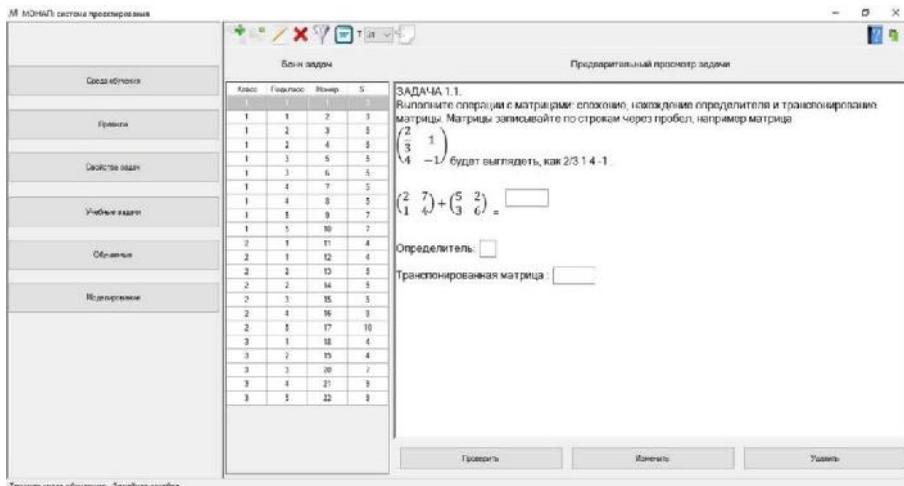


Рис. 2. Пример учебной задачи

Для регистрации обучаемых используется форма авторизации (рис. 3).

Форма авторизации

Фамилия

Имя

Среда обучения  
Линейная алгебра

Войти | Отмена

Рис. 3. Форма авторизации

На рис. 4 представлен пример решения обучаемым одной из задач спроектированной ИОС. По результатам решения задачи ИОС рассчитывает вероятность правильного применения каждого примененного правила (операций). Эта информация используется далее для пересчета значений трудностей созданных учебных задач для конкретного обучаемого, что

позволяет ИОС предложить обучаемому на очередной шаг обучения учебную задачу оптимальной для него трудности.

Решите задачу

**ЗАДАЧА 1.1.**  
 Выполните операции с матрицами: сложение, нахождение определителя и транспонирование матрицы. Матрицы записывайте по строкам через пробел, например матрица  $\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$  будет выглядеть, как 2 3 1 4 -1.

$\begin{pmatrix} 2 & 7 \\ 1 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 & 2 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} =$

Определитель:

Транспонированная матрица:

	Шаг	Ключ	Сложность	Вектор оценок
► Предыдущая задача				
Текущая задача	1	1.1.1	3	

Принять ответ    Следующая задача

Посмотреть учебник

Рис. 4. Прохождения обучения

С помощью инструментальных средств серии МОНАП спроектирована ИОС линейной алгебры. На каждом шаге обучения ИОС обеспечивает идентификацию знаний обучаемого и вынесение решения о продолжении обучения или его завершении (успешном или аварийном). При выполнении решения о необходимости продолжения обучения ИОС определяет задачу, адекватную знаниям обучаемого, на очередной шаг обучения, то есть обеспечивает индивидуальную минимизацию времени обучения.

### Список литературы

1. Галеев, И.Х. Модели и методы построения автоматизированных обучающих систем (обзор) / И.Х. Галеев // Информатика. Научно-технический сборник. Серия Кадровое обеспечение. Выпуск 1. - М.: ВМНУЦ ВТИ, 1990. - С.64-72.
2. Галеев, И.Х. Организация адаптивного обучения навыкам алгоритмической природы / И.Х. Галеев // Программные продукты и системы. - 1989. -N 3. - С.50-57.
3. Galeev, I. Automation of the ETS Design // Educational Technology - September-October 1999. - V. XXXIX, No. 5. - P. 11-15.
4. Галеев, И.Х. Свойства учебных задач при алгоритмизации в обучении / И.Х. Галеев // Международный электронный журнал «Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society)» - 2011. - V.11. - №2. - С.289-299. - ISSN 1436-4522.

Материал поступил в редколлегию 09.10.20.

М.В. Петровская, Д.Л. Аптинова  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРОБНО-ОПЕРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

LABORATORY STAND FOR FRACTIONAL-OPERATOR DEVICES RESEARCH

*Рассмотрен лабораторный стенд для исследования частотных характеристик дробно-операторных устройств.*

*The report considers a laboratory stand for studying fractional-operator devices frequency characteristics.*

*Ключевые слова: дробно-операторные устройства, лабораторный стенд, автоматизированная система измерения, частотные характеристики.*

*Keywords: fractional-operator devices, laboratory stand, automated measuring system, frequency characteristics.*

В работе разработан лабораторный стенд для измерения амплитудно- и фазочастотных характеристик дробно-операторных устройств. Стенд состоит из двух основных частей: лабораторный макет (дробно-операторное устройство) и автоматизированная система, которая обеспечивает измерение характеристик в ручном и автоматизированном режимах. Система построена на базе измерительной станции NI ELVIS II, программное обеспечение было разработано в инструментальной среде LabVIEW.

Перед проектированием лабораторного стенда была рассмотрена задача численного синтеза, в ходе которого в автоматическом режиме должны определяться параметры  $R_k$ ,  $C_k$  фрактального двухполюсника с заданным показателем  $\nu$  в заданном частотном интервале с допустимой погрешностью отклонений  $\delta_z$  и  $\delta_\varphi$  обеих частотных зависимостей (АЧХ и ФЧХ) от их идеальных значений при минимальном (оптимальном) числе звеньев  $N$  [1].

В результате численного синтеза были получены безразмерные параметры двухполюсника, но для проектирования реального лабораторного стенда пересчитаны в размерные единицы под заданную частоту. По этим параметрам была собрана RC-цепочка, реализующая функцию дробно-операторного устройства.

Для реализации автоматизированной системы измерения характеристик в персональном компьютере с использованием специального программного обеспечения в цифровом виде формируется тестовый гармонический сигнал. Такой сигнал с помощью интерфейса ввода-вывода поступает в микроконтроллер, а затем преобразуется с помощью цифро-аналогового

преобразователя в аналоговый. Перед подачей на вход исследуемого устройства сигнал масштабируется и фильтруется для ограничения спектра. С выхода лабораторного стенда для работы по максимальной шкале измерения сигнал поступает на другой управляемый масштабирующий усилитель и с его выхода после преобразования в цифровой код в аналогово-цифровом преобразователе поступает в персональный компьютер для определения АЧХ и ФЧХ программным способом и визуализации результатов.

Кроме того, для контроля сдвига фазы после фильтра нижних частот сигнал снимается до лабораторного стенда, поступает на аналоговый коммутатор, преобразуется в цифровой код и поступает в персональный компьютер.

В качестве аналого-цифрового интерфейса связи персонального компьютера и стенда может быть использована модульная лабораторно-техническая платформа ELVIS II фирмы National Instruments, а в качестве специального программного обеспечения – программный продукт фирмы NI – среда разработки LabVIEW, с помощью которой могут быть реализованы необходимые виртуальные измерительные приборы.

В среде LabVIEW был спроектирован виртуальный прибор, в котором задаются параметры тестового сигнала. Для реализации виртуального прибора, в частности сопряжения персонального компьютера и измерительной станции потребовался специальный драйвер – NI-DAQmx. Макет дробно-операторного устройства выполнен на платформе NI ELVIS II.

Разработанная автоматизированная система измерения характеристик имеет диапазон изменения частот от 10 Гц до 1 МГц, а диапазон изменения напряжения – от 0 до 10 В.

Предполагается внедрение стенда учебный процесс для проведения исследований в рамках изучения студентами прикладных дисциплин по направлению подготовки 11.03.01 Радиотехника.

### Список литературы

1. *Петровская, М.В.* Об электрической реализации дробных операторов на основе оптимального синтеза резистивно-емкостных двухполюсников / Петровская М.В., Вяселев М.Р., Нуруллин Э.Э. // Вестник казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева – Казань, 2012. – №4. – вып.1. – С. 105-112.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

В.В. Петровский, И.Ф. Нафиков

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЦП**

LABORATORY STAND FOR STUDYING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ADC

*Рассмотрен автоматизированный стенд для исследования динамических характеристик аналого-цифровых преобразователей.*

*The report considers an automated stand for studying the dynamic characteristics of analog-to-digital converters*

*Ключевые слова: лабораторный стенд, динамические характеристики, аналого-цифровой преобразователь.*

*Keywords: laboratory bench, dynamic characteristics, analog-to-digital converter.*

Целью являлась разработка автоматизированного стенда для исследования динамических характеристик аналого-цифрового преобразователя (АЦП), обусловленных конечными значениями максимальной частоты дискретизации и времени преобразования. Функции генерации тестовых сигналов и измерения должны быть реализованы с помощью средств микропроцессорной техники. Микропроцессорный блок должен иметь автономное управление и средство отображения информации. Необходимо также было предусмотреть возможность обмена данными с персональным компьютером. Основное назначение стенда – проведение исследований параметров АЦП в рамках изучения студентами прикладных дисциплин по направлению подготовки 11.03.01 Радиотехника.

Схема устройства для измерения динамических характеристик состоит из формирователя кода, осуществляющего подачу на АЦП образцового напряжения, самого АЦП, устройства сравнения кодов, который сравнивает код выходного напряжения АЦП с кодом входного образцового напряжения, а также таймера счетчика, осуществляющего измерение времени преобразования [1, 2].

Принцип работы заключается в том, что измеряется временной интервал между импульсом запуска, который формируется командой внешнего запуска, и импульсами конца преобразования, формируемым самим АЦП. Эти импульсы записываются в таймер счетчик, который определяет время между этими импульсами, которое и является временем преобразования.

Помимо измерения времени преобразования, данная схема позволяет осуществлять измерение динамической погрешности преобразования. Данная часть схемы состоит из формирователя кодов, являющегося источником

опорного напряжения и устройства сравнения кодов на выходе АЦП. Выходное образцовое напряжение подается на АЦП, который снова преобразует данное напряжение в цифровой код, но при этом, данный цифровой код имеет погрешность преобразования, которая определяется путем сравнения кода образцового напряжения и напряжения с АЦП в устройстве сравнения кодов.

Функциональная схема стенда приведена на рис. 1.

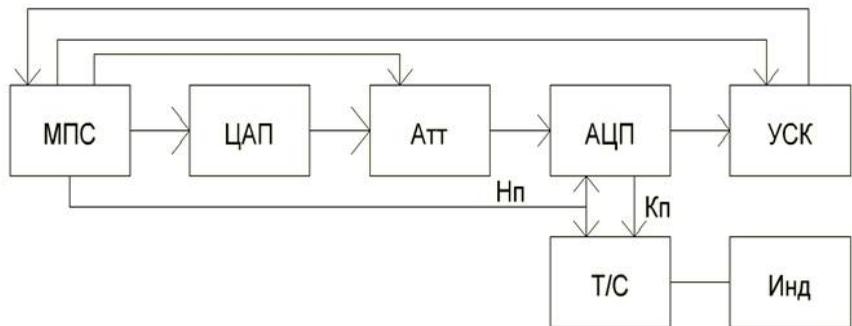


Рис. 1. Функциональная схема устройства измерения времени преобразования

Ядром схемы является микропроцессорная система (МПС), откуда данные выводятся через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на программно-управляемый аттенюатор (АтТ) для формирования требуемого диапазона входных напряжений для АЦП. МПС формирует сигнал начала преобразования (НП), который поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и таймер счетчик (Т/С). Это первый отсчет.

После окончания преобразования код числа загружается в устройство сравнения кодов (УСК). Одновременно вырабатывается сигнал конца преобразования (КП). С таймера счетчика выводится информация о времени преобразования на индикатор (Инд). Одновременно код, который загружен в устройстве сравнения кодов, передается в микропроцессор, где делается вывод о величине ошибки.

Разработанный стенд предполагается для внедрения в учебный процесс кафедры радиоэлектроники и информационно измерительной техники.

### Список литературы

1. Федорков, Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б.Г. Федорков, В.В. Телец. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Марцинкявичюс А.-Й.К. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров / А.-Й.К. Марцинкявичюс, Э.-А.К. Багданскис, Р.Л. Пошюнас и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

В.В. Петровский, Д.В. Шахтурин, А.А. Козлова  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

LABORATORY STAND FOR RESEARCH OF STATIC AND DYNAMIC  
CHARACTERISTICS OF OPTOELECTRONIC ELEMENTS

*Рассмотрен стенд для исследования статических и динамических характеристик и параметров диодных и транзисторных оптопар.*

*The report considered a stand for studying the static and dynamic characteristics and parameters of diode and transistor optocouplers*

*Ключевые слова: стенд, статические и динамические характеристики, оптоэлектронные приборы.*

*Keywords: stand, static and dynamic characteristics, optoelectronic devices.*

В работе рассмотрена автоматизированный стенд для исследования статических характеристик и параметров оптических излучателей и фотоэлектрических приемников излучения и динамических характеристик диодных и транзисторных оптопар. Оптоэлектронные элементы широко применяются в качестве элементов гальванической развязки и устройств управления связной и радиотехнической аппаратуры, систем автоматики, измерительной техники, автоматизированных систем управления, контроля и регулирования и др.

Основными составляющими разработанной системы являются:

- аппаратная часть, представляющая собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий измерение и первичную обработку данных;
- программное обеспечение.

В качестве аппаратной части могут выступать встраиваемые в персональный компьютер многофункциональные платы сбора данных, платы аналогового и цифрового ввода-вывода, платы осциллографов и генераторов, модульные устройства согласования, готовые программно-аппаратные измерительные комплексы.

Система состоит из специализированной платы, обеспечивающей подключение исследуемой оптопары, измерительной станции (NI ELVIS II) и компьютера с программным обеспечением (NI LabVIEW), осуществляющих измерение их статических и динамических характеристик и параметров.

Разработанный стенд позволяет исследовать вольтамперную характеристику светодиода и фотодиода; исследовать статическую

характеристику оптопары, определять передаточный коэффициент и динамический диапазон входных сигналов; исследовать амплитудно-частотную и переходные характеристики, определять постоянную времени оптопары.

Определение статических характеристик и параметров оптических излучателей и фотоэлектрических приемников излучения осуществляется методом амперметра-вольтметра. В соответствии с этим методом к электродам оптоэлектронного элемента подключаются управляемые источники ЭДС и с помощью измерительных приборов (вольтметров и миллиамперметров) измеряются напряжения и токи в цепях этого элемента при различных значениях ЭДС источников.

Измерения указанных характеристик и параметров осуществляется как в ручном, так и в автоматизированном режимах [1]. В автоматизированном режиме стенд подключается к системе дистанционных учебных лабораторий [2], обеспечивающей возможность управления измерениями через локальную сеть и сеть Интернет. Удаленное управление системой реализуется на основе технологии сетевого обмена DataSocket. С этой целью на измерительном сервере устанавливается специальное приложение, которое обеспечивает по протоколу DataSocket стека TCP/IP обмен потоками измерительных данных между измерительным сервером и удаленными клиентами по локальную сеть и сеть Интернет. Для выполнения измерений на стороне удаленного пользователя используется специализированное программное обеспечение Distant Lab [2], позволяющее на собрать виртуальном наборном поле схему измерения, осуществляющее коммутацию исследуемой оптопары с измерительными приборами, задание параметров сигналов и взаимодействие с измерительным сервером.

Разработанный стенд внедрен в учебный процесс кафедры радиоэлектроники и информационно измерительной техники в рамках изучения студентами дисциплины Электроника.

### Список литературы

1. *Евдокимов, Ю.К.* Автоматизированный сбор и цифровая обработка данных в измерительных системах: учебное пособие / Ю.К. Евдокимов, Е.С. Денисов, Д.В. Шахтурин [и др.]. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2012. – 163 с.
2. *Евдокимов, Ю.К.* Опыт внедрения дистанционных лабораторных практикумов по электротехническим специальностям / Ю.К. Евдокимов, А.Ю. Кирсанов, Д.В. Шахтурин [и др.] // Инженерные и научные приложения на базе технологии NI NIDays – 2014: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. (Москва, 19-20 ноября 2014 г.). – М.: ДМК-пресс, 2014. – С. 465-467.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Н.А. Стадник

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ СКЛАДСКОГО ПОМЕЩЕНИЯ**

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR ORGANIZATION OF WORKS OF THE WAREHOUSE ROOM

*Рассматривается разработка информационной системы для организации работы комплекса беспилотных погрузчиков, функционирующих на территории склада, приведено сравнение ПО имитационного моделирования и построена имитационная модель склада.*

*The article discusses the development of an information system for organizing the operation of a complex of unmanned loaders operating on the territory of a warehouse, a comparison of simulation software is given and a simulation model of a warehouse is built.*

*Ключевые слова: информационная система, имитационное моделирование, беспилотный транспорт.*

*Keywords: information system, simulation, unmanned vehicles.*

В настоящее время использование вилочных погрузчиков на складах приводит к ошибкам на производстве из-за человеческого фактора. Потери прибыли компании от утери, повреждения, списания товара составляют более 2% от товарооборота. Управление штатом вилочных погрузчиков на среднем складе требует от 100 до 200 человек рабочего персонала, за рабочий день один водитель в сумме сортирует более 1200 наименований товаров и преодолевает расстояние в 10-15 километров. Поэтому внедрение на склад комплекса беспилотных погрузчиков и разработка информационной системы организации их работ путем построения и тестирования имитационной модели приведет к увеличению производительности работы склада.

Для моделирования процессов, связанных с транспортировкой, упаковкой и хранением грузов на складе, а также с управлением и обеспечением функциональности комплекса беспилотных погрузчиков, требуется выбрать подходящее программное обеспечение для построения имитационной модели.

На сегодняшний день рынок ПО для ИМ обладает широким ассортиментом продуктов, использующихся по всему миру для решения задач ИМ в различных областях, от цепочек поставок до социальных процессов и обороны. Многообразие ПО для ИМ представлено следующими продуктами: AnyLogic, Arena, Enterprise Dynamics, ExtendSim Pro, FlexSim, GPSS World, ProModel Optimization Suite, SAS Simulation Studio, Simio Enterprise Edition, Simul8 Professional, Plant Simulation, Witness [1].

Сравнение программного обеспечения для имитационного моделирования проводилось по 5-ти объективным параметрам: количество категорий моделирования, количество совместимых программ, количество инструментов для анализа статистики, количество методов оптимизации, количество типов экспериментов, возможных для запуска. Итоговая оценка вычислялась по формуле:  $B = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$ , где  $B$  – значение итоговой оценки,  $f_{1-5}$  – значения пяти оценочных параметров соответственно.

Результаты оценки ПО приведены гистограммой на рис. 1.

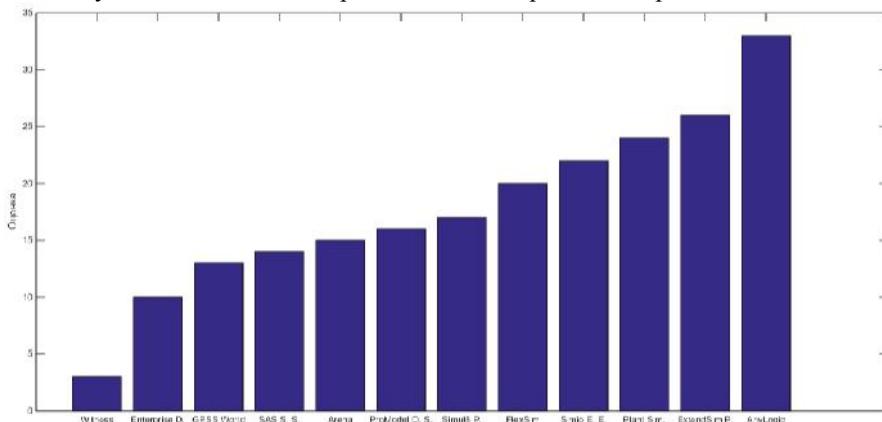


Рис. 1. Результаты оценки ПО имитационного моделирования

Лучший результат среди программ показала программная платформа для имитационного моделирования AnyLogic, поскольку является наиболее универсальной, совместимой со многим ПО, многофункциональной, обладающей широким набором инструментов по оптимизации, анализу, прогнозированию и проведению имитационных экспериментов [2].

Создание имитационной модели происходило в выбранной среде ИМ на базе модели склада транспортной компании, являющегося промежуточной точкой в системе грузоперевозок. Количественный масштаб симуляции относительно проектируемой модели уменьшен в целях ресурсосбережения и приемлемой скорости визуальной демонстрации работы имитационной модели.

Имитационная модель склада визуально представляет собой помещение, разграниченное на следующие зоны: зона поставки грузов, зона отправки грузов, зона ожидания отправки, 16 зон хранения грузов для 16 типов грузов, зона простоя погрузчиков. Зона поставки грузов включает в себя 5 точек поставки для грузовых автомобилей и 150 паллет для хранения грузов. Зона отправки грузов включает в себя 7 точек отправки для грузовых автомобилей и 252 паллеты для хранения грузов. Зона ожидания отправки включает в себя 90 паллет для хранения грузов. Каждая из зон хранения состоит из 380 паллет. Зона простоя погрузчиков вмещает 44 единицы беспилотных погрузчиков. Каждый прибывающий или отбывающий грузовик вмещает в себя не более 15

грузов, за час к складу прибывает по 10 грузовиков для погрузки и для выгрузки товара. Каждый из убывающих грузовиков увозит со склада не менее 10 грузов.

Модель склада имитационной модели представлена на рис. 2.

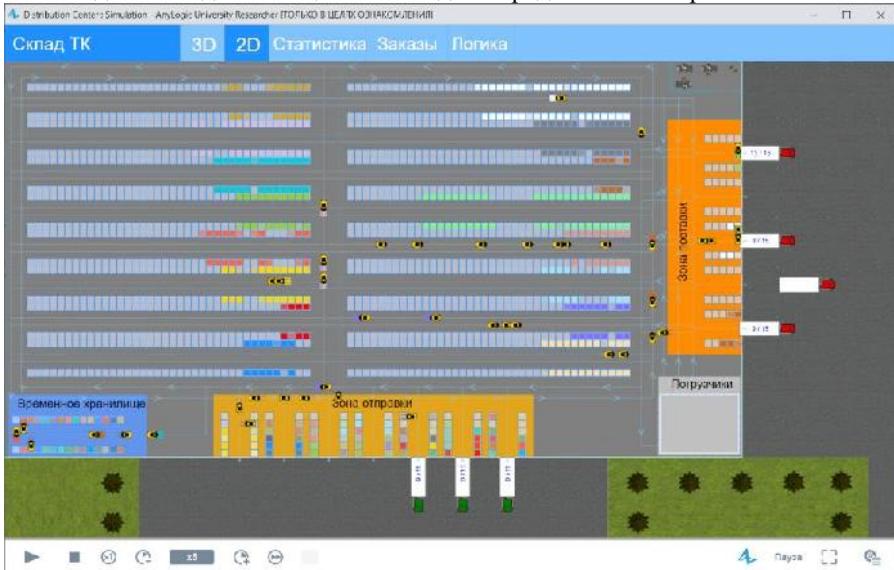


Рис. 2. Двумерная модель помещения склада

Логика работы имитационной модели представлена на рис. 3.

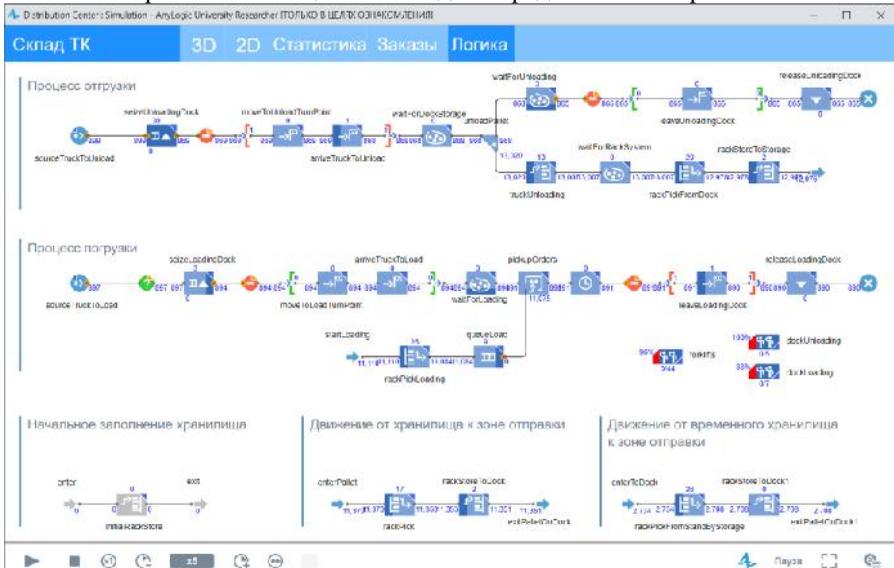


Рис. 3. Логика работы имитационной модели

В ходе тестирования имитационной модели на обработке 10000 заказов были получены следующие статистические показатели, представленные на рис. 4.

Параметры запуска имитационной модели																
Кол-во	БШП			Типы грузов			Докип поставки			Докип отправки						
	44			16			5			7						
Параметры эксперимента по имитационному моделированию																
Кол-во	БШП для отгрузки		БШП для погрузки		Поставки в час	Отправки в час	Заказы в час	Размер грузовика	Мин. заказ	Макс. заказ						
	10		10		10	10	10	15	10	15						
Среднее время процессов																
Время (сек.)	Разгрузка грузовика		Загрузка грузовика		Ожидание сборки заказа	Сборка заказа	Ожидание погрузки заказа	Опускание паллет	Поднятие паллет							
	89		116		45	78	37	20	24							
Средний объем использования																
Объем (доли %)	Комплекс БПП			Хранилища			Зона поставки			Зона отправки						
	0.97			0.42			0.99			0.91						
Средняя доля заказов																
Доля (доли %)	Очередь				Ждут перевозки				Ждут погрузки							
	0.57				0.04				0.35							
Среднее количество грузов в хранилищах по их типам																
Кол-во	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	96	309	62	21	139	235	81	47	81	85	345	64	380	124	380	169

Рис. 4. Статистические показатели работы имитационной модели

Исходя из полученных статистических данных, проанализировав средний объем использования комплекса БПП, хранилищ, зон поставки и отправки, можно сделать вывод, что спроектированная имитационная модель работает с высокой стабильностью, однако имеет высокую загруженность. Для исключения застоев в процессе транспортировки для данной имитационной модели рекомендуется увеличить количество паллет в зоне поставки до 160, а количество погрузчиков в комплексе БПП до 50.

Таким образом, проектирование и анализ работы имитационной модели склада транспортной компании с интегрированным комплексом беспилотных погрузчиков доказывает, что данная имитационная модель способна оптимизировать работу по транспортировке грузов на территории склада. В связи с этим, разработанная информационная система способна оптимизировать работу склада за счет автоматизации транспортировки грузов.

### Список литературы

1. Якимов, И.М. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования по модели М/М/5./ И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин // Вестник Казан. технол. ун-та. – Казань, 2017. – Т.20. – №16. – С.113.
2. Боев, В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: монография / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – С.349-351.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

Н.И. Фаттахов, З.Х. Захарова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРОВЕРКИ СОТРУДНИКОВ НА ЗАЩИЩЕННОСТЬ ОТ ФИШИНГА**

### **INFORMATION SYSTEM FOR CHECKING EMPLOYEES FOR PHISHING PROTECTION**

*Дано определение понятия «фишинг». Приведены схемы алгоритма работы фишинг-системы для повышения информационной безопасности организации, а также реализация основных сущностей и функций информационной системы (ИС) проверки сотрудников на защищенность от фишинга. Определены основные тенденции развития ИС, а также предполагаемая эффективность ее работы.*

*The definition of the concept of "phishing" is given. The schemes of the algorithm of the phishing system to improve the information security of the organization, as well as the implementation of the main entities and functions of the information system (IS) for checking employees for phishing protection are presented. The main trends in the development of IP, as well as the expected efficiency of its work, have been determined.*

*Ключевые слова: информационная система, информационная безопасность, защита организации.*

*Keywords: information system, information security, organization protection, phishing.*

Несомненно, информационная безопасность в современном мире является одним из важнейших элементов инфраструктуры компании.

При несоблюдении правил информационной безопасности предприятие рискует лишиться конфиденциальности своих данных. Конфиденциальная информация предприятия является достаточно широким понятием, в неё могут входить как данные о пользователях информационной системы, так и информация, составляющая коммерческую тайну предприятия. Ущерб, причиняемый утечкой информации, невозможно спрогнозировать заранее. Он может выражаться в незначительной сумме, но в некоторых случаях приводит к полной неспособности компании вести деятельность [1]. В корне проблемы несоблюдения правил информационной безопасности лежит человеческий фактор и неосведомленность о всех способах интернет-мошенничества [2].

Одним из самых распространённых способов мошенничества в интернете является фишинг (англ. phishing). Данный вид злоумышленных действий представляет собой способ получения конфиденциальной информации пользователя посредством рассылки электронных писем, содержащих ссылку

на поддельный сайт. После перехода пользователя по ссылке события могут протекать разными способами. В самом безобидном случае, с помощью психологического воздействия, злоумышленники могут попытаться заставить пользователя ввести свои конфиденциальные данные, тем не менее последствия могут быть и более серьезными: например, на персональный компьютер пользователя может быть скачана вредоносная программа, которая в свою очередь может вывести из строя всех участников локальной сети предприятия [3].

Для предотвращения таких ситуаций компании необходимо как можно тщательнее подготавливать своих сотрудников, а в крайнем случае и вовсе ограждать неответственных лиц от доступа к конфиденциальным данным [4].

Этим и обуславливается необходимость и актуальность разработки информационной системы проверки сотрудников на способность обнаруживать злоумышленные действия, далее именуемой фишинг-системой.

В данной статье предлагается рассмотреть простейшую реализацию алгоритма работы фишинг-системы.

Систему с минимальным набором функций можно реализовать с помощью следующих сущностей:

1. Рассылка – основная сущность фишинг-системы. Данная сущность является суперклассом для фишинг-писем.

2. Доменное имя – сущность, необходимая для создания рассылки и содержит данные для отправки письма с «подозрительного» адреса. Сущность имеет ряд полей для авторизации на выбранном почтовом сервере.

3. Шаблон письма – сущность, необходимая для создания рассылки и содержит все необходимые функции и мета-данные для того, чтобы отследить поведение сотрудника.

4. Фишинг-письмо – данная сущность представляет собой письмо, которое будет отправлено пользователю, имеет уникальный идентификатор.

5. Письмо безопасности - сущность, создаваемая при условии, что пользователь переслал фишинг-письмо в отдел безопасности. Содержит данные о пересланном письме, пользователе и мета-данные.

Алгоритм работы фишинг-системы проще всего проиллюстрировать с помощью диаграммы метода IDEF3 [5], представленной на рис. 1.

Для реализации данного алгоритма необходимо решить следующие нетривиальные задачи:

1. отслеживание открытия письма,
2. отслеживание перехода по ссылке,
3. отслеживание о сообщении сотрудником в отдел информационной безопасности.

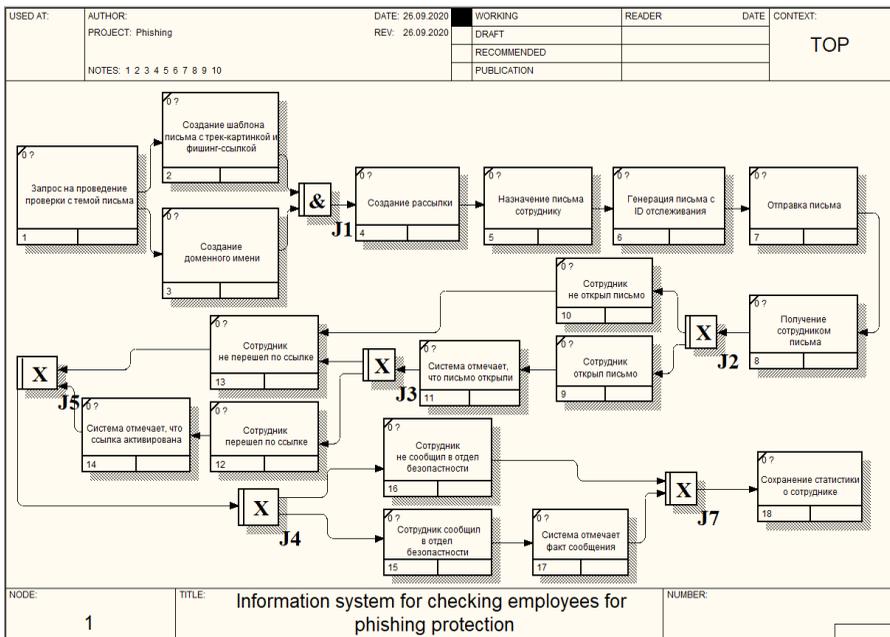


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма работы фишинг-системы

При решении первой задачи предлагается использовать GET-запросы. В шаблон письма вложена ссылка на метод, возвращающий с сервера картинку. Мета-данные ссылки содержат идентификатор отправленного письма, по которому можно определить проверяемого сотрудника. При открытии сотрудником письма активируется ссылка, после чего сервер отправляет в ответ картинку, а система в свою очередь передает мета-данные в параметры функции отметки. Метод отметки идентифицирует сотрудника по уникальному ID письма (переданного в качестве мета-данных), и обновляет соответствующий пункт статистики сотрудника.

Вторая задача решается аналогично, за исключением того факта, что вместо отправки в ответ сервером картинки, происходит перенаправление сотрудника на официальный сайт «симулируемой» организации.

Для определения факта отправки пользователем письма в отдел информационной безопасности, предлагается следующий алгоритм:

1. С указанным интервалом на сервере включается метод получения всех писем с почтового сервера отдела информационной безопасности.
2. Производится сортировка писем по признаку содержания мета-данных, связанных с фишингом.
3. Для каждого письма производится идентифицирование сотрудника;
4. Обновляется соответствующий пункт статистики сотрудника.
5. Производится удаление обработанных писем с почтового сервера.

Реализация, рассматриваемая в данной статье, не претендует на оптимальность и требует доработки, однако уже в таком виде способна во много раз улучшить подготовленность сотрудников к фишингу, и позволяет качественнее оценивать защищенность конфиденциальных данных организации. С точки зрения совершенствования такой системы можно рассмотреть такие ее модернизации, как: определение скорости реагирования сотрудников, отслеживание использования сотрудниками «подозрительных» флэш-накопителей, отслеживание сотрудниками скачивания вредоносных программ и т.д.

В заключение можно сделать следующий вывод: использование предприятиями фишинг-систем, для обучения своих сотрудников правилам информационной безопасности, могут в несколько раз повысить защищенность компании, и тем самым обеспечить не только целостность и неприкосновенность хранимых данных, но и сохранить экономический потенциал предприятия.

### Список литературы

1. Bitcop: [сайт] – Москва, 2020. – URL: <https://bitcop.ru> – Обеспечение информационной безопасности предприятия: потенциальные угрозы и средства защиты от них (дата обращения: 24.09.2019). – Текст: электронный.
2. Интегрус: [сайт] – Санкт-Петербург, 2018. – URL: <https://integrus.ru/> Защищенность конфиденциальной информации в организации (дата обращения: 24.09.2019). – Текст: электронный.
3. Горлов, А.П. Автоматизированная система оценки эффективности программно-аппаратных средств защиты информации / Горлов А.П., Рытов М.Ю., Лысов Д.А. // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении - 2019г. №2.
4. Тумбинская, М. В. Защита информации на предприятии : учебное пособие / М. В. Тумбинская, М. В. Петровский. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 184 с. — ISBN 978-5-8114-4291-1. — Текст : электронный / Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/130184> (дата обращения: 24.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Гвоздева, Т.В. Проектирование информационных систем: технология автоматизированного проектирования. Лабораторный практикум: учебно-справочное пособие / Е.В.Гвоздева, Б.А. Баллод. — 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. — 156 с. — ISBN 978-5-8114-5147-0. — Текст : электронный / Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/133477/#2> (дата обращения: 24.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
ДЛЯ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА  
С ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРОЙ**

**AUTOMATED MEASURING SYSTEM FOR QUASI-DISTRIBUTED  
RESISTIVE SENSOR WITH TREE STRUCTURE**

*Представлено описание квазираспределенного резистивного датчика с древовидной структурой. Разработана структурная схема автоматизированной системы для получения измерительной информации с предложенного квазираспределенного резистивного датчика. Разработанная измерительная система позволяет проводить измерения полей физических величин различной природы.*

*The paper presents a description of the quasi-distributed resistive sensor with tree structure. A block diagram of an automated measuring system based on the proposed quasi-distributed resistive sensor for measuring the distribution of a physical quantity field is presented.*

*Ключевые слова: квазираспределенный резистивный датчик, древовидная структура, измерение физических полей.*

*Keywords: quasi-distributed resistive sensor, tree structure, measurement of physical fields.*

В процессе контроля и оценивания состояния физических объектов возникает необходимость измерения распределения физической величины по поверхности исследуемого объекта. Для этих целей применяют различного рода измерительные системы [1-4]. Самой простой системой является использование большого количества однотипных датчиков для измерения распределения поля физической величины по поверхности исследуемого объекта. Однако такой метод является затратным с технической и экономической стороны, т.к. каждый датчик в такой системе представляет из себя отдельную измерительную системы с датчиком и измерительным каналом. Другой метод основан на применении распределенных датчиков [1, 2]. Однако такие датчики имеют недостаток, связанный со сложностью способа проведения измерений и последующей обработки полученной измерительной информации.

Для проведения измерений распределения физической величины по поверхности исследуемого объекта в основном применяют квазираспределенные резистивные датчики (КРРД) [3, 4]. Широкое распространение получили КРРД с матричной структурой [4]. Также

возможно применение сеточной структуры [3]. Однако такие датчики обладают рядом недостатков. В матричной структуре возможно возникновение перекрестных помех, а также датчик с такой структурой невозможно реализовать однослойным, т.к. необходимо исключить пересечение линии строй и линии столбцов [4]. У КРРД с сеточной структурой недостатком является сложность проведения измерений, а также увеличение погрешности определения значений сопротивлений внутренних чувствительных элементов с ростом количества чувствительных элементов.

Для обеспечения меньшей погрешности при проведении измерений, а также обеспечения возможности изготовления датчика однослойным, предложен КРРД с древовидной структурой [5]. На рис.1. представлена одна из возможных реализаций КРРД с древовидной структурой.

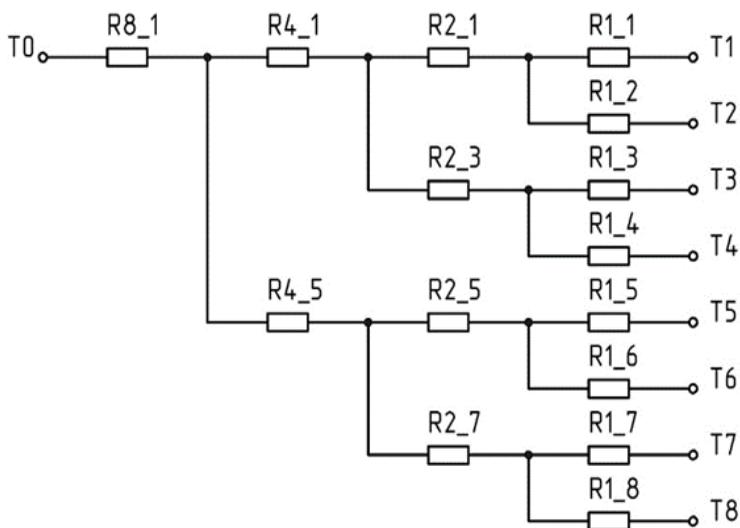


Рис. 1. КРРД с древовидной структурой

Определение значений сопротивлений резистивных чувствительных элементов для представленной структуры схож с четырехпроводным методом измерения сопротивлений, когда обеспечиваются различные пути протекания для зондирующего и измерительного токов.

Для представленной на рис. 1 структуры применено следующее обозначение чувствительных элементов:  $R_{i_j}$  – общее обозначение сопротивления чувствительного элемента, в котором  $i$  указывает на столбец в КРРД (номера столбцов удобнее брать в величинах значений степени двойки  $i=2^k - 1, 2, 4, 8, \dots$  и считать в направлении справа налево), а  $j$  указывает номер терминала, к которому подключается один из выводов источника зондирующего тока, при этом другой вывод источника зондирующего тока

можно соединить с терминалом T0. При этом формула для определения значения сопротивления чувствительного элемента выглядит следующим образом:

$$Ri\_j = \frac{T(j + (-1)^{\text{mod}(j/i)} \cdot i) - T(j + \text{int}(i/2))}{I_0}, \quad T(j) \rightarrow GND \quad (1)$$

где  $T(n)$  – значение напряжения на соответствующем терминале  $n$ ;  $I_0$  – величина зондирующего тока;  $\text{int}()$  – указывает на взятие целой части;  $\text{mod}()$  – указывает на взятие остатка от деления.

Формула (1) не выполняется для чувствительного элемента R8\_1, непосредственно подключенного к терминалу T0. В этом случае справедлива следующая формула:

$$Ri\_j = \frac{T(0) - T(j + \text{int}(i/2))}{I_0}, \quad T(j) \rightarrow GND. \quad (2)$$

Анализ формул (1) и (2) показывает, что измерительная процедура для предложенного КРПД с древовидной структурой не требует значительных вычислительных затрат.

Для проведения измерений поля физической величины с помощью КРПД с древовидной структурой разработана структурная схема автоматизированной измерительной системы, которая представлена на рис. 2.

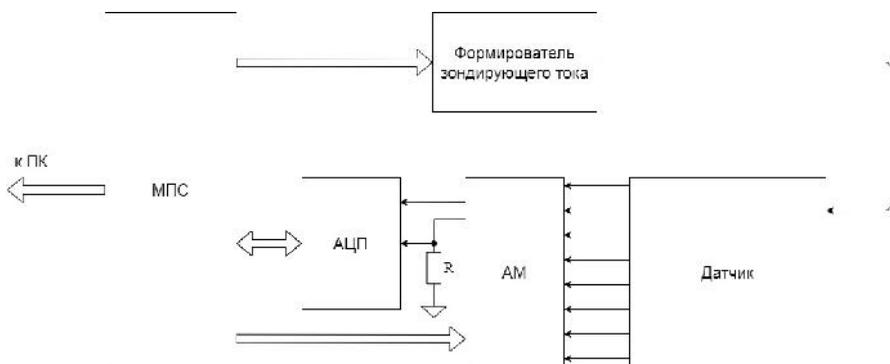


Рис. 2. Структурная схема для проведения автоматизированных измерений поля физической величины с помощью КРПД с древовидной структурой

Схема измерения (см. рис. 2) состоит из самого КРРД с древовидной структурой, аналогового мультиплексора (АМ) для обеспечения коммутации терминалов датчика к общей шине через шунт R, а также коммутации остальных терминалов к входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Формирователь зондирующего тока обеспечивает требуемый зондирующий ток через датчик. Величина зондирующего тока контролируется с помощью АЦП и шунта R. Управление процессом измерения осуществляется с помощью микропроцессорной системы (МПС). После проведения измерения полученные результаты отправляются на компьютер (ПК) для последующей обработки.

Предложенная автоматизированная измерительная система для КРРД с древовидной структурой позволяет проводить измерения распределения поля физической величины. При этом обеспечивается возможность уменьшения погрешности измерения сопротивлений чувствительных элементов по сравнению с другими известными структурами за счёт четырехпроводного метода измерения сопротивлений. Также из-за особенности древовидной структуры предложенный КРРД может быть реализован однослойным.

#### Список литературы

1. Мохаммед, Х.С.А. Полупроводниковый одномерный распределенный датчик температурного поля: численный алгоритм и его программа реализация / Ю.К. Евдокимов, Х.С.А. Мохаммед, Л.Д. Храмов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2018. - №4. – С. 118-122.
2. Евдокимов, Ю.К. Математическая модель и измерительный алгоритм непрерывно распределенного полупроводникового датчика профиля температуры в неизотермических потоках/ Ю.К. Евдокимов, Х.С.А. Мохаммед, Л.Д. Храмов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. –2019. –Т. 21. – № 1-2. – С. 146-153.
3. Denisov E., Adiutantov N., Evdokimov Y.K., Salakhova A., Timergalina G., Nikishin T., Martemianov S., Thomas A. Quasi-distributed resistive sensor for steady-state field measurements // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016. pp. 1-5.
4. Vidal-Verdú F., Oballe-Peinado Ó., Sánchez-Durán J.A., Castellanos-Ramos J., Navas-González R. Three Realizations and Comparison of Hardware for Piezoresistive Tactile Sensors // Sensors, Nov 2011. pp. 3249-3266.
5. Денисов, Е.С. Однослойный квазираспределенный резистивный датчик / Е.С. Денисов, И.Д. Шафигуллин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 510-512.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ»**

**SIMULATION OF MECHATRONIC SYSTEMS AND ELECTRIC DRIVE  
WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS, ELECTROMECHANICAL  
AND ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND DEVICES**

DOI: 10.51932/9785907271739\_146

УДК 681.533.36

Д.В. Барабанов, В.А. Хвостов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСА  
МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА С УПРАВЛЕНИЕМ  
ПО ПОЛОЖЕНИЮ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ЗАСЛОНКИ**

**FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF THE MAIN OIL PIPELINE  
PUMP WITH CONTROL BY THE POSITION OF THE CONTROL VALVE**

*Рассматривается возможность комбинированного управления давлением на выходе насоса магистрального нефтепровода в переходных процессах, обеспечивающая требуемое быстродействие с помощью заслонки при повышении давления и эффективность управления частотно-регулируемым электроприводом при его снижении.*

*The possibility of combined pressure control at the outlet of the main oil pipeline pump in transient processes is considered, which provides the required speed with the help of a valve, when the pressure increases, and the efficiency of controlling a frequency-controlled electric drive, when it decreases.*

*Ключевые слова: комбинированное управление давлением, магистральный нефтепровод, заслонка, частотно-регулируемый электропривод.*

*Keywords: combined pressure control, oil pipeline pump, valve, frequency-controlled electric drive.*

Использование вместо регулирующих заслонок частотно-регулируемого электропривода эффективно в процессах, где нет существенных требований к быстродействию. Мощный электродвигатель обладает большой механической инерцией, поэтому не может быстро снижать скорость вращения и давление на выходе насоса для снижения скачков давления, обусловленных теми или иными причинами. Для того, чтобы сохранить быстродействие ухода от волн и скачков давления, предлагается сохранить для реакции на них регулирование заслонкой, а для эффективной работы в режимах, где нет требований к быстродействию использовать регулирование давления изменением скорости вращения насоса, добиваясь в таких режимах работы на полностью открытую заслонку.

Для исследования предлагаемой комбинированной системы регулирования давления разработана ее модель, состоящую из двух замкнутых систем регулирования: системы регулирования давления по отклонению от заданного значения изменением положения заслонки и системы регулирования скоростью двигателя по отклонению положения заслонки от открытого состояния и по отрицательному заданию на скорость заслонки, когда она полностью открыта.

На рис. 1 представлена разработанная модель комбинированной системы. Она состоит из подсистемы заслонки, в которой учитывается ее инерционность, трубопровода с учетом инерции процессов изменения давления при тех или иных возмущениях, и электропривода насоса, в котором соответственно учтена его инерция. Задающим сигналом для насоса является отклонение заслонки от открытого состояния.

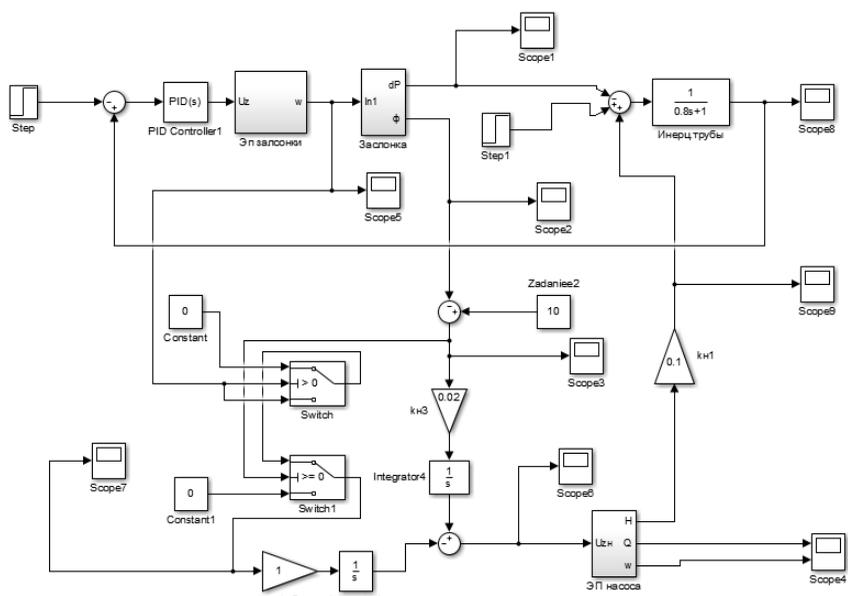
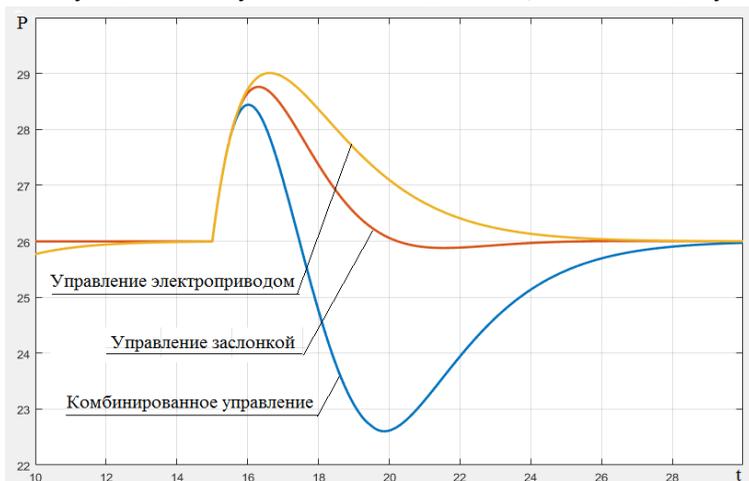


Рис.1. Комбинированная система управления давлением

Заслонка является исполнительным органом при скачках давления, закрываясь на этапе фронта волны и открываясь после ее прохождения. При этом по степени закрытия заслонки двигатель через Integrator4 получает задание на снижение скорости. Если заслонка открылась полностью, но давление требуется снижать дальше, двигатель делает это под управлением сигнала на снижение скорости через Integrator1. С помощью ключей управление двигателем на снижение скорости поступает только в случае полностью открытой заслонки и отрицательного задания скорости на ее дальнейшее открытие.

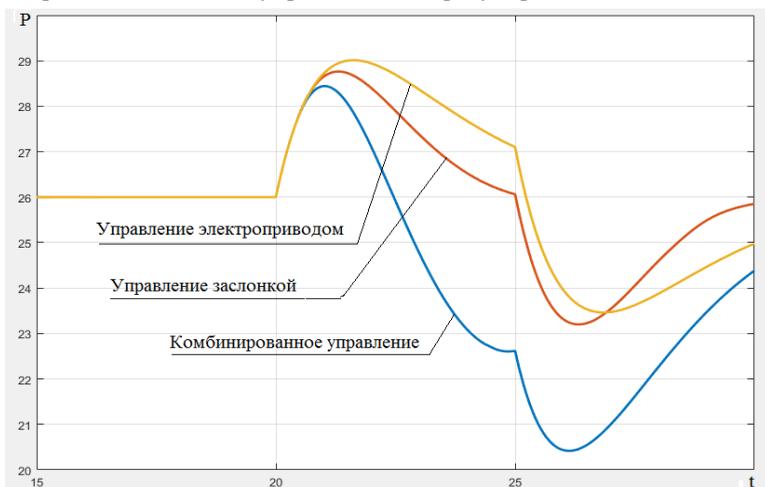
На рис.1 показаны результаты моделирования при скачке давления. Из приведенных результатов следует, что наиболее эффективный выход из

области повышенного давления имеет место в комбинированной системе. Система практически за 2 с снижает давление до заданного значения, в то время как в раздельном регулировании этот процесс затягивается до 5 с при управлении только заслонкой и до 10 с при управлении только электроприводом насоса. Перерегулирование при комбинированном управлении уводит систему в пониженное давление, что вполне допустимо.



*Рис.1. Реакция системы управления на скачкообразное возмущение*

На рис.2 показана реакция системы регулирования на импульсное воздействие. Приведенные графики подтверждают вывод об эффективности комбинированной системы управления для регулирования давления.



*Рис.2. Реакция системы управления на импульсное возмущение*

*Материал поступил в редколлегию 16.10.20.*

Д.В. Барабанов, А.А. Пугачев  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ И ИМПУЛЬСНО-КЛЮЧЕВЫМ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА**

**SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE WITH AN INDUCTION MOTOR  
AND ROTOR RESISTANCE PULSE CONTROL**

*Приведены результаты моделирования асинхронного двигателя с импульсно-ключевым регулированием сопротивления ротора и сравнительный анализ результатов моделирования математической модели и модели SimPowerSystem.*

*The results of modeling an induction motor with impulse-key regulation of the rotor resistance and a comparative analysis of the results of modeling the mathematical model and the SimPowerSystem model are presented.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, система управления, импульсно-ключевое регулирование, сопротивление ротора, моделирование.*

*Keywords: induction motor, control system, pulse regulation, rotor resistance, simulation.*

Асинхронные двигатели являются основным потребителем электроэнергии в промышленном электроприводе. Проблема разработки регулируемого в широком диапазоне частоты вращения электропривода до сих пор не утратила своей актуальности [1]. В ряде случаев применение находят асинхронные двигатели с фазным ротором, у которых помимо традиционных методов регулирования, имеется возможность уменьшения частоты вращения за счет регулирования добавочного сопротивления в цепи ротора или применения схемы электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых имеет поворотный статор [2, 3, 4]. Сравнивая два последних метода, можно заключить что регулирование добавочного сопротивления в цепи ротора обеспечивает управление частотой вращения в замкнутой системе в общем случае при лучшем массо-габаритных показателях.

Импульсно-ключевое регулирование добавочного сопротивления в роторной цепи в отличие от реостатного метода позволяют плавно и бесконтактно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя. При применении этого метода управления можно регулировать частоту вращения в довольно широком диапазоне и получать требуемые механические характеристики.

На рис. 1, а приведены механические характеристики двигателя мощностью 15 кВт при естественном сопротивлении обмотки ротора и при

таком сопротивлении, которое обеспечивает равенство пускового и критического моментов. На рис. 1, б показаны механические характеристики при введении добавочного сопротивления в обмотку ротора с помощью неуправляемого выпрямителя и ключевого элемента, полученные в Matlab Simulink и SimPowerSystems. Математическая модель в Simulink собрана по дифференциальным уравнениям обобщенной электрической машины. Различия в полученных результатах объясняются появлением полупроводниковых устройств и возникшей из-за этого несинусоидальностью тока ротора.

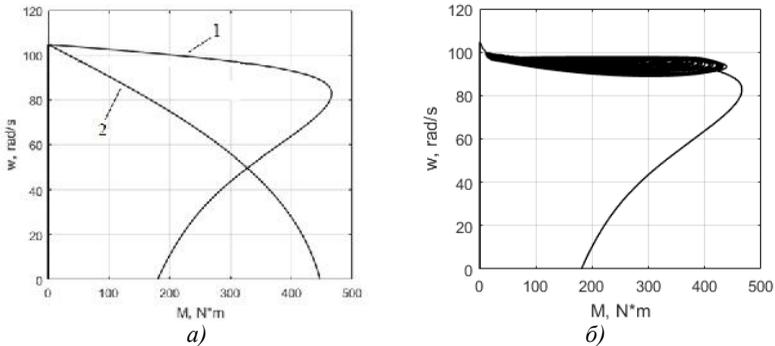


Рис. 1. Механические характеристики двигателя, 1 – при естественном сопротивлении обмотки ротора, 2 – при сопротивлении, которое обеспечивает равенство пускового и критического моментов

Функциональная схема асинхронного двигателя с импульсно-ключевым регулированием представлена на рис. 2.

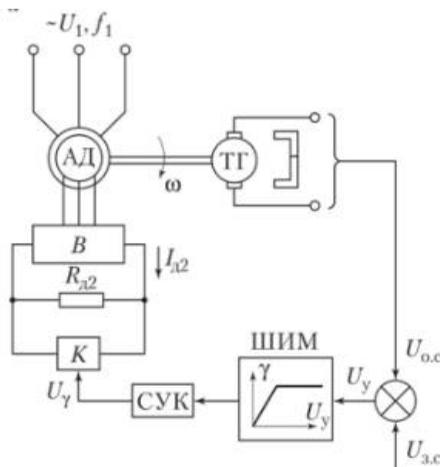


Рис. 2. Функциональная схема асинхронного двигателя с импульсно-ключевым регулированием скорости

В роторную цепь асинхронного двигателя (АД) включен неуправляемый трехфазный выпрямитель (В), к выходу которого подключен резистор  $R_{д2}$ . Параллельно резистору включен управляемый ключ К (коммутатор). Управление ключом происходит от широтно-импульсного модулятора (ШИМ), на вход которого поступают сигналы задания  $U_{з.с}$  и обратной связи  $U_{о.с}$  по скорости с датчика скорости (ТГ). После генерации ШИМ импульсов управления, эти импульсы с помощью схемы управления ключом (СУК) распределяются по тиристорам ключа и вызывают периодическое включение и закорачивание резистора  $R_{д2}$ .

Для возможности регулирования частоты вращения с заданной погрешностью в систему управления необходимо ввести регулятор, который можно рассчитать по формуле:

$$k_{pc} \geq \frac{U_{max} \cdot \Delta R}{k_{oc} \cdot \Delta \omega \cdot R_{max}},$$

где  $U_{max}$  – максимальное задание на частоту вращения;  $\Delta R$  – изменение добавочного сопротивления, обеспечивающего заданную погрешность регулирования частоты вращения  $\Delta \omega$ ;  $k_{oc}$  – коэффициент обратной связи по частоте вращения;  $R_{max}$  – добавочное сопротивление, обеспечивающее диапазон регулирования частоты вращения при максимальном моменте сопротивления.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования (на рис. 3: пуск произведен на холостом ходу, затем в 3 с момент сопротивления ступенчато увеличен до значения  $M_c = 0.7 \cdot M_n$ , в 3.5 с момент сопротивления ступенчато увеличен до значения  $M_c = M_n$ ; на рис. 4: пуск произведен при максимальном задании на частоту вращения и номинальном моменте сопротивления, в момент времени 3 с задание на частоту вращения ступенчато уменьшено до значения  $0.8 \cdot \omega_{max}$ , в момент времени 3.5 с момент сопротивления ступенчато уменьшен до значения  $M_c = 0.7 \cdot M_n$ ). Частота коммутации добавочного сопротивления 1 кГц.

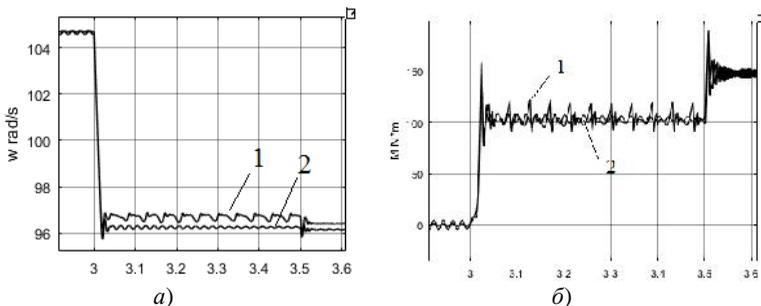


Рис. 3. Результаты моделирования электропривода (а – частота вращения, б – момент двигателя), 1 – модель SimPowerSystem, 2 – модель Simulink

Из рис. 3 и 4 очевидно, что система управления обрабатывает изменения нагрузки с малой погрешностью, не превышающей заданную (при расчете была задана ошибка 4 % от максимальной частоты вращения) и изменения задания на частоту вращения в заданном диапазоне 1:2. Колебания момента двигателя на графиках, полученных в SimPowerSystem, объясняются наличием полупроводников в обмотке ротора (рис. 2) и высокочастотной коммутацией добавочного сопротивления. В модели Simulink подобные явления отсутствуют. Слабое демпфирование колебаний частоты вращения связано с малым моментом инерции механической части (рисунки 3, а и 4, а).

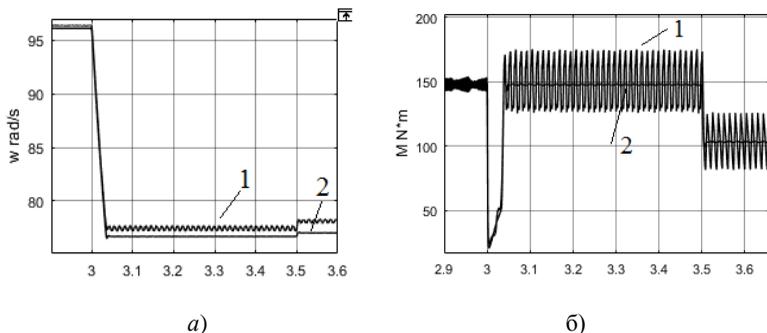


Рис. 4. Результаты моделирования электропривода (а – частота вращения, б – момент двигателя), 1 – модель SimPowerSystem, 2 – модель Simulink

Таким образом, моделирование электропривода с асинхронным двигателем и импульсно-ключевым регулированием сопротивления ротора подтвердило возможность применения данного метода для регулирования частоты вращения в нешироком диапазоне частот. Основными недостатками являются необходимость в наличии асинхронного двигателя с фазным ротором и рост потерь мощности при увеличении диапазона регулирования частоты вращения.

#### Список литературы

1. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. - Изд. 2-е, стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
2. Космодамианский, А.С. Дифференциальные уравнения асинхронного электропривода с поворотным статором / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // НТТ – наука и техника транспорта, № 3 – 2008. – С. 50 – 55
3. Браславский, И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов / И.Я. Браславский // Электротехника – 1998г. – № 8. – С. 2 – 6.
4. Космодамианский, А.С. Электроприводы вспомогательных механизмов подвижного состава / А.С. Космодамианский [и др.] // Технические, экономические и экологические проблемы транспорта: материалы международной научной конференции, Брянск: БФ РГОТУПС, 2008. Т. 2. – С. 24 – 32.

Материал поступил в редколлегию 19.10.20.

Е.С. Гаврилов, В.А. Хвостов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ С АДАПТИВНЫМ МОДАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ**

**AUTOMATIC PRESSURE CONTROL SYSTEM  
IN A TRUNK PIPELINE WITH AN ADAPTIVE MODAL CONTROLLER**

*Рассматривается возможность применения адаптивного модального регулятора для управления заслонкой в магистральном нефтепроводе, обеспечивающего регулирование давления при переходных процессах с оптимальной траекторией.*

*The possibility of using an adaptive modal regulator to control the valve in the oil trunk pipeline, which provides pressure control during transients with an optimal trajectory, is considered.*

*Ключевые слова: адаптивный модальный регулятор, магистральный нефтепровод, заслонка, регулирование давления, оптимальная траектория.*

*Keywords: adaptive modal regulator, oil trunk pipeline, valve, pressure control, optimal trajectory.*

Основной проблемой для внедрения автоматической настройки систем управления электроприводом заслонки является существенная нелинейность, связанная с тем, что при равных скоростях перемещения заслонки скорость изменения перепада давления существенно разная. Для устранения влияния нелинейности при настройке системы вводят в алгоритм коррекцию задания на скорость движения заслонки [1]. Если настройка по переходному процессу сделана при открытой заслонке, то прикрывая заслонку задание на скорость снижают. Если настройка делалась при закрытой заслонке, то при более открытой заслонке задание на скорость увеличивают.

При модальном управлении можно реализовать адаптивный регулятор, который по эталонной модели переходного процесса автоматически вводит коррекцию на основе разницы сигналов на выходе эталонной модели и объекта регулирования [2].

Подобный подход создаст некоторые задержки при расчете воздействия с учетом положения заслонки, однако, учитывая относительно медленный характер изменения угла заслонки по сравнению с расчетом в современных контроллерах, такие задержки не приведут к существенным изменениям в характере движения в целом.

Для оценки возможностей применения модального адаптивного регулятора для поддержания требуемого давления в переходных процессах, возникающих в магистральных нефтепроводах, построена с помощью приложения Simulink Matlab модель такой системы (рис. 1).

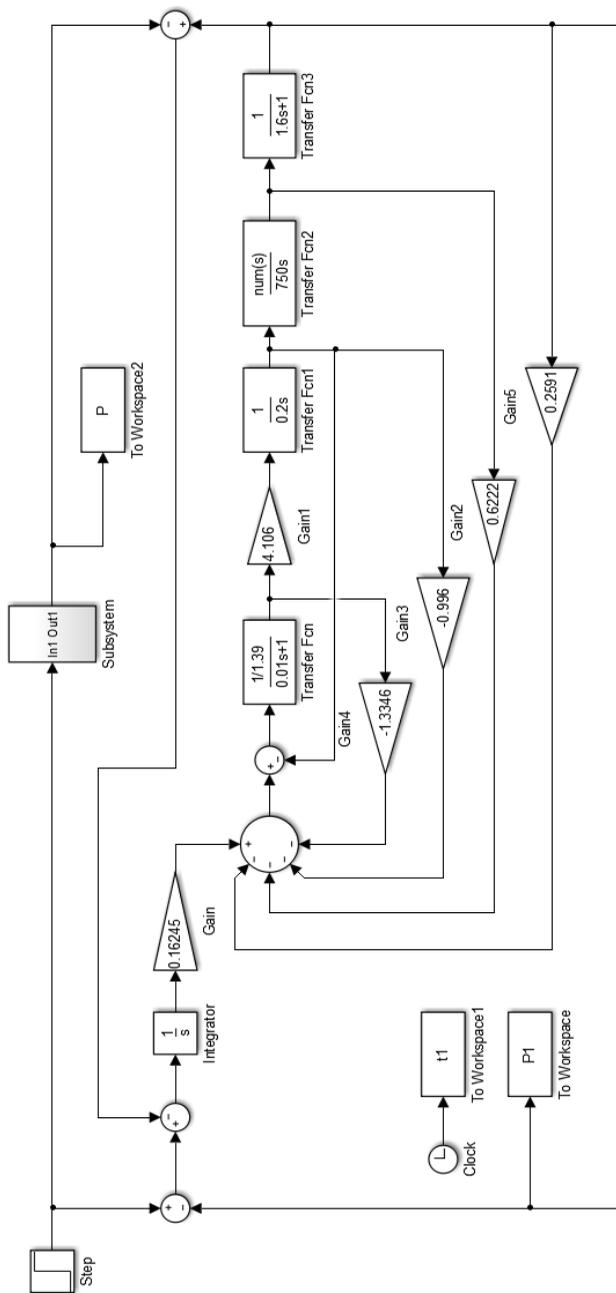


Рис.1. Модель системы управления застопкой

На рис.2 приведены результаты моделирования переходного процесса, соответствующего единичному ступенчатому заданию на входе.

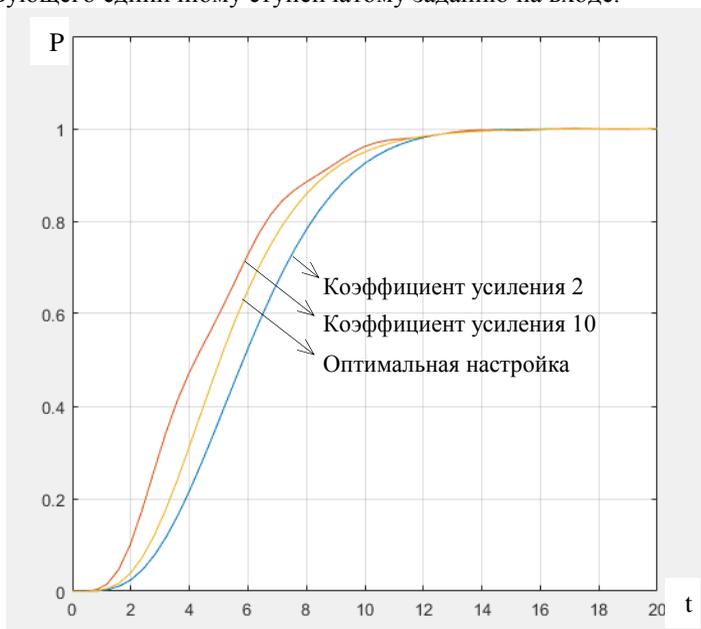


Рис.2. Результаты моделирования процесса регулирования давления

Эталонная модель Subsystem (см. рис.1) представляет собой копию объекта с коэффициентом усиления заслонки, для которого рассчитаны параметры модального регулятора, обеспечивающие биномиальное распределение корней характеристического уравнения. Объект имеет такой же модальный регулятор и дополнен контуром адаптации.

Результаты моделирования на рис.2 показывают, что при изменении в широких пределах коэффициентов усиления в объекте, вызванных нелинейностью заслонки, происходит адаптация объекта к изменяющимся условиям. Отклонение времени регулирования в небольших пределах не скажется существенным образом на работе всей системы в целом. Наличие интегрального регулятора на входе повышает на единицу порядок модального регулятора, но при этом обеспечивает астатическое регулирование перепада давления на выходе заслонки.

#### Список литературы

1. Патент РФ № 2578297. Способ и устройство настройки системы автоматического регулирования давления (САРД) в магистральном трубопроводе для перекачивания нефтепродуктов / Е.С.Слива, А.Ю.Мартынов, А.Н.Ченцов., С.В.Фокин, В.М.Оралов; заявка 2014136200/02, 05.09.2014

2. Григорьев, В.В. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. / В.В.Григорьев, Н.В.Журавлёва, Г.В.Лукьянова, К.А.Сергеев. — Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2007. — 108 с.

*Материал поступил в редколлегию 16.10.20.*

Ш.Т. Дадабаев

(Республика Таджикистан, г. Худжанд, Худжандский политехнический институт таджикского технического университета имени академика М.С. Осими)

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НИЗКОМ КАЧЕСТВЕ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ**

COMPUTER MODELLING OF STARTING MODES OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH LOW QUALITY OF SUPPLY MAINS

*Рассмотрены основные преимущества и недостатки асинхронных электродвигателей, сделан анализ негативных пусковых факторов асинхронных машин, выполнено компьютерное моделирование машины при питании от сети пониженного напряжения и пониженной частоты питающей сети. Результаты моделирования наглядно приведены для асинхронных машин, таких как скорость вращения, ток, электромагнитный момент и механические характеристики.*

*The article discusses the main advantages and disadvantages of asynchronous electric motors, analyzes the negative starting factors of asynchronous machines, performs computer simulation of the machine when powered from a network of reduced voltage and reduced frequency of the supply network. The simulation results are clearly shown for asynchronous machines, as its rotation speed, current, electromagnetic torque and mechanical characteristics.*

*Ключевые слова: качество электроэнергии, пониженное напряжение, частота сети, асинхронный электродвигатель, переходные процессы, механическая характеристика, MATLAB/Simulink.*

*Keywords: power quality, undervoltage, mains frequency, asynchronous motor, transients, mechanical characteristic, MATLAB / Simulink.*

Асинхронные машины широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, например, асинхронные электродвигатели большой мощности часто используют в турбомеханизмах [5]. Асинхронные маломощные машины используются в различных станках, механизмах, как металлорежущие станки, прядильные машины и т.д. [6, 7]. Отличительной особенностью асинхронных машин являются сложные пусковые режимы, где пусковые токи превышают номинальное значение до семи раз, а максимальный пусковой момент до трех раз. Пусковые токи могут привести к нагреву и износу изоляции обмоток, что в свою очередь приводит к уменьшению срока службы всего электрооборудования в целом. Устранение этих проблем можно добиться с применением систем безударного пуска, как устройства плавного пуска (УПП) или частотных преобразователей [3, 4].

Другие особенности асинхронных машин взаимосвязаны с качеством электроэнергии, питающей его обмотки. Например, прямой пуск асинхронного двигателя допустим, если его пуск не приводит к провалу напряжения не более 10%, а зависимость электромагнитного момента асинхронной машины от напряжения питающей сети пропорционально в квадратном соотношении [8, 9]. Для более детального исследования пусковых режимов асинхронного электродвигателя при различных значениях напряжения сети, необходимо выполнить компьютерное моделирование с использованием программы MATLAB / Simulink [1, 2, 10-13].

Для компьютерного моделирования асинхронной машины была использована программа MATLAB R2013a версии 8.1. Процесс моделирования асинхронной машины в программе MATLAB подробно описан в литературе [10-13]. Адаптированная модель для исследования пусковых режимов работы асинхронной машины при пониженном напряжении сети и пониженной частоте напряжения приведена на рис. 1.

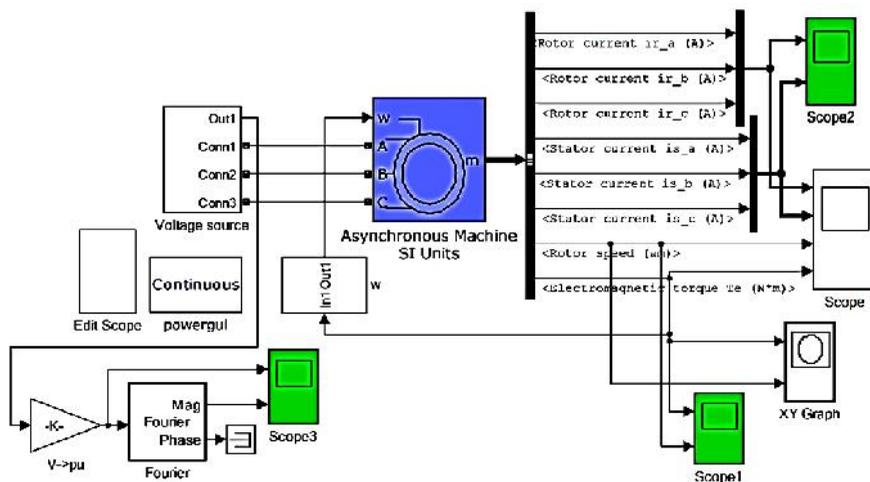


Рис. 1. Компьютерная модель асинхронной машины

Приведенная модель (рис. 1) разработана непосредственно в программе MATLAB/Simulink, с элементами библиотеки компонентов Simulink Power System. Эта библиотека целиком состоит из элементов энергетических, электротехнических и электронных систем, с помощью которых можно создать различные модели исследуемого объекта соответствующего системы. Каждый элемент библиотеки имеет свое название и пиктограмму, а также после выбора, какого-либо элемента, при нажатии два раза на него, откроется блок настройки параметров выбранного элемента. Результаты моделирования приведены на рисунках 2–6 в виде графиков переходных процессов и механических характеристик асинхронного электродвигателя.

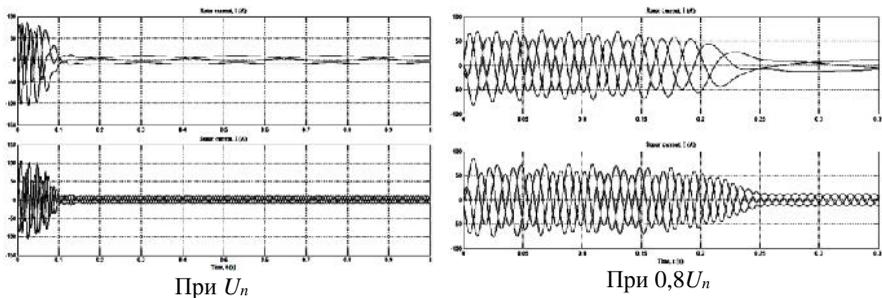


Рис. 2. Графики переходных процессов токов ротора и статора асинхронной машины при значении напряжения сети:  $U_n$  и  $0,8U_n$ .

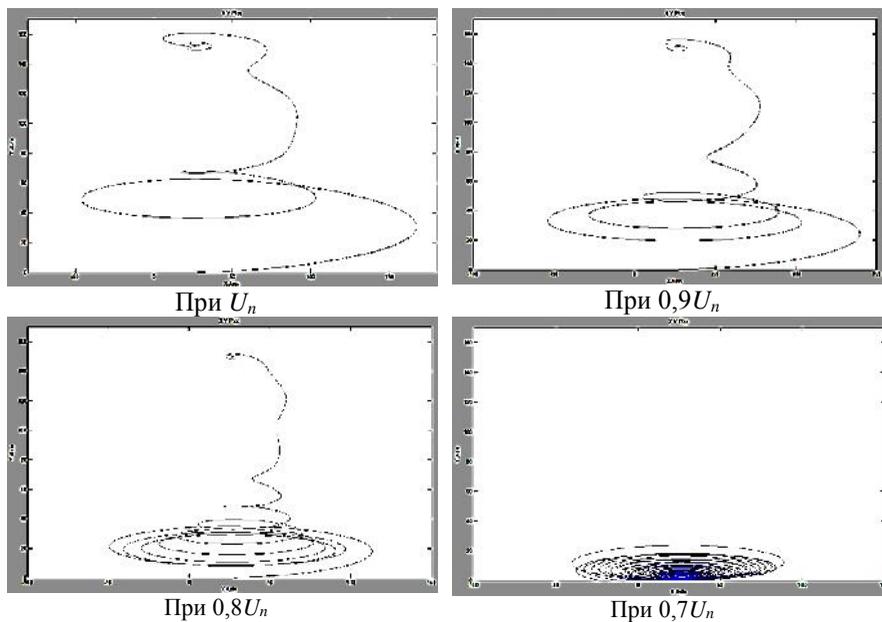


Рис. 3. Семейства механических характеристик асинхронной машины при значении напряжения сети:  $U_n$ ;  $0,9U_n$ ;  $0,8U_n$ ;  $0,7U_n$ .

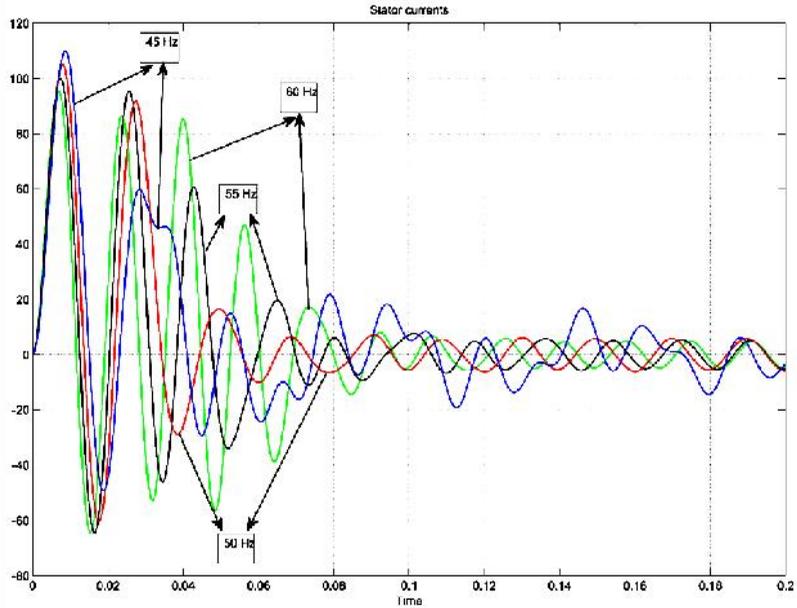


Рис. 4. Графики переходных процессов токов статора АД при разных частотах сети

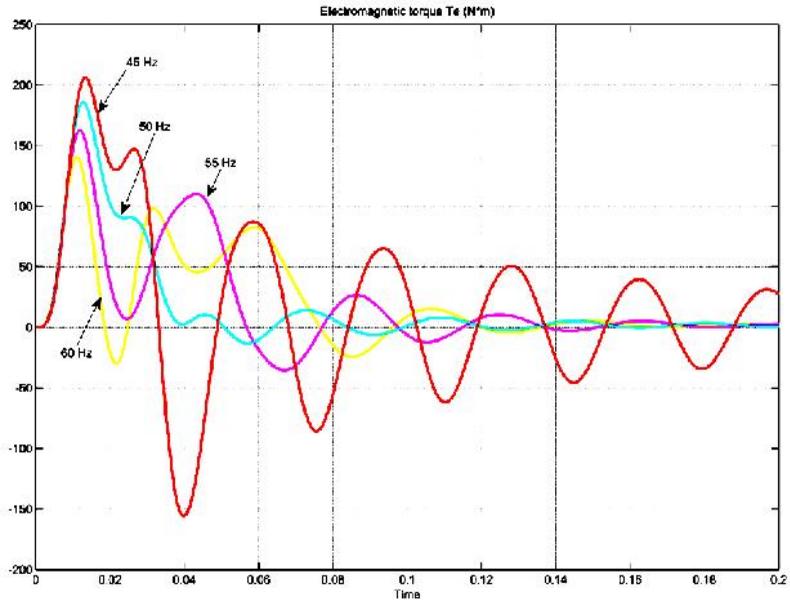


Рис. 5. Графики переходных процессов электромагнитного момента АД при разных частотах сети

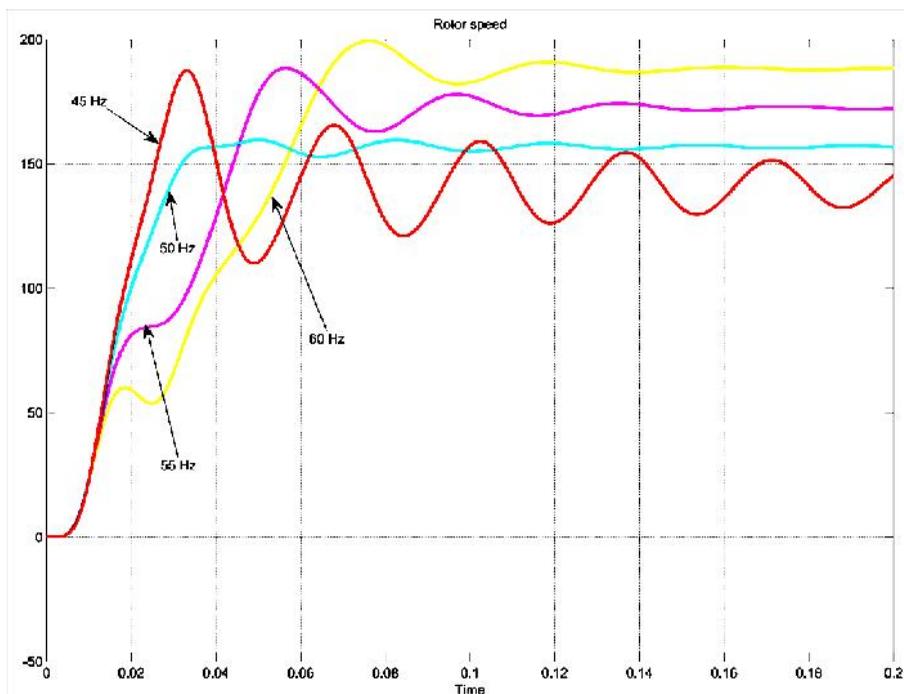


Рис. 6. Графики переходных процессов скорости вращения АД при разных частотах сети

Нетрудно заметить, что (см. рисунки 2-6) при пуске асинхронного двигателя с пониженным напряжением сети, получили выводы:

- время пускового переходного процесса увеличивается;
- разгон скорости вращения асинхронного двигателя затягивается;
- амплитуда момента машины уменьшается, а интенсивность колебаний моментов увеличиваются;
- токи ротора и статора асинхронной машины, как и момент двигателя, его амплитуда уменьшается, а интенсивность колебаний увеличиваются;
- при пуске с пониженным напряжением на 30% от номинального значения, асинхронная машина не запустится (см. на рис. 3).

Как показывают результаты моделирования, при изменении частоты питаемой сети, у асинхронных двигателей возникают большие проблемы, причем во всех параметрах машины, как и моменте, скорости и токе статора. Такое понижение частоты сети естественно в общих случаях невозможно, но при нагруженных энергосистемах или в сельских местностях, такое положение весьма возможно. Поэтому для устранения такого типа проблемы надо действовать комплексно, т.е. надо и в энергетике, и в электротехнике

проводить мероприятия и модернизацию. Графики, приведенные на рисунках 5 и 6 хорошо показывают, что при понижении частоты сети на 20% скорость и момент асинхронной машины переходят на колебательный характер и управление такой машиной станет трудной задачей.

### Список литературы

1. *Герман-Галкин, С.Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/ С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА – Век, 2008. -368 с.
2. *Герман-Галкин, С.Г.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: КОРОНА принт, – 2003. - 256 с.
3. *Дадабаев, Ш.Т.* Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата/ Ш.Т. Дадабаев //Энергетические системы: сб. тр. II Международной научно-технической конференции; под ред. П.А. Трубаева. – 2017. – С. 179-184.
4. *Дадабаев, Ш.Т.* Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока / Ш.Т. Дадабаев// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 618-621.
5. *Дадабаев, Ш.Т.* Математическая модель оросительной насосной станции первого подъёма / Ш.Т. Дадабаев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 3 (178). – С. 239-242.
6. *Дадабаев, Ш.Т.* Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъёма/ Ш.Т. Дадабаев// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. –С. 532-536.
7. *Дадабаев, Ш.Т.* Постановка задач по оптимизации работы текстильного электрооборудования при жарком климате / Ш.Т. Дадабаев, А.Р. Разаков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 11. – С. 58.
8. *Ковач, К.П.* Переходные процессы в машинах переменного тока/ К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 735 с.
9. *Поздеев, А.Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А.Д. Поздеев – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. - 172 с.
10. *Терёхин, В.Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учеб. пособие / В.Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
11. *Черных, И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. - 288 с.
12. *Perelmuter, V.M.* Electrotechnical systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems, CRC Press, 2013.
13. *Tolibjonovich, D.S., Islomovna, T.M., Saidulloevna, M.D.* (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. European Journal of Electrical Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>.

*Материал поступил в редколлегию 07.10.20.*

Karimov Ibodkul Rakhimkulovich  
(Republic of Tajikistan, Khujand, Khujand Polytechnic institute of the TTU  
named after academician M.S. Osimi)

## **SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE OF RING SPINNING MACHINES**

*The analysis of the operating modes of the electric drive of the ring spinning machines is carried out, the drawbacks of the open-loop control systems are revealed and the tasks are set to optimize the operation of the electric drive of the ring spinning machines. Computer simulation for open and closed control system of electric drive of ring spinning machines has been performed.*

*Keywords: ring-spinning machine, asynchronous motor, electric drive, automation, frequency converter, computer simulation.*

Today it is impossible to imagine an electric drive without sensors, automatic regulators, controlled converters and other elements that allow achieving large ranges of regulation of the parameters of electric drives of various machines and mechanisms. Such control systems of electric drives usually have two or more external loops made with feedbacks for speed, current, voltage, etc. Feedback enables the interconnection between the input and output of the drive control system, which is necessary to achieve automation of the drive. Feedbacks are performed based on various parameter sensors [1, 11]. In this work, the object of the study was a ring spinning machine of the P-114-Sh series, which was installed at the "Textile Plant" in Khujand, the Republic of Tajikistan. The purpose of the work was to study the ways and methods of automation of the electric drive of the ring-spinning machine of the P-114-Sh series and thereby optimize the operation of the machine as a whole.

The main ways to optimize the operating modes of ring spinning machines include the following [1, 7]:

- introduction of microprocessor control systems;
- increasing the automation of production processes;
- automatic control and regulation of the operating parameters of the electric drive of the spinning machines.

Of the above optimization paths, the last method was adopted for research, i.e., automatic control and regulation of the operating parameters of the electric drive [7].

The relay-contactor control system of an electric drive is a very reliable system with a simple circuit and accessible elements, but it has a number of disadvantages, for example [2, 4]:

- large size of control system elements;

- inability to perform complex management functions;
- inability to automate the control and monitoring of the parameters of the electric drive with high accuracy.

The ring-spinning machine of the P-114-Sh series contains two electric motors,  $M_1$  and  $M_2$ . The  $M_1$  electric motor is used to drive the hook-and-loop fan, and the  $M_2$  motor is the main drive of the machine. As electric motors, asynchronous machines of the AO2-32-2 series with a power of 4 kW, 2940 rpm and AOT2-61-4 with a power of 10 kW, 1460 rpm were used. It should be noted that the AO2, AOT2 series of asynchronous motors began to be produced at the end of the 50s of the last century, and now these series have long been discontinued.

Today, with the development of power electronics, a wide variety of frequency converters are produced, from simple to complex, in the flesh up to a microprocessor control and monitoring system [9, 10]. In the course of the study, a review of frequency converters of Russian and foreign companies were carried out and, as a result, general advantages were identified, such as [5, 6]:

- high accuracy of speed regulation;
- energy saving;
- stabilization of the rotation speed when the load changes;
- smooth engine start;
- the ability to remotely monitor the drive;
- the ability to connect directly to the controlled variable sensor.

Computer simulation of the electric drive was carried out on the basis of the MATLAB/Simulink program [7, 8]. This program is very well known among scientists of all industries, and is also widely used for modeling electrical objects and equipment. To simulate the electric drive of the ring-spinning machine, we took the asynchronous motor of the main drive of the machine. A computer model for studying the start of an asynchronous motor with direct start is shown in Figure 1. This model was taken from the MATLAB Help menu, where anyone can get acquainted with these models [2, 3, 13, 14].

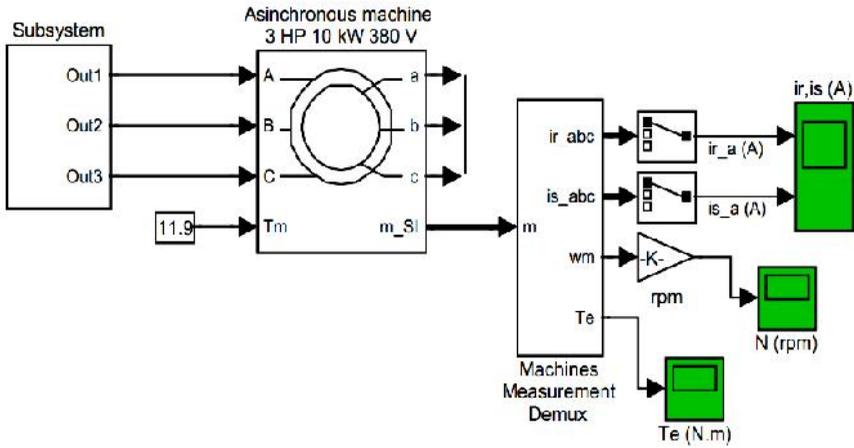


Figure 1. Computer model for the study of direct start of an induction motor

The simulation results of direct start are shown in Figures 2 and 3.

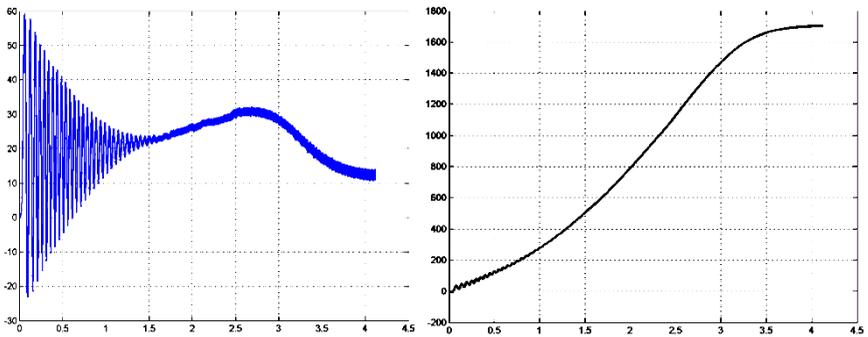


Figure 2. Graphs of transient processes of the electromagnetic torque and speed of an asynchronous motor with direct start

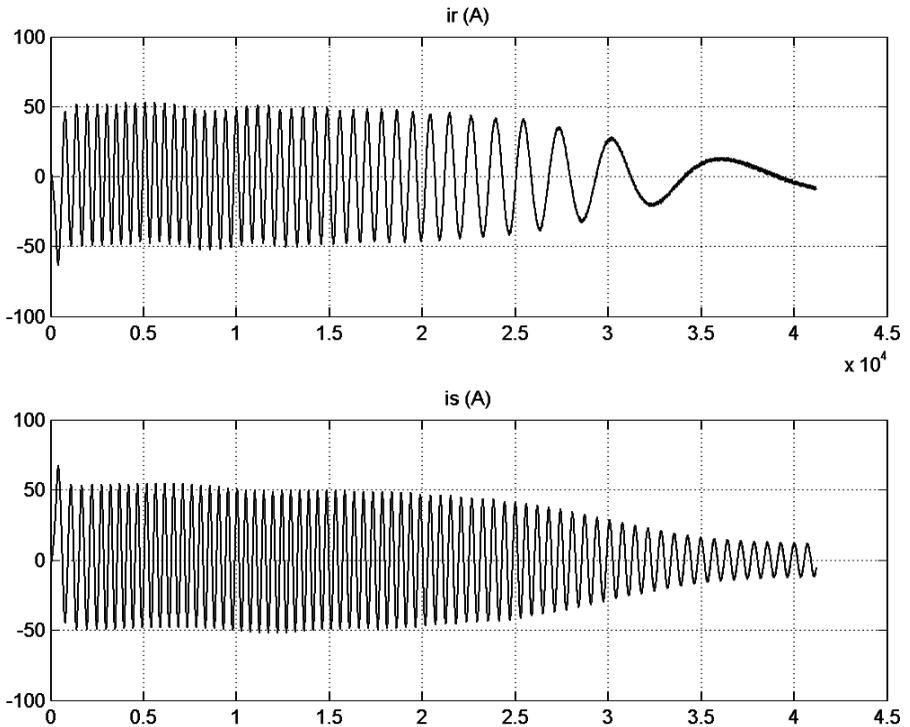


Figure 3. Graphs of transient processes of rotor and stator current

As can be seen from Figure 3, with a direct start of the electric drive, there are surges in the current and torque of the electric motor. These surges lead to heating of the motor windings and wear of its insulation [6, 12]. Therefore, it is necessary to implement soft start or variable speed drives to eliminate the above problems. When modernizing any types of machines, it is necessary to take into account economic factors that may affect the technical solution of the problem.

In Figure 4 shown the model of variable speed electric drive.



The simulation results of a closed frequency electric drive are shown in Figure 5.

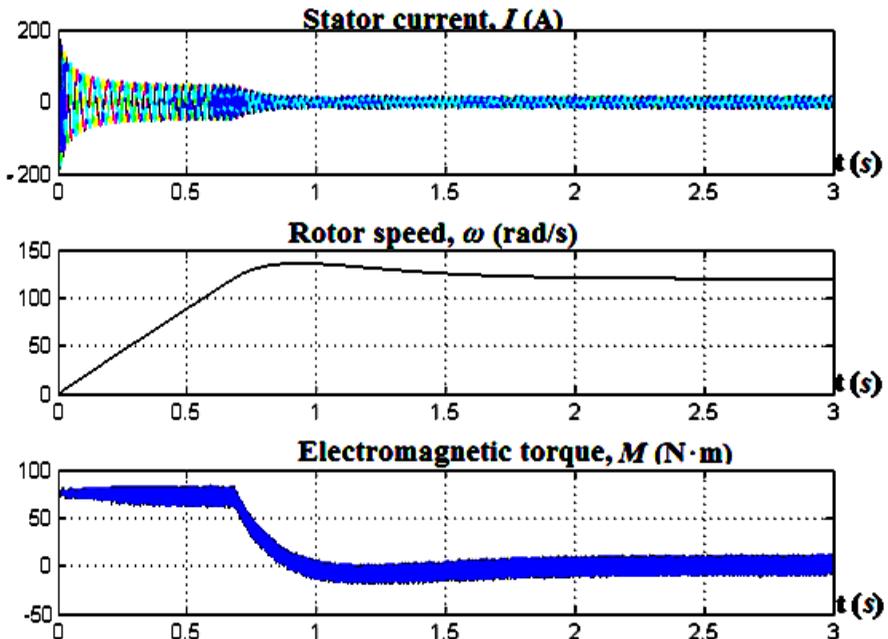


Figure 5. Graphs of transient processes of stator currents, speed and torque of induction motor in a frequency control system

The simulation results showed that with a direct start, the electromagnetic moment of an induction motor increases abruptly and changes by an alternating value (see Fig. 3), which leads to unstable operation of the engine during start-up and vibration in the machine as a whole. When starting with a frequency converter and a closed-loop control system, it was revealed that the alternating values of the electromagnetic torque are eliminated, and the maximum value of the starting torque is strictly within the limitation region (see Fig. 5). The starting currents of the stator of the machine will also smoothly change when starting the steel, which leads to an increase in the technical resource of the conductive parts of the electrical equipment.

The unconditionally closed inverter-motor system solves complex tasks such as automatic motor speed control, programmed control, high-precision signal processing, etc. The introduction of feedbacks into the system expands the control range, increases its smoothness, improves the statistical and dynamic properties of the system, increases the accuracy of the task signals processing, as well as the stability and speed of the electric drive system.

## References

1. *Авроров В.А.* Автоматизация кольцевых прядильных машин / В.А. Авроров, А. М. Кившенко. - М. : Легпромбытиздат, 1985. - 103 с.
2. *Герман-Галкин, С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учеб. пособие/ С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
3. *Герман-Галкин С.Г.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК/ С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: КОРОНА принт, – 2003. – 256 с.
4. *Дадабаев, Ш.Т.* Математическая модель оросительной насосной станции первого подъема / Ш.Т. Дадабаев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 3 (178). – С. 239-242.
5. *Дадабаев, Ш.Т.* Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки. / Ш.Т. Дадабаев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – №11. – С. 29-34.
6. *Дадабаев, Ш.Т.* Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема/ Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2017. – № 9-1. – С. 532-536.
7. *Дадабаев, Ш.Т.* Постановка задач по оптимизации работы текстильного электрооборудования при жарком климате/ Ш.Т. Дадабаев, А.Р. Разаков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 11. – С. 58.
8. *Дадабаев, Ш.Т.* Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов / Ш.Т. Дадабаев, Х.А. Рахматов, Б.А. Абдумаликов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –Вып. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 256-263.
9. *Ковач, К.П.* Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.
10. *Ковчин, С.А.* Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
11. *Ланген, А.М.* Электрооборудование предприятий текстильной промышленности: учеб. для вузов/ А.М. Ланген, В.В. Красник - М.: Легпромбытиздат, -1991. -320 с.
12. *Поздеев, А.Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А. Д. Поздеев – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
13. *Терёхин, В.Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
14. *Черных, И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

*Материал поступил в редколлегию 06.10.20.*

И. М. Петrochenко, А. А. Пугачев

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## СИНТЕЗ КОНТУРА ПОЛОЖЕНИЯ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

### SYNTHESIS OF THE DC TRACKING ELECTRIC DRIVE POSITION LOOP

*Представлены результаты моделирования трехконтурного следящего электропривода постоянного тока. Дана сравнительная характеристика использования пропорционального и параболического регуляторов положения, датчика интенсивности.*

*The results of DC tracking electric drive position loop simulation are presented. The comparative assessment of using of proportional gain and parabolic controller of angle (position), reference ramp.*

*Ключевые слова: электропривод, система управления, двигатель постоянного тока, контур положения, параболический регулятор.*

*Keywords: electric drive, control system, DC motor, position loop, parabolic controller.*

Синтез системы регулирования положения электропривода достаточно подробно освещен как в учебной литературе [1, 2], так и в научных публикациях [3]. Традиционно для достижения желаемых показателей качества применяют трехконтурные системы для электроприводов с линейными механическими характеристиками. Тем не менее, при рассмотрении позиционных или следящих электроприводов имеются различные рекомендации по выбору регулирующих устройств, обеспечивающих заданную динамику и установившуюся ошибку по положению.

В данной работе приведены результаты моделирования для двигателя постоянного тока с параметрами: номинальное напряжение якоря  $U = 220$  В, номинальная мощность  $P_2 = 1,1$  кВт, коэффициент полезного действия  $\eta = 0,78$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,8$ , активное сопротивление обмотки якоря  $R_1 = 11$  Ом, индуктивность обмотки якоря  $L_1 = 0,014$  Гн, постоянная электродвигателя  $C = 0,7$ .

Электропривод содержит трехконтурную систему подчиненного управления с ограничением сигнала задания на каждый контур согласно каталожным данным на двигатель. Параметры контура тока: коэффициент обратной связи по току  $K_{OT} = 3,74$ , регулятор тока  $K_{PT} = 1.73 + \frac{1}{0.58p}$ . Параметры контура скорости: коэффициент обратной связи по скорости  $K_{OC} = 0,053$ , регулятор скорости  $K_{PC} = 43,8$ . Параметры контура положения:

коэффициент обратной связи по положению  $K_{оп} = 0,0106$ . Здесь принято обозначение  $p$ -оператор Лапласа.

Первый эксперимент проводился при использовании пропорционального регулятора положения с коэффициентом усиления  $K_{рп} = 61,4$ . Результаты моделирования показаны на рис. 1.

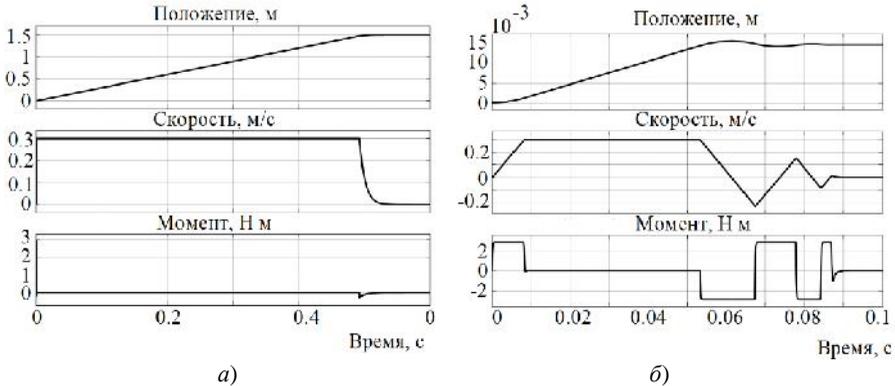


Рис. 1. Результаты моделирования с пропорциональным регулятором положения (а – большое изменение задания, б – малое изменение задания)

Из рис. 1 очевидно, что электропривод с пропорциональным регулятором положения хорошо отрабатывает большое изменение задания, в то время как при малом изменении происходят колебания, обусловленные превышением задания на скорость и ток своих максимальных значений. Установившаяся ошибка при этом удовлетворительная в обоих случаях.

Следующий эксперимент проводился при использовании пропорционального регулятора и датчика интенсивности положения. Структурная схема датчика интенсивности показана на рис. 2, результаты моделирования показаны на рис. 3.

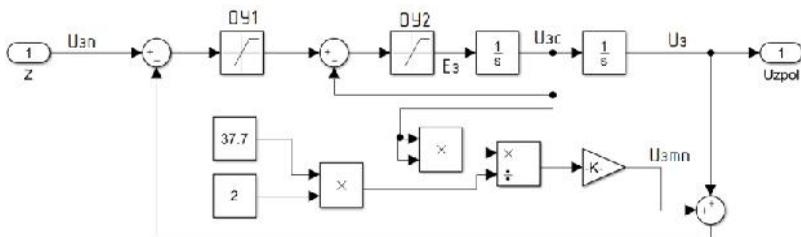


Рис. 2. Датчик интенсивности

Из рис. 3 очевидно, что электропривод по-прежнему удовлетворительно отрабатывает большое задание на положение. Обработка малого задания происходит с меньшей колебательностью, но, тем не менее, по-прежнему

имеется перерегулирование, которое может быть недопустимым в ряде промышленных установок или технологических комплексов. Отметим, что с уменьшением величины задания, величина перерегулирования увеличивается.

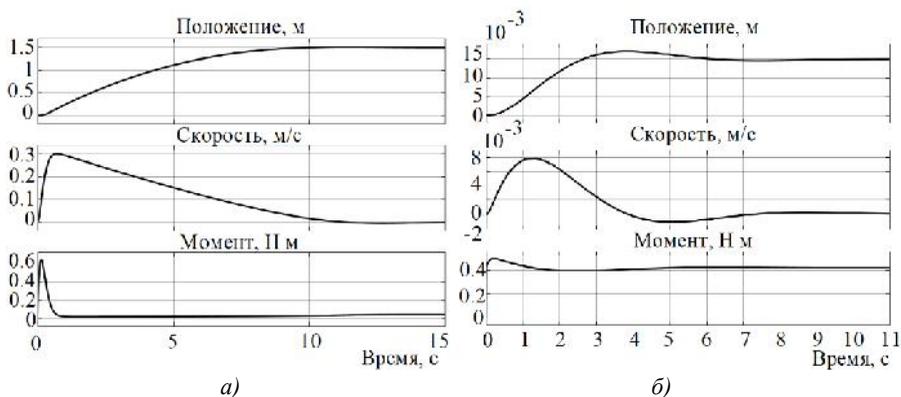


Рис. 3. Результаты моделирования с пропорциональным регулятором и задатчиком интенсивности положения (а – большое изменение задания, б – малое изменение задания)

Третий эксперимент проводился с параболическим регулятором положения. Структурная схема параболического регулятора показана на рис. 4, результаты моделирования показаны на рис. 5.

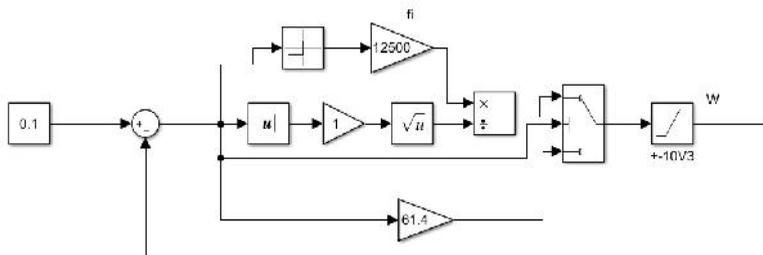


Рис. 4. Структурная схема параболического регулятора положения

Из рис. 5 видно, что регулирование положения с использованием параболического регулятора позволяет достичь максимального быстродействия без перерегулирования при задании как малого, так и большого перемещения.

Таким образом, в результате ряда экспериментов установлено, что, по отношению к показателям качества, в установившихся режимах работы все рассмотренные варианты реализации контура положения подчиненной системы управления обеспечивают удовлетворительную ошибку. Наилучшие показатели качества в переходных режимах соответствуют электроприводу с

параболическим регулятором положения. Электропривод с задатчиком интенсивности обладает лучшими характеристиками по сравнению с электроприводом с пропорциональным регулятором положения, но уступает в качестве управления при малом задании электроприводу с параболическим регулятором.

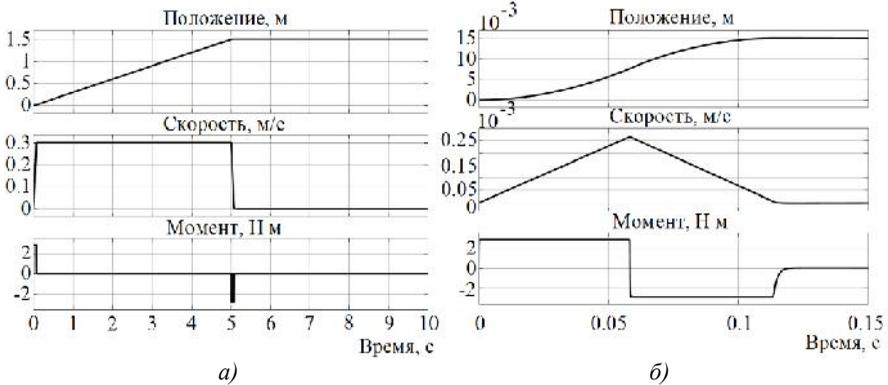


Рис. 5. Результаты моделирования с параболическим регулятором положения (а – большое изменение задания, б – малое изменение задания)

Исследование электропривода с учетом нелинейностей полупроводниковых преобразователей в цепи обмотки якоря (тиристорный преобразователь или широтно-импульсный преобразователь) не вносит изменений в полученные результаты ни качественно, ни количественно. Это можно объяснить тем, что благодаря существенной инерционности механической части колебания тока якоря и момента успешно демпфируются.

### Список литературы

1. Терехов, В. М. Т35 Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. - 2-е Изд., стер. - М. : Издательский центр «Академия», 2006. - 304 с.
2. Ключев, В. И. К 52 Теория электропривода: Учеб. для вузов.- 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2001 . - 704 с.
3. Космодамианский, А.С. Дифференциальные уравнения асинхронного электропривода с поворотным статором / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // НТТ – наука и техника транспорта, № 3 – 2008. – С. 50 – 55

Материал поступил в редколлегию 19.10.20.

Б.П. Подкопаев, А.С. Якшин  
(г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова)

## **ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СТАТИЧЕСКИМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ**

DIAGNOSTIC MODELING OF RADIO ENGINEERING SYSTEM NODES  
WITH STATIC NONLINEARITIES

*Рассмотрено решение задачи функционального диагностирования радиотехнических систем со статическими нелинейностями, позволяющих проведение декомпозиции описания структуры объекта на компоненты с одним входом и одним выходом. Представленный подход позволяет осуществить поиск и локализацию ошибок с использованием устройства диагностирования, не превосходящего по сумме компонент исходную систему.*

*The paper considers the solution of the problem of functional diagnostics of radio engineering systems with static nonlinearities that allow the decomposition of the description of the object structure into components with one input and one output. The presented approach allows you to search for and locate errors using a diagnostic device that does not exceed the sum of the components of the original system.*

*Ключевые слова: функциональное диагностирование, структурная схема, статическая нелинейность, наблюдатель состояния, избыточность.*

*Keywords: functional diagnostics, block diagram, static nonlinearity, state observer, redundancy.*

Ужесточения требований к достоверности выходной информации при функционировании современных радиотехнических систем, а также тяжесть последствий при возникновении нештатных ситуаций во время эксплуатации, приводит к необходимости использовать в составе объектов, выполняющих ответственные функции, средства функционального диагностирования (ФД).

Надежностные характеристики механических и электромеханических узлов, выполняющих ответственные функции при позиционировании или слежении за целью, зачастую хуже, чем у электронных блоков, а цена отказа хотя бы одного из них, как правило, ведет к потере работоспособности всей системы. Подобные устройства обычно сами входят как составные элементы в более сложные системы и могут быть представлены узлами, имеющими один вход и один выход. В общем виде структуру таких объектов целесообразно описывать рядом последовательно соединенных линейных динамических звеньев и статических нелинейностей.

Решение задачи диагностирования подобных систем в общем виде сопровождается рядом трудностей. Так, если в рассматриваемом случае применить известные методы и осуществить переход от структурной схемы к матричному описанию системы в пространстве состояний, а затем к полученному описанию применить линейные методы диагностирования, к примеру, изложенные в [1], основанные на использовании канонических форм, то получить при этом корректно работающее устройство функционального диагностирования (УФД) невозможно. Приведение к каноническим формам влечет за собой структурные преобразования, недопустимые в нелинейном случае.

Конечно, можно перейти к описанию системы в пространстве состояний и решить задачу способами, разработанными для непрерывных нелинейных систем [2], а затем вернуться к структурным схемам. Но такой подход нельзя назвать удачным, поскольку в процессе разработки структурная схема объекта диагностирования (ОД) может уточняться, что приведёт к необходимости многократных переходов в пространство состояний и обратно.

Приведённые соображения позволяют считать целесообразной разработку методов, ориентированных на решение задачи ФД систем, заданных структурными схемами, состоящими из линейных звеньев и статических нелинейностей.

Пусть ОД представляет собой стационарную систему с сосредоточенными параметрами, содержащую как линейные, так и нелинейные звенья (статические нелинейности), причём все элементы его структурной схемы имеют один вход и один выход, а математические описания отдельных звеньев известны.

В работе [3] подробно рассмотрен математический аппарат решения задачи ФД в соответствии с принятой постановкой.

В качестве примера использования предложенной методики построим УФД для следящего электропривода (СЭП) азимутального канала антенного устройства радиотелескопа типа СМ214АУ, работающего в миллиметровом диапазоне.

Задача фиксации ошибок в реальном времени при работе СЭП радиотелескопов весьма актуальна, поскольку качество работы системы наведения антенны существенным образом влияет на их эксплуатационные характеристики. Цена ошибки, а, следовательно, вынужденного простоя объектов такого уровня весьма высока.

В структурной схеме, представленной на рис. 1, можно выделить регулятор положения, регулятор скорости и объект управления. Кроме того для корректной работы системы в неё введён наблюдатель, идентифицирующий параметры объекта управления, и модальный регулятор. Их влияние при диагностическом моделировании учитывалось как дополнительный вход системы.

Структурная схема ОД содержит 32 звена, значения характеристик звеньев (передаточные функции и статические нелинейности) соответствуют

параметрам радиотелескопа CM214AU с диаметром главного зеркала 70 метров для азимутальной оси наведения [4].

Суммарный объём построенного УФД составляет 32 звена, т. е. равен размерности вектора состояния ОД.

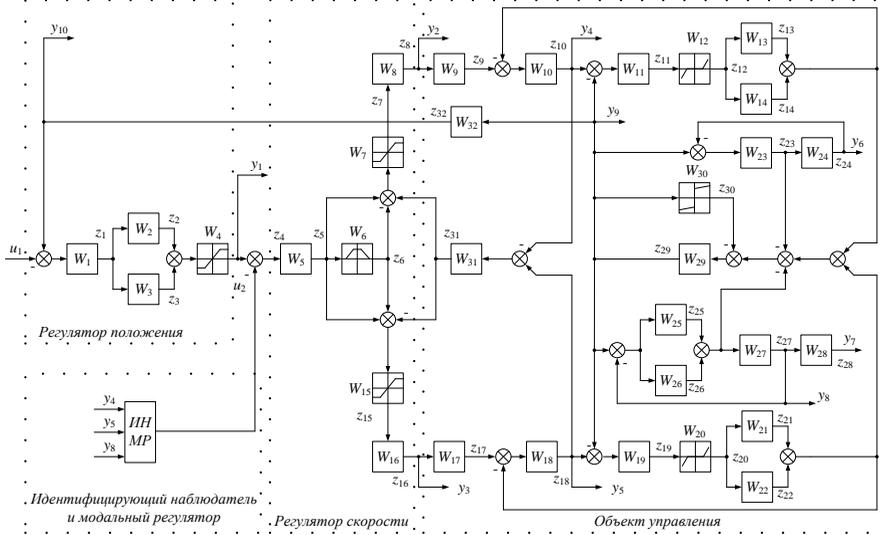


Рис. 1. Структурная схема следящего привода оси наведения главного зеркала по азимуту

Для оценки способности УФД к различению ошибок на основе результатов моделирования составлена таблица соответствия ошибок различным значениям индикаторов (табл. 1). Индикаторы принимают значения 1, в случае если  $i$ -й диагностический наблюдатель чувствителен к ошибке рассматриваемого звена, и 0 в противном случае.

Таблица 1. Соответствия классов ошибок значениям индикаторов

Класс ошибок	Индикатор	Звенья	Класс ошибок	Индикатор	Звенья
1	1000000000	$W_1 W_2 W_3 W_4$	9	0000010010	$W_{23}$
2	0110000000	$W_5 W_6 W_{31}$	10	0000010000	$W_{24}$
3	0100000000	$W_7 W_8$	11	0000000110	$W_{25} W_{26}$
4	0001000000	$W_9 W_{10}$	12	0000000100	$W_{27}$
5	0001000010	$W_{11} W_{12} W_{13} W_{14}$	13	0000001000	$W_{28}$
6	0010000000	$W_{15} W_{16}$	14	0000000010	$W_{29} W_{30}$
7	0000100000	$W_{17} W_{18}$	15	0000000001	$W_{32}$
8	0000100010	$W_{19} W_{20} W_{21} W_{22}$			

Полученная таблица характеризует достигнутую в результате решения задачи диагностирования глубину поиска. Анализируя таблицу, можно

сделать вывод, что удастся различить ошибки в звеньях 23, 24, 27, 28, 32; ошибки в группах {1, 2, 3, 4}, {5, 6, 31}, {7, 8}, {9, 10}, {11, 12, 13, 14}, {15, 16}, {17, 18}, {19, 20, 21, 22}, {25, 26}, {29, 30} остались неразличимы. Таким образом, построенное УФД позволяет различить 15 классов ошибок для ОД, состоящем из 32 звеньев.

Для оценки эффективности предлагаемого метода сравним избыточность полученных УФД с результатом, имеющем место при построении УФД методом последовательного выбора звеньев [5, 6].

Последовательный алгоритм даст следующий состав множеств компонент вектора  $\mathbf{z}$ , ошибки которых должен обнаруживать разрабатываемый наблюдатель: {4, 2, 3, 1, 33}, {8, 7, 5, 6, 31, 34}, {16, 15, 5, 6, 31, 34}, {10, 9, 13, 14, 12, 11}, {18, 17, 21, 22, 20, 19}, {24, 23}, {28}, {27, 25, 26}, {29, 13, 14, 21, 22, 23, 25, 26, 30, 12, 20, 11, 19}, {32}. Т. е., для диагностирования ОД, вектор состояния которого состоит из 32 компонент, сумма элементов полученных множеств составляет 49, и в банк наблюдателей входят 17 звеньев сверх системного дубля.

В настоящей работе представлены результаты построения УФД на основе метода декомпозиции структурной схемы ОД с сохранением структуры связей между компонентами его вектора состояния. Метод пригоден для решения задачи обнаружения и локализации ошибок в системах с нелинейными элементами. Кроме того, он обеспечивает умеренную избыточность полученных технических решений: УФД по сумме компонент вектора состояния не превосходит ОД.

### Список литературы

1. Андреев, Ю.Н. Управление линейными конечномерными объектами / Ю.Н. Андреев. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
2. Подкопаев, Б.П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 частях. Часть 2. Системные алгебры, алгебраическая модель функционального диагностирования, реализация модели функционального диагностирования. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 132 с.
3. Podkopaev, V.P. Detecting Errors in Nodes of Technical Systems with Static Nonlinearities / V.P. Podkopaev, A.S. Yakshin // Automation and Remote Control, 2019. – Vol. 80. – No. 8. – pp. 1416 – 1424
4. ФГБУП Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук: официальный сайт: – URL: [https://www.sao.ru/hq/vam/conf\\_spbf/doc1/Gimmel'man.pdf](https://www.sao.ru/hq/vam/conf_spbf/doc1/Gimmel'man.pdf) (дата обращения: 10.10.2020)
5. Жирабок, А.Н. Диагностирование технических систем, заданных структурными схемами с нелинейными звеньями / А.Н. Жирабок, А.С. Якшин // Мехатроника, автоматизация, управление. № 9, 2006. – С. 36-44.
6. Подкопаев, Б.П. Функциональное диагностирование узлов радиосистем со статическими нелинейностями / Б.П. Подкопаев, А.С. Якшин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. – Вып. 2. – С. 16-23.

*Материал поступил в редколлегию 14.10.20.*

А.А. Пугачев, С.В. Морозов, А.С. Морозов  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

### **MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN INDUCTION MOTOR**

*Приведена эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя, показаны уравнения теплового равновесия. Проанализированы результаты моделирования для двигателя мощностью 14 кВт при управлении им по скалярному закону.*

*The equivalent thermal circuit of an induction motor is considered, the equations of thermal balanced are shown on the basis of the voltage nodes technique. The results of the simulation of the 14 kW induction motor with scalar control are discussed.*

*Ключевые слова: тепловые процессы, эквивалентная схема замещения, асинхронный двигатель.*

*Keywords: thermal processes, equivalent circuit, induction motor.*

Несмотря на относительно большое количество работ в области исследования теплового состояния асинхронного двигателя [1, 2], это направление не утратило своей актуальности. Для прогнозирования теплового состояния асинхронного двигателя в период его эксплуатации необходима применение оригинальной, синтезированной для исследуемого вида асинхронного двигателя, математической модели. Верификация результатов, полученных на математической модели, должна проходить по данным, полученным во время экспериментальных исследований на аналогичном двигателе или на его физической модели.

Для решения задачи расчета и исследования распределения температур в различных элементах асинхронного двигателя была синтезирована математическая модель тепловых процессов в стационарных режимах работы. Двигатель здесь представлен в виде нелинейного замкнутого теплового объекта, в котором тепловые потоки через пассивные элементы (не выделяют тепловых потерь) – станину, вал и т. д. – перераспределяются между активными элементами двигателя (выделяют тепловые потери), потери в которых определяются, в том числе, их температурой. Теплообмен между станиной и окружающим воздухом в модели учтен в виде уравнений свободной конвекции и теплового излучения. Полученная модель основана на методе эквивалентных тепловых схем, который обеспечивает решение задачи по исследованию распределения температур в установившихся режимах работы в выбранном конечном количестве элементов двигателя.

Синтезированная математическая модель асинхронного двигателя позволяет определить значения температур в десяти элементах асинхронного двигателя (рис. 1), включая и температуры охлаждающего воздуха на входном участке воздушного потока. Тепловые процессы в ней для каждого узла определяются уравнениями теплового баланса, теплопередачи к охлаждающему воздуху и теплопроводности к соседним элементам.

Использованы две математические модели тепловых процессов в цилиндрических телах, определяющие значения трех температур каждая. Одна модель представляет собой решение уравнений теплопроводности в радиальном, другая – в осевом направлениях. В каждой модели потенциалы двух узлов эквивалентны температурам на соответствующих поверхностях, а потенциал третьей точки эквивалентен средней температуре всего цилиндрического элемента. Тепловые потери активных элементов введены в узел схемы, потенциал которой эквивалентен средней температуре. Для определения тепловых сопротивлений математической модели нужно иметь информацию о геометрических размерах каждого элемента, а также значения теплопроводностей как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Синтезированная эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя показана на рис. 2. Подстрочными индексами обозначены номера элементов (в соответствии с рис. 1), сопротивлением тепловому потоку между которыми является  $R$ .

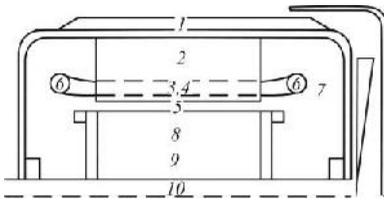


Рис. 1. Эскиз асинхронного двигателя:

- 1 – корпус, 2 – сердечник статора,
- 3 – зубцы статора, 4 – обмотка статора,
- 5 – воздушный зазор,
- 6 – лобовая часть обмотки статора, 7 – воздух у подшипниковых крышек,
- 8 – обмотка ротора, 9 – сердечник ротора, 10 – вал

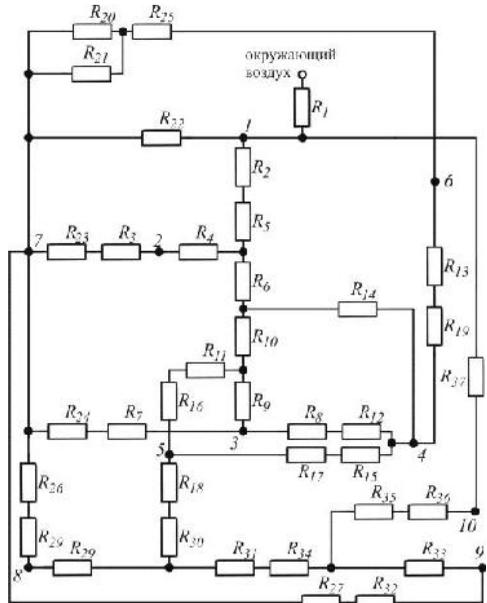


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя

Активными с точки зрения тепловых потерь в модели (рис. 1) являются сердечник статора 2, зубцы статора 3, обмотка статора 4, лобовая часть обмотки статора 6, стержни ротора 8 и сердечник ротора 9. Определение тепловых потерь мощности в различных элементах на основании эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя, описывающей переходные электромеханические процессы в асинхронном двигателе, осуществлено на основании результатов работы [3]. При определении потерь мощности были приняты во внимание такие нелинейные явления и эффекты, возникающие при работе двигателя, как насыщение по главному магнитному пути, вытеснение тока ротора, зависимость потерь мощности в стали от частоты тока статора.

В результате синтеза эквивалентной тепловой схемы замещения было получено уравнение теплового равновесия:

$$\theta = G^{-1}P,$$

где  $\theta$  – матрица перегрева отдельных узлов двигателя,  $G$  – матрица теплопроводностей между узлами,  $P$  – матрица мощностей греющих потерь. Матрица  $G$  имеет размерность  $[10 \times 10]$ , матрицы  $\theta$  и  $P$  –  $[10 \times 1]$ .

В качестве исследуемого двигателя выбран двигатель мощностью 14 кВт [14].

Результаты расчета мощности потерь приведены в таблице 1. Расчет произведен для электропривода, обеспечивающего выполнение закона частотного управления  $u_s/f_s = \text{const}$ , где  $u_s$  – напряжение обмотки статора,  $f_s$  – частота тока статора. В таблице 1 приняты обозначения:  $u_s^* = u_s/u_{s, \text{ном}}$ ,  $f_s^* = f_s/f_{s, \text{ном}}$  – относительные значения напряжения и частоты тока статора,  $\omega^* = \omega/\omega_{0, \text{ном}}$ ,  $M^* = M/M_{\text{ном}}$  – относительные значения частоты вращения вала ротора и момента,  $V_{\text{ов}}^* = V_{\text{ов}}/V_{\text{ов, ном}}$  – относительная скорость охлаждающего воздуха, индекс "ном" соответствует номинальному значению указанной величины. Значения частоты тока статора  $f_s^*$  соответствуют частоте тока тягового генератора в функции текущей позиции контроллера машиниста маневрового тепловоза.

Таблица 1. Результаты расчета мощности потерь

№	$f_s^*$	$u_s^*$	$\omega^*$	$M^*$	$V_{\text{ов}}^*$	$\Delta P_2$ , Вт	$\Delta P_3$ , Вт	$\Delta P_4$ , Вт	$\Delta P_6$ , Вт	$\Delta P_8$ , Вт	$\Delta P_9$ , Вт
1	1	1	0,9	1	1	90,1	150,4	310,8	305,1	460,1	21,9
2	1	1	0,86	1,5	1	87,5	149,7	485,1	473,9	721,8	35,8
3	0,5	0,5	0,43	1	0,45	50,4	106,7	322,7	323,8	483,9	17,9
4	0,25	0,25	0,24	1	0,2	39,75	72,2	323,6	336,3	512,7	9,9

Результаты расчета перегрева узлов двигателя АО-63-4 приведены в табл. 2.

В результате расчетов установлено, что для выбранного типа двигателя наибольший перегрев испытывает обмотка ротора (стержни ротора). Наиболее нагретыми элементами статора являются пазовая и лобовая части обмотки,

причем значения нагрева отличаются незначительно, точное положение наиболее нагретой точки является функцией скорости охлаждающего воздуха, параметров напряжения статора и нагрузки на валу. Отметим, что при независимом способе охлаждения расположение и температура наиболее нагретого узла от частоты вращения вала ротора зависят пренебрежимо мало.

*Таблица 2. Результаты расчета перегрева узлов двигателя АО-63-4*

№	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$\theta_3, ^\circ\text{C}$	$\theta_4, ^\circ\text{C}$	$\theta_5, ^\circ\text{C}$	$\theta_6, ^\circ\text{C}$	$\theta_7, ^\circ\text{C}$	$\theta_8, ^\circ\text{C}$	$\theta_9, ^\circ\text{C}$	$\theta_{10}, ^\circ\text{C}$
1	86,8	130,7	130,3	131,8	131,3	113,4	98,9	132,1	131,4	109,3
2	126,7	189,2	191,0	189,8	191,5	165,6	144,4	192,7	191,8	159,5
3	84,7	147,6	149,2	148,4	149,7	131,8	105,8	150,7	149,9	117,6
4	83,9	171,9	173,6	173,3	174,7	157,2	116,6	175,8	174,8	129,8

При работе на низких позициях контроллера машиниста расход охлаждающего воздуха значительно ниже номинального значения, что приводит к повышенному нагреву. Значения температуры обмоток асинхронного двигателя в этих режимах оказывают сильное влияние на показатели качества всего электропривода. Из таблицы 2 очевидно, что на низких позициях контроллера машиниста обмотки работают на максимальных значениях температуры изоляции. При увеличении моментов выше номинального значения, что является нормальным при пуске явлением, обмотки подвергаются тепловым нагрузкам выше допустимых по классу изоляции. При движении на затяжных подъемах на низких скоростях при большом весе состава, когда продолжительность работы под действием больших моментов становится сопоставима с постоянной нагрева, температура изоляции достаточно длительное время превышает допустимое значение, что ведет к ее ускоренному старению.

### Список литературы

1. Пугачев, А.А. Анализ и систематизация методов и результатов определения температуры теплонагруженных узлов асинхронного тягового двигателя железнодорожного транспорта / А.А. Пугачев // Мир транспорта и технологических машин, № 3. – 2012. – С. 39 – 49.
2. Космодамианский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов : дисс. ... доктора технических наук / А.С. Космодамианский // дисс... докт. техн. наук. – Москва, 2002. – 306 с.
3. Космодамианский, А.С. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 26 – 31.
4. Воробьев, В.И. Математическая модель установившихся тепловых процессов в асинхронном двигателе / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 5. – 2 (313). – 2015. – С. 221 – 226.

*Материал поступил в редколлегию 19.10.20.*

С.В. Седых, Н.В. Чуприна, А.А. Пугачев  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ РЕЖИМЕ**

**SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE WITH INDUCTION MOTOR  
AND VECTOR CONTROL SYSTEM IN ENERGY SAVING MODE**

*Проведен анализ методов повышения энергоэффективности электропривода с асинхронным двигателем и системой векторного управления. Предложена система энергоэффективного управления, основанная на задании постоянного коэффициента мощности, выполнено ее имитационное моделирование, проанализированы полученные результаты.*

*The survey of techniques for increasing the energy efficiency of an electric drive with induction motor and vector control system is presented. An energy-efficient control system based on setting a constant power factor is proposed, its simulation is carried out, and the results are highlighted.*

*Ключевые слова: векторная система управления, энергоэффективность, коэффициент мощности, скалярная система управления, моделирование.*

*Keywords: vector control system, energy efficiency, power factor, scalar control system, simulation.*

Активизация работ по внедрению асинхронного электропривода обусловлена не только его явными достоинствами. Внедрению также способствует быстрый прогресс в области силовой электроники и микропроцессорной техники, тесно связанный с совершенствованием систем управления, что позволяет реализовать многочисленные достоинства асинхронного двигателя (АД) в полной мере, а также скомпенсировать недоиспользованные ресурсы. В работах [1] показано, что получить повышения энергоэффективности АД с короткозамкнутым ротором, управляемый скалярной системой, можно путем определенного соотношения проекции (угла) между парой векторов тока статора в ортогональной системе координат. Аналогичные результаты были получены в работе автора [2]. Такого же эффекта возможно добиться и в векторных системах управления, в частности в разработанной системе с косвенной ориентацией по полю ротора ( $\psi_r = const$ ). В основе такого явления лежит оптимальное изменение потокосцепления АД с целью минимизации тока статора и (или) потерь в двигателе. Так, например, в работах [3] и [4] сделан вывод о том, что если сориентировать ортогональные оси по магнитному полю статора таким образом, что одна из проекций – это активная составляющая тока статора, а другая – реактивная составляющая тока статора, то тогда поддержать

определенное соотношение между проекциями тока статора можно путем поддержания угла между ними или его тригонометрической функции. Тем самым, создание оптимального соотношения проекций токов статора, что в свою очередь приводит к снижению величины потерь мощности в меди обмотках статора, возможно путем поддержания тригонометрической функции угла – косинуса, другими словами коэффициента мощности.

Для пояснения описанного эффекта энергосбережения показаны статические характеристики для двигателя 4A200M4У3 с параметрами  $P_{ном} = 37$  кВт;  $\cos\varphi=0.9$ ;  $\eta=91\%$ ; при моментах сопротивления равных:  $M_c = 0.3 \cdot M_{ном}$ ;  $0.5 \cdot M_{ном}$ ;  $M_{ном}$ . Путем изменения величины потокосцепления получены в графическом виде опорные точки, представленные рис. 1. При моделировании использовалась классическая эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя, механическая часть обладает постоянным моментом инерции.

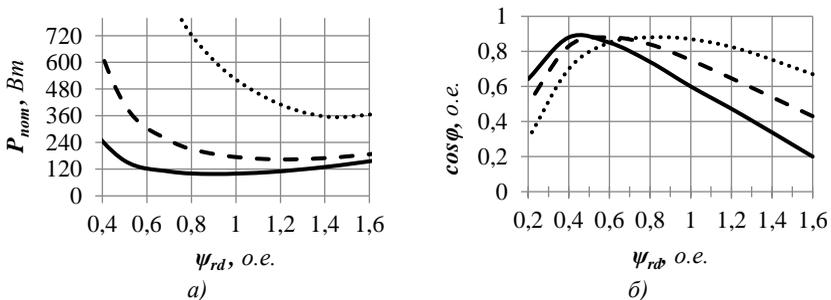


Рис. 1. Зависимости: а) величин потерь в меди обмоток от потокосцепления ротора; б) величин коэффициента мощности от потокосцепления ротора.  
(—  $M_{ном}$ , — —  $0.5 \cdot M_{ном}$ , ... -  $0.3 \cdot M_{ном}$ )

Из проведенного ряда имитационных экспериментов (рис. 1), можно сделать вывод о том, что для момента сопротивления  $0.5 \cdot M_{ном}$  при значении потокосцепления равном  $\psi_r = 1.15$ , наблюдается выраженный минимум потерь мощности в АД, составляющий примерно 190 Вт, тем самым создание оптимального соотношения проекций токов статора, возможно путем поддержания коэффициента мощности на уровне  $\cos\varphi = \sqrt{2}/2$  (рис. 1, б).

Для реализации данного эффекта необходимо регулировать потокосцепление, путем добавления регулятора и введения обратной связи по переменной коэффициента мощности, таким образом реализуя систему подчиненного регулирования намагничивающей составляющей статорного тока, изменение которой позволяет поддерживать на оптимальной величине угол между моментобразующими векторами тока и потокосцепления статора, обеспечивая при этом критерий минимума потребления тока статора.

Структурная схема энергоэффективной системы векторного управления асинхронного электродвигателя, с заданием постоянного коэффициента мощности, представлена на рис. 2.

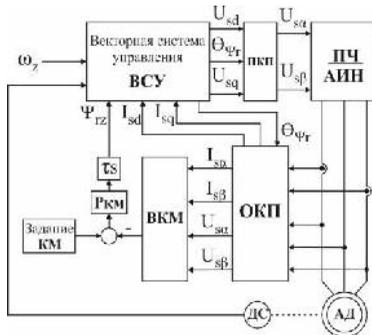


Рис. 2 Структурная схема энергоэффективной системы управления АД

На рис. 2 приняты следующие обозначения: ОКП – обратный координатный преобразователь; ВКМ – вычислитель коэффициента мощности; КМ – коэффициент мощности; РКМ – регулятор коэффициента мощности;  $t_s$  – постоянная времени статора; ПЧ/АИН – преобразователь частоты/автономный инвертор напряжения; ДС – датчик скорости.

Выполнено моделирование плавного пуска привода с системой задания постоянного коэффициента мощности. Осуществлен пуск до установившейся номинальной частоты вращения с моментом сопротивления  $M_c = 0.5 \cdot M_{ном}$ , на 0,7 сек. включена система энергосбережения. На рис. 3 приведены результаты моделирования использованного ранее асинхронного двигателя.

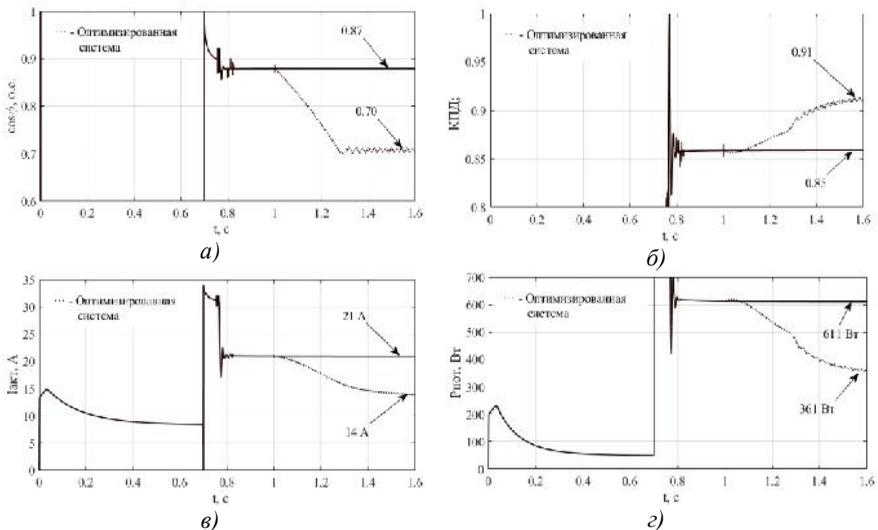


Рис. 3. Результаты моделирования: осциллограммы коэффициента мощности (а), КПД (б), активного тока статора (в), потерь мощности (г)  
 (--- – векторная система управления,  
 — — энергосберегающая система управления)

Анализ осциллограмм, приведенных на рис. 2, показывает, что снижение активного тока статора, что влечет за собой существенное уменьшение потерь в меди обмоток статора (рис. 3, г) и соответственно повышение КПД (рис. 3, б). Также из рис. 3 можно увидеть, что уменьшение потерь мощности составила 250 Вт, что соответствует 40%.

Стоит отметить, что данные показатели были получены без учета насыщения магнитной цепи; для учета результате чего получено уравнение [5], учитывающее явление насыщения по главному магнитному пути, которое в последствии было реализовано в компьютерной модели. Результаты оптимизации потерь мощности изменились в сторону уменьшения (потери мощности в обмотках меди статора составят 30%).

Таким образом, моделирование демонстрирует работоспособность предложенной векторной системы управления и возможность ее применения в промышленном электроприводе в широком диапазоне нагрузок и частот вращения.

### Список литературы

1. Электропривод переменного тока // Патент России №2512873. 2013. / Мещеряков В. Н., Синюкова Т. В., Мещерякова О.В.

2. *Седых, С. В.* Моделирование электропривода с асинхронным двигателем и системой скалярного управления в энергосберегающем режиме / С. В. Седых, А. А. Пугачев. — Текст: непосредственный // САПР и моделирование в современной электронике — Брянск: Брянский Государственный Технический Университет, 2018. — С. 230-231.

3. *Цветков, П. Е.* Разработка и исследование систем асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением для насосных механизмов: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Цветков П. Е.; Липецкий Государственный Технический Университет. — Липецк, 2014. — 163 с. — Текст: непосредственный.

4. *Конохов, Д. В.* Энергоэффективное прямое управление моментом асинхронных тяговых электродвигателей: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Конохов Д.В.; Брянский Государственный Технический Университет. — Брянск, 2018. — 138 с. — Текст: непосредственный.

5. *Космодамианский, А.С.* Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. - 2012. - № 12. - С. 26 – 31

*Материал поступил в редколлегию 20.10.20.*

А. А. Тяпин<sup>1,2</sup>, А. В. Литовченко<sup>1</sup>, Е. С. Кинев<sup>2</sup>  
(г. Красноярск,<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет,  
<sup>2</sup>ООО Тепловые электрические системы)

## **О СТРАТЕГИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ В ИНВЕРТОРЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ЛИНЕЙНОЙ МГД-МАШИНЫ**

ON THE STRATEGY OF SPACE-VECTOR PWM IN THE INVERTER  
OF AN ASYMMETRIC LINEAR MHD MACHINE

*Рассмотрены требования к формированию стратегии управления IGBT-ключами многофазного двухуровневого транзисторного инвертора при работе на укороченную линейную металлургическую МГД-машину. Показано, что алгоритм работы контроллера в условиях комбинированной нагрузки может отличаться спецификой, ввиду резко несимметричного режима индуктора с обмотками, соединенными треугольником.*

*The requirements for the formation of a control strategy for IGBT switches of a multiphase two-level transistor inverter when operating on a shortened linear metallurgical MHD machine are considered. It is shown that the algorithm of the controller operation under conditions of combined load may differ in specificity, due to the sharply asymmetric mode of the inductor with delta-connected windings.*

*Ключевые слова: Транзисторный IGBT-инвертор, линейная МГД-машина, моделирование силовых цепей, многофазная обмотка индуктора.*

*Keywords: Transistor IGBT inverter, linear MHD machine, power circuit simulation, multiphase inductor winding.*

**Введение.** Линейные индукционные машины (ЛИМ) металлургического назначения, обычно имеют медные концентрические обмотки и разомкнутый магнитопровод [1]. Инверсное включение обмоток отдельных фаз, при большой линейной токовой нагрузке, обуславливает несимметрию токов в фазах индуктора комплекса электромагнитного перемешивания (ЭМП) расплава алюминия в печах [2]. Для МГД-перемешивателей значение естественного коэффициента мощности на частоте около 1 Гц составляет величину 0,05 – 0,1. В системе электропитания индуктора применяют транзисторные IGBT-инверторы, мощностью до 600 кВА при токах 250-300 ампер и напряжениях до 400 вольт [3]. Конструкция и габаритные размеры индукционной машины зависят от габаритной емкости печи и толщины футеровки, которую нужно преодолеть, для создания в расплаве бегущего магнитного поля [4]. Режимы инвертора при работе на линейную индукционную нагрузку отличаются несимметрией по фазам, а также вероятностью перенапряжений, особенно при аварийном сбросе нагрузки, обусловленном отсутствием выбега. Поэтому в стратегии векторного

управления ключами следует предусмотреть все возможные состояния системы электропитания. Для схемотехники трех- четырех и шестизонных обмоток индукционных машин, как правило используют варианты соединения треугольником, поскольку в звезде возникает чрезмерный (аварийный) ток в нейтральном проводе, либо недопустимая несимметрия напряжений по фазам, резко снижающая эффективность устройства [2, 5]. Помимо трехфазных индукторов применение нашли комплексы, с увеличенным числом индуктирующих обмоток, отличающиеся большей тяговой эффективностью и усложненной схемой замещения [6, 7].

Пример конфигурации системы электропитания плоского укороченного шестизонного индуктора с двумя трёхфазными обмотками показан на рис. 1.

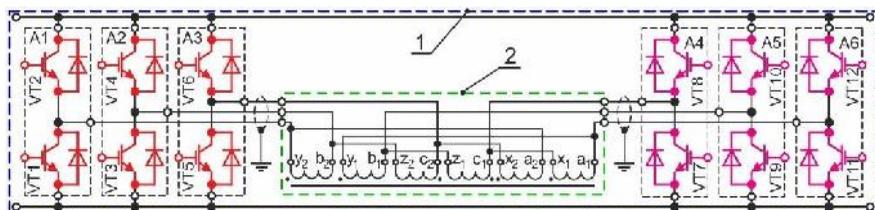


Рис. 1. Конфигурация шестизонной ЛИМ и инвертным источником питания

Схема подключения силового звена частотного инвертора, построенного на базе полумостов ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_6$ ), подключенного к шестизонному индуктору показана на рис. 1. Силовой модуль – 1, индукционная машина обозначена – 2. Учитывая многообразие режимов ЛИМ при сложной конфигурации обмоток необходимо сформулировать комплекс требований, подлежащих учету, при разработке стратегии управления ключами инвертора [8 – 12]. Каждое из требований необходимо проанализировать в системе математического моделирования и получить количественные характеристики динамики и статики режимных параметров, требующих учета при построении алгоритма работы ШИМ-контроллера.

Пример векторной диаграммы намагничивающих сил (НС) концентрических обмоток шестизонного индуктора показан на рис. 2. Фазовым соотношениям зубцовых НС с индексом 1 трехфазных обмоток индуктора (рис. 1), соответствует группа модулей  $A_{4-6}$ . Режим НС с индексом 2 обеспечивает группа модулей  $A_{1-3}$ . По диаграмме видно, что изначально симметричная система может становиться неуравновешенной при инверсии обмотки средней фазы в каждой катушечной группе [13]. Эту особенность также следует учитывать при анализе режимов индуктора. При шестизонной конструкции ЛИМ имеет шесть сосредоточенных обмоток, по 10 - 12 двухслойных секций в каждой, локализованные между семью зубцами.

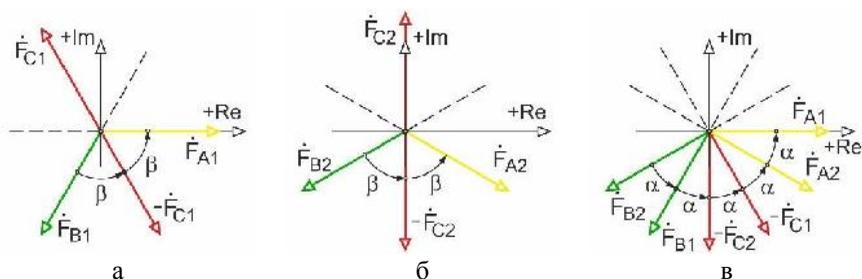


Рис. 2. Векторные диаграммы НС обмоток шестифазной ЛИМ

В представленной на рис. 1 конфигурации предусмотрено включение шестифазной обмотки с параметрами: число фаз  $m = 6$ , число пар полюсов  $2p = 6/4$ , число зубцов  $Z = 7$ , фазная зона МДС  $\alpha = 30$ . Фактически шестифазный инвертор обеспечивает режим сдвоенных трехфазных обмоток с инвертированными средними фазами в конфигурации AZBXCУ. Представленная схематика подключения индуктора к инвертору характерна для машин продольного поля с кольцевыми обмотками [14].

Сформулируем комплекс важнейших требований к синтезу алгоритма управления силовыми ключами частотного инвертора.

1. Стратегию управления разрабатывают исходя из условия создания несвязных  $n$ -трехфазных (в том числе шестифазной) систем ЭДС.
2. Управление фазовыми сдвигами режимных параметров каждой фазы должно обеспечивать свойства, приближающиеся к идеализированному источнику тока.
3. Управление – векторное. Инвертор не более чем трёхуровневый.
4. Транспорт энергии в рабочем режиме, а также в аварийных состояниях должен предусматривать автоматическую рекуперацию произвольных фаз.
5. Закономерности обращения фаз из режима потребления в режим генерации, программируют по результатам анализа совокупности установившихся режимов, конкретного вида машины.
6. Интервалы дискретизации выбирают с учетом условия, что частота ШИМ должна на три и более порядка превосходить рабочую частоту индукционной машины.
7. Работа системы управления в аварийном режиме должна предусматривать сброс мощности в интервалы времени, в кратное число раз меньшие скорости нарастания напряжения шины постоянного тока.
8. Стратегия управления ключами должна предусматривать возможность реверсирования электромагнитного режима в любой временной интервал установившегося состояния системы.
9. И разгон и торможение системы электропитания линейной индукционной машины должны иметь длительность, меньшую на порядок, нежели продолжительность технологического режима.

10. Быстродействие обратных связей системы автоматического регулирования должно на два и более порядка превышать длительность временных интервалов, обусловленных дискретизацией.
11. Стабильность режимных параметров в частной и температурной областях должна быть не хуже 0,1 %.
12. Функционирование системы управления и алгоритмов регулирования режимами ключей должно обладать универсальностью, в пределах одного класса индукционных МГД-машин.
13. Работа системы управления должна обеспечивать двухчастотные режимы линейных индукционных машин, а также комбинированное включение двухфазных и многофазных обмоток.
14. Система управления должна отвечать особому требованию повышенной устойчивости в крайне неблагоприятной электромагнитной обстановке.
15. Интерфейс системы управления и подсистем защиты и настройки должен поддерживать стандартные протоколы передачи данных, включая дистанционное управление.

Другие требования формулируют исходя из типовой стратегии управления частотным электроприводом, в части не противоречащей характерным режимам несимметричных ЛИМ. Обязателен учет специфики каждого конкретного вида индукционной машины, полюсности ее индуктора, числа фаз, характеристик обмоток и особенностей технологии применения [14]. Характер распределения зубцовых магнитных потоков и тяговых усилий при питании индукторов металлургических ЛИМ от многофазного IGBT-инвертора рассмотрен в других работах [1, 4, 13]. Исследование тяговых характеристик некоторых разновидностей ЛИМ при разной частоте питания представлено в литературе [15].

**Заключение.** Металлургические линейные индукционные машины представляют собой узкую группу индукционных устройств, обладающих специфическими свойствами. Краевые эффекты и результирующая электромагнитная несимметрия индукторов ЛИМ вынуждают обратиться к разработке источников питания, построенных с применением силовых IGBT-транзисторов. Специализированные источники, как правило, имеют систему управления, предусматривающую стабильную работу с экстремальными рабочими характеристиками и в крайне жестких эксплуатационных условиях. Стратегия управления заложенная в виде программного кода в контроллер должна предусматривать многочисленные критические режимы, резко отличающие многофазный инвертор от типового преобразователя, предназначенного для управления частотным электроприводом.

#### Список литературы

1. *Тяпин, А.А.* Выбор схемы инвертора для линейной металлургической МГД-машины/ А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – № 3. – С. 23-29. – ISSN: 2074-9635.
2. *Кинев, Е. С.* Схемотехника подключения IGBT-инвертора к многофазной индукционной машине/ Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // САПР и моделирование в

современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 208-215. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e61d557532.76134464.

3. *Тяпин, А.А.* IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины/ А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 96-102. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422.

4. Патент RU 2708036 С1. Головенко Е.А., Авдулов А.А., Кинев Е.С., Тимошев В.Е. Способ перемешивания расплава металла и электромагнитный перемешиватель для его реализации. Номер заявки: 2019101950. Зарегистрирован 05.10.2018. Опубликовано: 03.12.2019.

5. *Jang, D.H.* Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement/ *D.H. Jang* // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – V. 28, no. 1. – P. 526–536.

6. *Тяпин, А.А.* К задаче синтеза схемы замещения несимметричной линейной МГД-машины/ А.А. Тяпин, В.И. Пантелеев // В книге: Электроэнергетика: XV всероссийская (VII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2020. – С. 81.

7. *Кинев, Е. С.* Обобщенная схема замещения укороченной линейной индукционной МГД-машины/ Е. С. Кинев, А. А. Тяпин, К. А. Байкова, А.В. Литовченко // В кн.: Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей VII междунар. науч. конф. 30-31 июля 2020 г.– Казань: ООО «Конверт», 2020. – Ч.1. – С. 243-247. – ISBN 978-5-6044722-0-0.

8. *Хермвиль, М.* Управление изолированным затвором. Часть 1/ М. Хермвиль, А. Колпаков // Электронные компоненты. – 2008. – №6. – С. 43-50.

9. *Филатов, В.* Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения. Силовая электроника/ В. Филатов. – 2012. – № 4. – С. 38-41.

10. *Williams, B. W.* Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components. Glasgow. United Kingdom, 2006, 1432 p. ISBN: 978-0-9553384-0-3.

11. The Industrial Electronics Handbook. Power electronics and motor drives. B. M. Wilamowski and J. D. Irwin edition. Taylor and Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York. USA, 2011, 974 p.

12. *Bose B. K.* Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. Academic Press is an imprint Elsevier Inc. San Diego, California. USA, 2006, 935 p. ISBN: 978-0-12-088405-6.

13. *Туяпин, А. А.* Approach to optimization of the magnetic circuit of a threephase induction plant/ А. А. Туяпин, Е. С. Кинев, S. S. Bezhitsky // Siberian Journal of Science and Technology. – 2019. – Vol. 20. – No. 3. – P. 398–408. – Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-3-398-408.

14. *Бычков, С. А.* Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения / С. А. Бычков, С. Л. Назаров, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен. - Екатеринбург: УрФУ, 2017. - 80 с.

15. *Туяпин, А.А.* Modeling of the frequency characteristics of linear induction MHD machines/ А.А. Туяпин, Y.S. Avdulova, E.S. Kinev // Znanstvena Misel Journal, Ljubljana. 2019. № 33. Vol. 1, pp. 41-46. ISSN 3124-1123.

*Материал поступил в редколлегию 18.09.20.*

А. А. Тяпин<sup>1,2</sup>, Е. С. Кинев<sup>2</sup>  
(г. Красноярск, <sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
<sup>2</sup>ООО Тепловые электрические системы)

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ С IGBT-ИНВЕРТОРАМИ

POWER SUPPLY SYSTEM WITH IGBT INVERTERS  
FOR MHD STIRRERS OF ALUMINUM MELT

*Показана структура системы электропитания МГД-индукторов, предназначенных для перемешивания жидкого алюминия в печах. Обозначены основные проблемы улучшения качества электроэнергии в сети. Предложен способ комбинированного подключения двухфазных и трехфазных линейных индукционных машин металлургического назначения с применением частотных IGBT-инверторов.*

*The structure of the power supply system for MHD inductors intended for stirring liquid aluminum in furnaces is shown. The main problems of improving the quality of electricity in the network are identified. A method is proposed for the combined connection of two-phase and three-phase linear induction machines for metallurgical purposes using frequency IGBT inverters.*

*Ключевые слова: Линейная индукционная машина, МГД-индуктор, частотный инвертор, трехфазная распределительная сеть, система электроснабжения.*

*Keywords: Linear induction machine, MHD inductor, frequency inverter, three-phase distribution network, power supply system.*

**Введение.** Для перемешивания жидкого алюминия в миксерах и печах применяют линейные индукционные машины (ЛИМ) с укороченными индукторами при разном количестве фаз [1]. Стационарные индукторы имеют хорошую надежность и нередко сохраняют работоспособность даже после 20 лет интенсивной эксплуатации. В тоже время тиристорные источники питания прежних поколений, как правило, морально устарели и физически изношены. Поэтому на этапе реконструкции реальна ситуация применения современных IGBT-инверторов, которые должны обеспечивать электропитание двухфазных индукторов и современных – трехфазных [2].

Пример архитектуры для действующей системы электропитания (СЭП) комплекса электромагнитного перемешивания расплава алюминия, для пары миксеров емкостью 50 тонн, показан на рис. 1. Индукционные МГД-машины с различным числом фаз имеют не только разную конструкцию, но и разные режимы работы [3]. В зависимости от требуемой технологической эффективности и стоимости проекта могут использоваться трех, четырех,

шести или восьмизонные ЛИМ. Поэтому в системе электроснабжения и АСУ ТП комплекса МГД-перемешивания следует предусмотреть корректное сопряжение существенно различающихся источников питания с собственным контроллерным управлением [4].

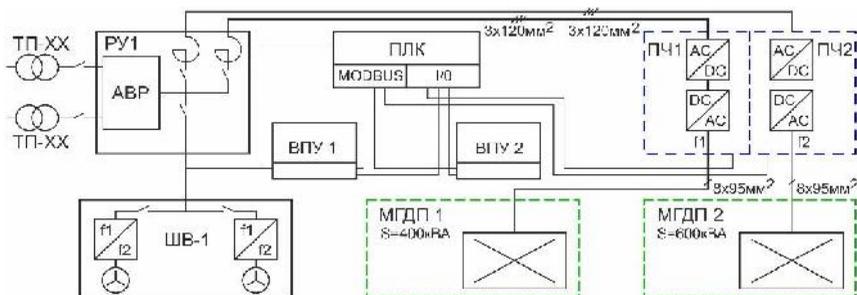


Рис. 1. Упрощенная архитектура системы электропитания

При этом непременно присутствует условие универсальности СЭП, чтобы старый двухфазный индуктор, можно было, при необходимости, заменить на новый, трехфазный или многофазный. Помимо конструктивных и режимных особенностей для всех типов ЛИМ следует обеспечить электромагнитную совместимость индукционного комплекса с цеховым оборудованием [5]. Для снижения влияния индукционного оборудования на сеть нередко применяют разделительные трансформаторы [6]. Однако для мощных комплексов такое решение оказывается экстремально дорогостоящим.

**Постановка задачи.** Для согласованной работы двухфазных и трехфазных индукторов в едином комплексе МГД-перемешивания расплава алюминия необходимо разработать структуру СЭП, сопряженной с распределительной сетью и системой электроснабжения предприятия, обеспечивающую нужную технологическую эффективность, приемлемое качество электроэнергии, высокую надежность и гибкость управления режимами, посредством АСУ ТП верхнего уровня. Помимо трехфазных МГД-машин СЭП должна быть адаптирована для работы с многофазными индукторами шести- и восьмизонной конструкции, обеспечивающими повышенную технологическую эффективность.

**Решение.** Для построения эффективной и недорогой СЭП необходимо проанализировать режимы комплекса электромагнитного перемешивателя расплава алюминия, алгоритмы работы системы управления, структуру сетевого подключения и схемотехнику электропитающего оборудования, рассчитать потери и оценить динамику [7 – 11].

Схема силового модуля мощного двухуровневого транзисторного инвертора восьмизонной ЛИМ показана на рис. 2.

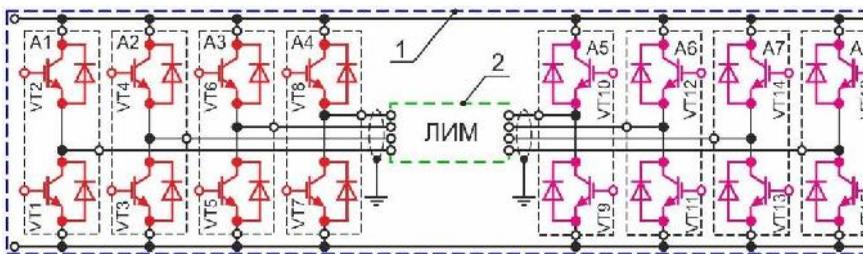


Рис. 2. Схемное решение универсального силового модуля инвертора

Низкочастотный инвертор – 1, линейная индукционная машина – 2. В зависимости от комплектации частотного преобразователя, алгоритмов работы ШИМ-контроллера и стратегии управления ключами, инвертор можно применить для питания, как двухфазных, так и многофазных индукторов обновленной серии ЛИМ. Тот же инвертор с модифицированной системой управления пригоден для электропитания двухфазных индукторов поперечного поля. Необходимое количество стоек и другое оснащение инвертора определяют на этапе решения инженеринговой задачи, при адаптации оборудования под конкретные индукторы, режимы электрической сети и системы электроснабжения [12, 13].

Характерные кривые, потребляемых трехфазным комплексом МГД-перемешивания мгновенных токов, показаны на рис. 3. В целом вид характеристик определяется работой выпрямителей, однако явно видно присутствие модулирующей огибающей, на частоте около 2 Гц, обусловленной рабочим режимом индукционного комплекса.

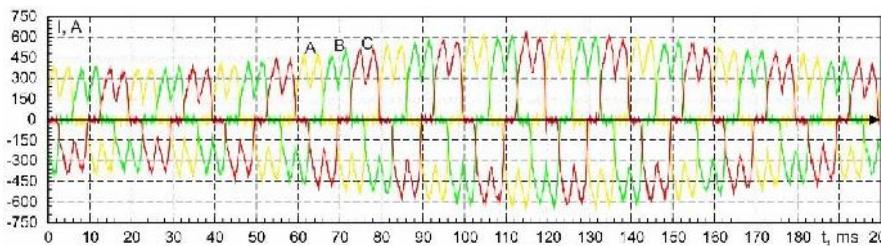


Рис. 3. Динамика потребляемых МГД-перемешивателем токов

Судя по характеристикам рис. 3, искажение формы токов потребления, может достигать 70-80 %. Такие режимы крайне неблагоприятно отражаются на качестве электроэнергии, особенно, при относительно слабой цеховой сети. Одно из крайних проявлений сопутствующего искажения напряжений показано ниже. Мгновенные кривые линейных напряжений системы электроснабжения ограниченной мощности показаны на рис. 4. Без

специальных средств фильтрации высших гармоник, значения коэффициента искажения напряжений, могут достигать 10-12 % и более.

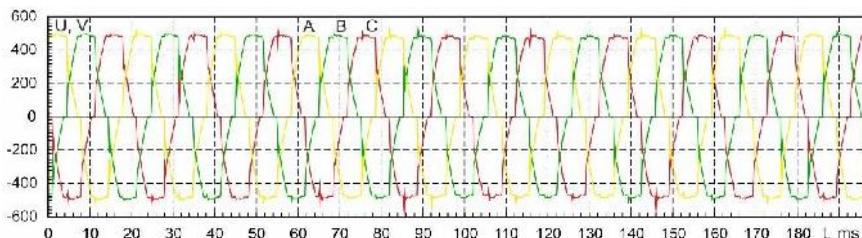


Рис. 4. Мгновенные напряжения цеховой сети при наибольшей нагрузке

Включение фильтрующих электромагнитных дросселей и силовых токоограничивающих реакторов несколько улучшает ситуацию, однако не позволяет в полной мере обеспечивать надлежащее качество электроэнергии в системах электроснабжения. Это особенно важно учитывать при поставке оборудования на экспорт. Практический анализ режимов электропотребления с применением измерительного оборудования показывает, что вопрос применения на входе индукционного комплекса специального трансформатора отнюдь не праздный. При тщательном учете жестких требований европейских директив по электромагнитной совместимости, рассмотренная выше архитектура системы электропитания оказывается непригодной [14]. Вместе с тем, при разработке вариантов структуры системы электропитания и выборе оборудования окончательное решение определяется на основе технико-экономических расчетов с учетом требований отечественных стандартов [15].

Похожие негативные последствия для качества электроэнергии можно наблюдать и в отношении коэффициента несимметрии. Наиболее заметно это при использовании в качестве МГД-перемешивателей индукционных машин с числом обмоток не кратным трем. Несколько меньшим влиянием на качество напряжения обладают трехфазные и шестифазные машины, однако технологическая инверсия средней фазы ЛИМ также негативно сказывается на симметрии электромагнитного режима индукционного комплекса [16]. При компоновке оборудования на промышленной площадке с мощными индукторами приходится решать задачи анализа распределения токов в проводниках и электромагнитной совместимости вплоть до оценки возможностей использования коротких сетей [17, 18].

Пример одного из вариантов схемного решения при построении универсального силового звена для МГД-перемешивателя показан на рис. 5. Совмещение в едином комплексе двухфазного индуктора МГДП 1 и шестифазного восьмизонного индуктора МГДП 2 становится возможным при использовании силового звена по рис. 2. Шина постоянного тока в свдвоенном инверторе (рис. 5) показана комбинированной, а алгоритмы работы ШИМ-

контроллера должны обеспечивать возможность двухчастотного подключения линейной индукционной машины, а также импульсного электропитания.

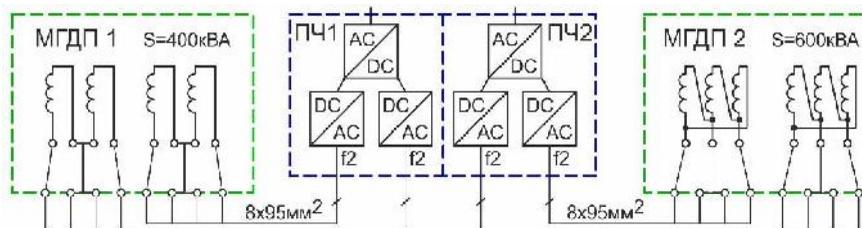


Рис. 5. Схема электропитания силовых звеньев инвертор – индуктор

Практическую привязку разрабатываемой архитектуры системы электропитания выполняют на месте проведения реконструкции с использованием цеховой планировки. Необходимо заметить, что естественный коэффициент мощности ЛИМ крайне мал и не превышает значений 0,05-0,1. Поэтому наряду с мерами противодействия искажениям решают задачи компенсации реактивной мощности.

**Заключение.** Предложенный подход к разработке структуры системы электропитания МГД-перемешивателей с индукторами разной конструкции позволяет совместить разнородное оборудование в ходе реконструкции производства. При этом существует возможность обновления как силовых узлов, так и системы управления МГД-комплексов. Помимо удобства конфигурирования, разных вариантов архитектуры системы электропитания, предусмотрена возможность ослабить влияние частотных преобразователей на сетевое напряжение и улучшить качество электроэнергии. Одним из средств снижения несинусоидальности токов в фазах системы электроснабжения, повышения коэффициента мощности, а также уменьшения несимметрии и несинусоидальности напряжений распределительной сети следует рассматривать использование специального разделительного трансформатора, в совокупности применением с локальным применением фильтрокомпенсационных устройств.

### Список литературы

1. Кинев, Е.С. Схемотехника подключения IGBT-инвертора к многофазной индукционной машине/ Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // САИР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 208-215. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e61d557532.76134464.
2. Тяпин, А.А. Двухфазная индукционная нагрузка в трехфазной распределительной сети / А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 1. – С. 42-51. – ISSN 2071-2219. – DOI: 10.18635/2071-2219-2020-1-42-51.
3. Тяпин, А. А. Двухфазная линейная машина с IGBT-инвертором/ А. А. Тяпин, В. И. Пантелеев // В кн.: Электроэнергетика: XV всероссийская (VII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2020. – С. 82.

4. *Тяпин, А.А.* IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины/ А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 96-102. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422.
5. *Kinev E., Tyapin A.* Improving the quality of electricity of a metallurgical enterprise by balancing the induction load. *Norwegian Journal of development of the International Science*. Oslo, 2020, No 40. Vol. 1. pp. 33–40. – ISSN 3453-9875.
6. *Кинев, Е.С.* Технология применения модульного насоса-дозатора расплава алюминия на стационарном миксере/ Е. С. Кинев, А. А. Тяпин // В кн.: Сборник научных работ 65 Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения. – Москва: ЕНО, 2020. – № 7 (65). – Ч. 2. – С. 110-114. – ISSN: 2411-1899
7. *Kinev E.S., Tyapin A.A., Litovchenko A.V.* Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. *The scientific heritage*. Budapest, 2020. No 49-1, Vol. 1. pp. 69-74. – ISSN 9215-0365.
8. Фризен, В.Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий/ В.Э. Фризен, С.Л. Назаров // Учебное пособие. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УФУ им. Б.Н.Ельцина, 2018. – 180с.
9. *Железко, Ю. С.* Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов/ Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
10. *Железко, Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов/ Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
11. *Карпов, Е.А.* Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях. Учебно-методическое пособие/ Е.А. Карпов, В.Н. Тимофеев, Ю.С. Перфильев, М.Ю. Хацаюк, М.В. Первухин. – Красноярск: СФУ, 2019. – 189 с. – ISBN: 978-5-7638-4081-0
12. *Кинев, Е.С.* Особенности расчета режима сети с двусторонним питанием/ Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – № 7.– С. 12-18. – ISSN: 2074-9635.
13. *Герасименко, А. А.* Электроэнергетические системы и сети: Конспект лекций/ А. А. Герасименко, Е. С. Кинев, Т. М. Чупак. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 279 с.
14. Directive 2014/30/eu of the European parliament and of the council. 29.3.2014 Official Journal of the European Union L 96/79. 28 p.
15. ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 44 с.
16. *Кинев, Е. С.* Обобщенная схема замещения укороченной линейной индукционной МГД-машины/ Е. С. Кинев, А. А. Тяпин, К. А. Байкова, А.В. Литовченко // В кн.: Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей VII междунар. науч. конф. 30-31 июля 2020 г.– Казань: ООО «Конверт», 2020. – Ч.1. – С. 243-247. – ISBN 978-5-6044722-0-0.
17. *Алиферов, А.И.* Симметрирование электрических параметров расшитованного жесткого токоподвода руднотермической электропечи/ А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко, А.В. Бордунова // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 54-58.
18. *Алиферов, А.И.* Метод расчета параметров шихтованных пакетов руднотермических печей/ А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 41-44.

*Материал поступил в редколлегию 18.09.20.*

П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, А.И. Беззубенко  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

### RESEARCH OF RESONANT VOLTAGE CONVERTERS

*Выполнен аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром, обосновано применение полумостового резонансного LLC преобразователя с последовательным резонансным контуром в системах электрооборудования транспортных средств.*

*The analytical calculation and determination of the operating modes of resonant converters with a series resonant LC circuit, parallel resonant LC circuit, series-parallel resonant LCC circuit and series-parallel resonant LLC circuit are performed. the application of a semi-bridge resonant LLC Converter with a series resonant circuit in vehicle electrical equipment systems is justified.*

*Ключевые слова: резонансный преобразователь, аналитический расчёт, передаточные функции, транспортные средства, энергоэффективность.*

*Keywords: resonant converter, analytical calculation, transfer function, the vehicle energy efficiency.*

С точки зрения повышения энергоэффективности полупроводниковые резонансные преобразователи (РП) с «мягкой» коммутацией ключей на современном этапе являются в целом весьма удачным решением для применения в устройствах электропитания и системах индукционного заряда аккумуляторных батарей (АКБ) электрических и гибридных транспортных средств. Однако в силу многообразия схемных решений, весьма актуально исследование и сравнительный анализ различных типов РП для выбора топологии, целесообразной в системе электрооборудования транспорта.

В общем случае источник вторичного электропитания, функционирующий по принципу резонансного переключения транзисторов, имеет структуру, представленную на рис. 1. Передаточная функция  $H(s)$  данного преобразователя определяется выражением:

$$H(s) = \frac{U_r(s)}{U_g(s)},$$

где  $U_r(s)$  – напряжение на нагрузке,  $U_g(s)$  – входное напряжение



Рис.1. Структурная схема резонансного преобразователя

Ключевым функциональным узлом данных преобразователей является резонансный контур, обусловленный резонансной индуктивностью и резонансной ёмкостью (и различной их комбинацией). Тип преобразователя определяется, исходя из способа соединения данных компонентов. Токи и напряжения, сформированные в резонансном контуре, передаются в нагрузку.

Несмотря на всё многообразие существующих резонансных преобразователей, наибольшее распространение получили следующие [1]:

- РП с последовательным резонансным контуром;
- РП с параллельным резонансным контуром;
- РП с последовательно-параллельным резонансным контуром.

На основе схем замещения произведён аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром. Выявлено, что для преобразователей с последовательным резонансным LC контуром при малых нагрузках практически невозможна регулировка выходного напряжения. Теоретически, частота коммутации силовых полупроводниковых ключей должна быть бесконечной, чтобы регулировать выходное напряжение преобразователя при работе на холостом ходу. Для РП с параллельным резонансным LC контуром отсутствует проблема работы с малой нагрузкой, однако существует проблема, связанная с тем, что в процессе работы в резонансном контуре осуществляется циркуляция большой реактивной мощности, ввиду чего присутствуют большие потери при выключении силовых ключей даже при малой нагрузке.

Полупроводниковый преобразователь с последовательно-параллельным резонансным LCC контуром включает комбинацию последовательного и параллельного резонансных контуров и демонстрирует характеристики, свойственные данным топологиям преобразователей. При работе РП в режиме, близком к режиму холостого хода, РП работает как преобразователь с параллельным LC резонансным контуром. При увеличении нагрузки данный преобразователь начинает работать как преобразователь с последовательным LC резонансным контуром. Несмотря на то, что РП преобразователь с последовательно-параллельным LCC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное

напряжение в заданном диапазоне значений, величина реактивной мощности, циркулирующей в резонансном контуре, всё ещё оказывает существенное влияние на эффективность устройства, особенно при работе на холостом ходу.

Выявленные особенности функционирования описанных выше РП ограничивают их применение в составе систем электроснабжения транспортных средств. Данные проблемы решены в РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром [2].

Определено, что РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное напряжение в заданном диапазоне значений. Также как при полной нагрузке, так и в режиме работы, близком к режиму холостого хода, построенный по данной топологии РП имеет высокие значения коэффициента полезного действия при широком диапазоне входных напряжений питающей сети.

Определено, что импеданс РП с LLC колебательным контуром вычисляется по следующей формуле:

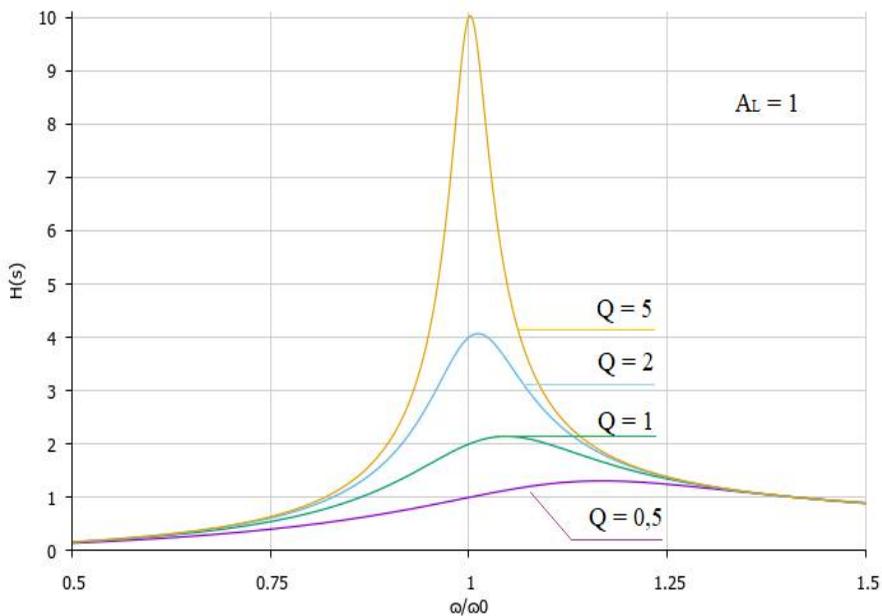
$$|Z| = Z_0 Q \sqrt{\frac{(1 + A_L)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right] + \frac{1}{Q^2} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{A_L}{A_L + 1} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{1 + \left[ Q \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right) (1 + A_L) \right]^2}},$$

где  $Z_0$  – импеданс контура на резонансной частоте,  $Q$  – добротность резонансного контура, определяемая параметрами компонентов резонансного контура и величиной нагрузки,  $\omega$  – частота коммутации ключей,  $\omega_0$  – резонансная частота колебательного контура,  $A_L$  – коэффициент, равный отношению величины индуктивности намагничивания трансформатора  $L_m$  к величине индуктивности резонансного дросселя  $L_r$  [2].

График зависимости величины передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC контуром от частоты коммутации полупроводниковых ключей при различных значениях нагрузки представлен на рис. 2. При номинальной нагрузке преобразователь функционирует на резонансной частоте ( $\omega = \omega_0$ ). В режиме работы, близком к режиму холостого хода ( $Q=0,5$ ), рабочая частота преобразователя увеличивается, что соответствует экстремуму графика передаточной характеристики. Диапазон рабочих частот РП определяется коэффициентом  $A_L$ , который определяет реакцию преобразователя на изменение величины нагрузки.

При малом значении коэффициента  $A_L$  при изменении режима работы от номинального до режима близкого к холостому ходу, наблюдается существенное увеличение частоты коммутации ключей, в то время как при большом значении коэффициента  $A_L$  рабочий диапазон частот оказывается

сильно ограничен, реакция передаточной функции на изменение нагрузки существенно увеличивается. Подходящие для практического применения режимы работы наблюдаются при нахождении коэффициента  $A_L$  в диапазоне  $0,125 \dots 0,5$ .



*Рис. 2. Зависимость передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром от частоты коммутации при  $A_L=1$*

Таким образом, РП с последовательно-параллельным LLC контуром эффективно функционирует в широком диапазоне изменения нагрузки, что весьма важно для применения на электротранспорте.

#### Список литературы

1. Yang, B. "Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System," Ph.D dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng. Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, Sep. 2003.
2. Tatyko, P.S. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems / P.S. Tatyko, G.A. Fedyaeva, V.V. Kobishanov, V.P. Fedorov // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 461-464.

*Материал поступил в редколлегию 20.10.20.*

П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, А.И. Беззубенко, А.Г. Надточей  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ**

### **IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS**

*Представлены результаты исследования путей повышения энергоэффективности систем электродвижения на основе применения резонансных полупроводниковых преобразователей с «мягкой» коммутацией ключей, использования ВТСП - технологий и совершенствования системы управления электроприводом.*

*The article presents the results of research on ways to improve the energy efficiency of electric propulsion systems based on the use of resonant semiconductor converters with "soft" key switching, the use of HTS technologies and improvement of the electric drive control system.*

*Ключевые слова: системы электродвижения, энергоэффективность, резонансные преобразователи, криогенное охлаждение, управление движением.*

*Keywords: electric propulsion systems, energy efficiency, resonant converters, cryogenic cooling, motion control.*

Важнейшим фактором, стимулирующим существенный рост парков электрического наземного транспорта, является развитие электроэнергетических комплексов, включающих в себя системы накопления, преобразования и передачи энергии, а также технологий электродвижения, позволяющих применять новые компоновочные и аэродинамические решения с одновременным существенным снижением стоимости производства и совершенствованием эксплуатационных показателей.

Не меньший интерес к развитию систем электродвижения наблюдается со стороны аэрокосмической и морской отраслей, связанный с необходимостью уменьшения вредных выбросов в окружающую среду, экономией топлива, снижением стоимости изделий. Развитие данных направлений связано с развитием критических технологий, позволяющих добиться прорывных решений.

Для создания энергоэффективных систем электродвижения необходимо совершенствовать как систему электропитания, так и непосредственно

систему электрического привода и управления движением объекта.

Одним из перспективных направлений снижения потерь в полупроводниковых преобразователях системы электропитания является применение резонансной топологии и мягкой коммутации. Произведён аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром. Выявлены особенности работы, определяющие применение данных топологий в составе систем электродвижения, в частности, в составе источников вторичного электропитания. В процессе анализа выявлено, что полумостовой преобразователь с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром наиболее соответствует требованиям, предъявляемым к системам вторичного электропитания устройств электродвижения.

Выполнено имитационное компьютерное моделирование данного преобразователя в среде LTSpice. Результаты моделирования показывают, что полумостовой резонансный LLC-преобразователь обладает высокой энергоэффективностью, низкими электромагнитными помехами и соответствует эксплуатационным и техническим требованиям для применения в составе систем электродвижения [1]. В процессе проведения исследований было выявлено, что для полевых транзисторов характерен гистерезис выходной ёмкости, существенно влияющий на работу преобразователя. Была разработана методика и проведены натурные исследования данного явления у различных типов транзисторов, выбран наилучший вариант.

Максимальная мощность гибридных силовых установок достигает критических значений потребления электроэнергии на уровне 500-1000 кВт и при должном подходе реализуема посредством применения традиционных материалов, устройств, принципов теплоотвода и использования современной компонентной базы. Одним из вариантов решения проблемы реализации систем электродвижения на мощности свыше 1000 кВт является применение изделий на основе технологий высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и криогенного охлаждения для преобразовательной техники. Предлагаемая интеграция электрооборудования в единый криогенный контур позволит обеспечить значительную экономию веса и объёма перспективных систем электродвижения.

Для определения характеристик полупроводниковых приборов при

функционировании в среде жидкого азота были проведены лабораторные исследования и выполнено сравнение экспериментальных данных по определению характеристик транзисторов с результатами аналитического расчёта. Выявлена высокая корреляция полученных результатов.

На основе проведённых исследований предложены структуры силовых полупроводниковых модулей, применение которых позволяет добиться кратного снижения потерь мощности при охлаждении жидким азотом. Предложена структурная схема построения системы электроснабжения транспортного средства, функционирующая в едином криогенном контуре.

Помимо совершенствования системы электропитания необходимо эффективное управление движением объекта как единой электромеханической системой, то есть энергоэффективное управление его электроприводом. При этом следует учитывать динамику механической части объекта.

Наиболее точные результаты можно получить при использовании программ имитационного компьютерного моделирования MATLAB, SimInTech, UM, позволяющих создать комплексную модель объекта на основе имитации отдельных его функциональных узлов и модулей [2;3]. При этом совмещение отечественных программных комплексов SimInTech и UM на основе специального интерфейса, разработанного в лаборатории «Вычислительная механика» Брянского государственного технического университета, даёт возможность производить моделирование электрической подсистемы объекта в SimInTech, а механической – в UM с высокой степенью детализации, что позволяет исследовать систему управления электродвижением и динамические качества механической части объекта в их взаимодействии и взаимовлиянии.

Выполнено моделирование электродвижения шестиосного локомотива с составом при реализации предельных по сцеплению тяговых и тормозных усилий на основе совмещения программных комплексов (ПК) SimInTech и UM (рис. 1) и произведено сравнение результатов, полученных при моделировании тех же режимов движения на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и UM.

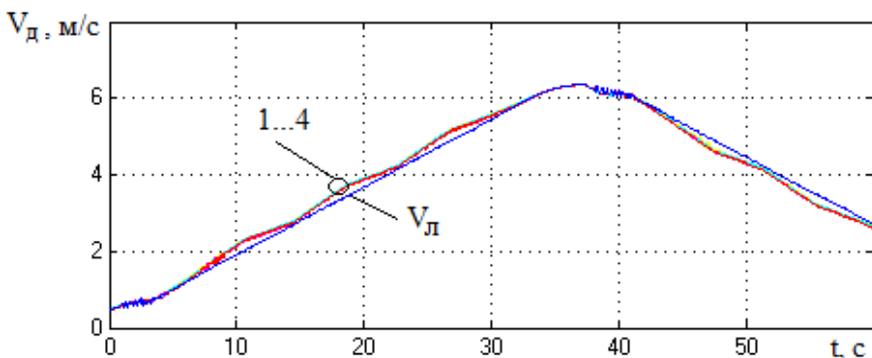


Рис. 1. Скорости роторов асинхронных тяговых двигателей (осей 1...4 соответственно), приведенные к скорости колеса, и скорость локомотива ( $V_{л}$ )

Результаты исследования использованы:

- при разработке модулей питания класса AC/DC при выполнении опытно-конструкторской работы по заданию Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, ГК №16411.4432017.11.112.

- при разработке концепции развития силовой компонентной базы и преобразовательной техники для применения в системах ВТСП-электродвижения при выполнении аванпроекта по заданию Фонда перспективных исследований, договор №6/164/2019-2020ав.

Планируется продолжить исследование систем электродвижения на основе совмещения программных комплексов SimInTech и UM.

### Список литературы

1. Tatyko P.S. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems / P.S. Tatyko, G.A. Fedyeva, V.V. Kobishanov, V.P. Fedorov // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 461-464.

2. Федяева, Г.А. Энергоэффективное двухзонное регулирование электропривода с прямым управлением моментом асинхронных двигателей/ Г.А.Федяева, Ю.М. Иньков, Д.В.Конохов, А.Н. Тарасов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 1. – С. 31 - 36.

3. Fedyeva G.A., Smorodova T.V., Kovalev R.V. Electromechanical System of the Asynchronous Electric Drive of Movement of a Bridge Crane Modeling// 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), - 978-1-5090-1322-7/16/\$31.00 ©2016 IEEE.

Материал поступил в редколлегию 20.10.20.

В.А. Хвостов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ  
ПРИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕМ АВТОМАТИЧЕСКОМ  
ВКЛЮЧЕНИИ РЕЗЕРВА**

**SIMULATION OF PROCESSES IN A SYNCHRONOUS MOTOR WITH HIGH-SPEED  
AUTOMATIC RESERVE ACTIVATION**

*Приводятся результаты исследования процесса включения синхронного двигателя на резервную секцию с помощью быстродействующего автоматического включения резерва.*

*The results of a study of the process of switching on a synchronous motor to a backup section using a high-speed automatic reserve switch-on are presented.*

*Ключевые слова: синхронный двигатель, резервная секция, быстродействующее автоматическое включение резерва.*

*Keywords: synchronous motor, backup section, high-speed automatic reserve switch-on.*

Быстродействующий автоматический ввод резервного питания (БАВР) при внезапном нарушении электроснабжения — наиболее эффективный способ сохранения динамической и результирующей устойчивости узла промышленной нагрузки с синхронными двигателями (СД). При БАВР должен обеспечиваться успешный самозапуск возбужденных СД без предварительного гашения их магнитного поля. Возбужденный СД при потере питания переходит в режим генератора, вырабатывая ЭДС, изменяющуюся во времени как по величине, так и по фазе.

В течение малого, относительно механической постоянной, времени выбега СД модуль ЭДС меняется незначительно. Поэтому основным информативным признаком режима выбега является изменение угла поворота ротора СД во времени. Включение синхронного двигателя на резервную секцию без потери устойчивости возможно только в случае достаточно высокого уровня напряжения на этой секции (не менее 80%) и разницей в углах между напряжениями на синхронном двигателе и резервной секции по всем фазам не более 30°.

Для исследования процессов включения синхронного двигателя при различных сочетаниях напряжений по амплитуде и фазе у синхронного двигателя и резервной секции собрана средствами SimPowerSystem модель системы электроснабжения с двумя секциями шин, к каждой из которых подключены синхронный двигатель и активная нагрузка (рис.1).

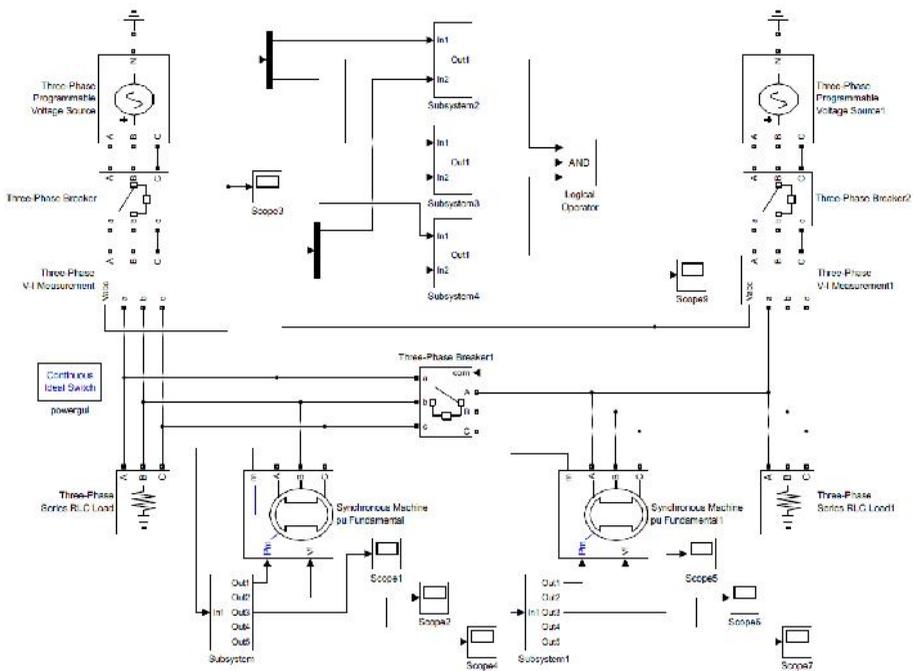


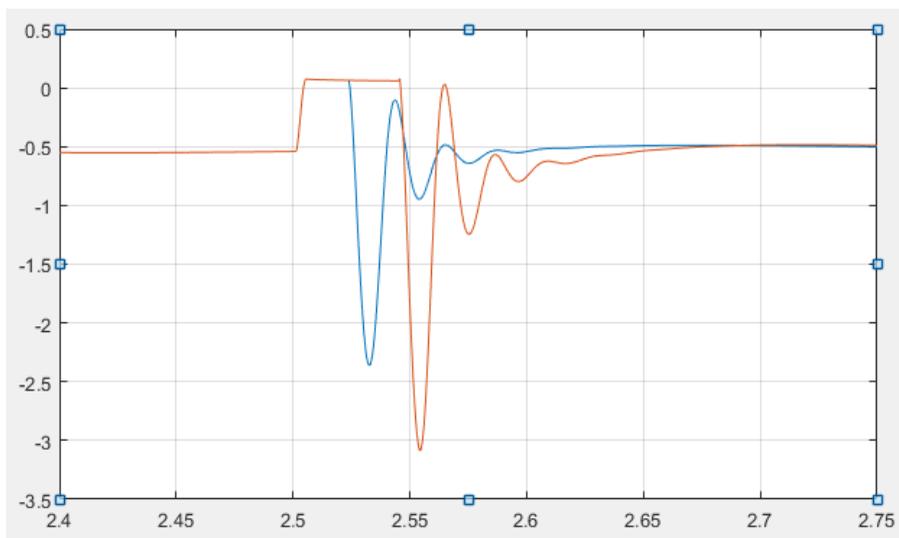
Рис.1. Модель электроснабжения 2-х секций с БАВР

В составе модели два ввода с автоматическими выключателями на каждом для питания секций шин, к которым подключены синхронные двигатели с системой обеспечения пуска Subsystem и Subsystem1 и трехфазная активная нагрузка. Между секциями установлен секционный изолятор для включения резерва в случае отключения одного из вводов.

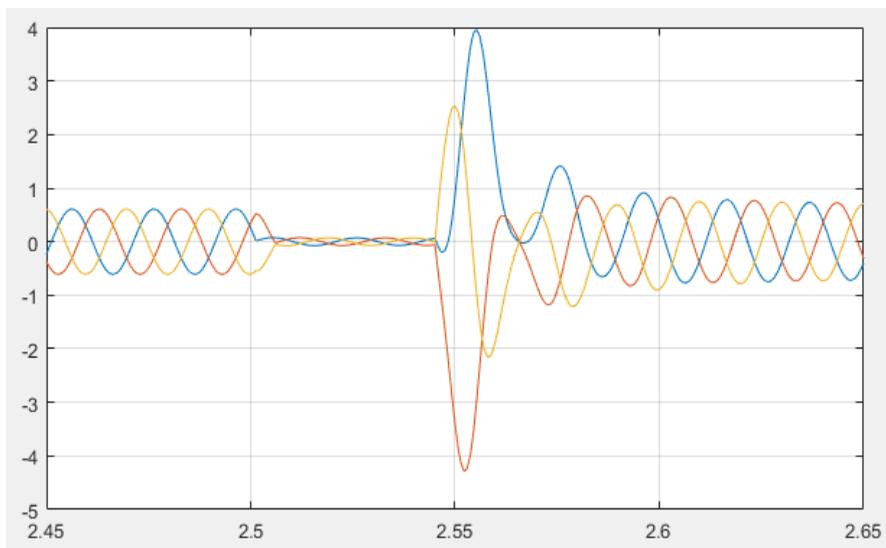
Секционный изолятор управляется системой синхронизации, в основе которой три модуля определения угла между соответствующими фазами напряжения на синхронном двигателе и резервной секции Subsystem с номерами 2,3,4. Если по всем фазам угол будет менее уставки, на выключатель идет сигнал на замыкание.

На рис.2 показаны результаты моделирования момента двигателя при уставке допустимой разницы между фазами в 20 и 30°. На рис.3 показаны результаты моделирования фазного тока двигателя при той же разнице. При моделировании принимались равные значения амплитуды напряжения на вводах при начальном рассогласовании по всем фазам в 5°.

Результаты моделирования показывают превышения токов и моментов синхронного двигателя в 3-4 кратном превышении к номинальным, принятым за единицу.



*Рис.1. Момент двигателя при включении на резерв при рассогласовании фаз в 15 и 30°, начальном рассогласовании 5° и равном напряжении на секциях*



*Рис.2. Токи статора при переходе на резервную секцию с углом рассогласования в 30°*

На рис.3 показан ток двигателя при начальном рассогласовании в 150° и включении на резервную секцию при рассогласовании 30°. В этом случае скорость двигателя и напряжение на выходе снижаются более существенно,

чем в ранее рассмотренных случаях и последствия такого включения на резервное питание более серьезные.

Как следует из рис.3 при таком начальном рассогласовании синхронный двигатель снижает скорость, при этом напряжение на его выводах падает, броски тока достигают значений, соизмеримых с пусковыми токами.

Приведенные результаты моделирования перехода синхронного двигателя на резервное питание с помощью БАВР требует предварительного исследования с учетом таких факторов как момент инерции, нагрузка на валу двигателя, переход с повышенного значения ЭДС при работе на своей секции на секцию с пониженным напряжением, время срабатывания выключателя. Предлагаемая структура модели на основе приложения SimPowerSystem позволяет провести такое исследование и внести уточнения в уставки БАВР и алгоритм его работы с целью более надежного и эффективного резервирования электроснабжения высоковольтных синхронных двигателей.

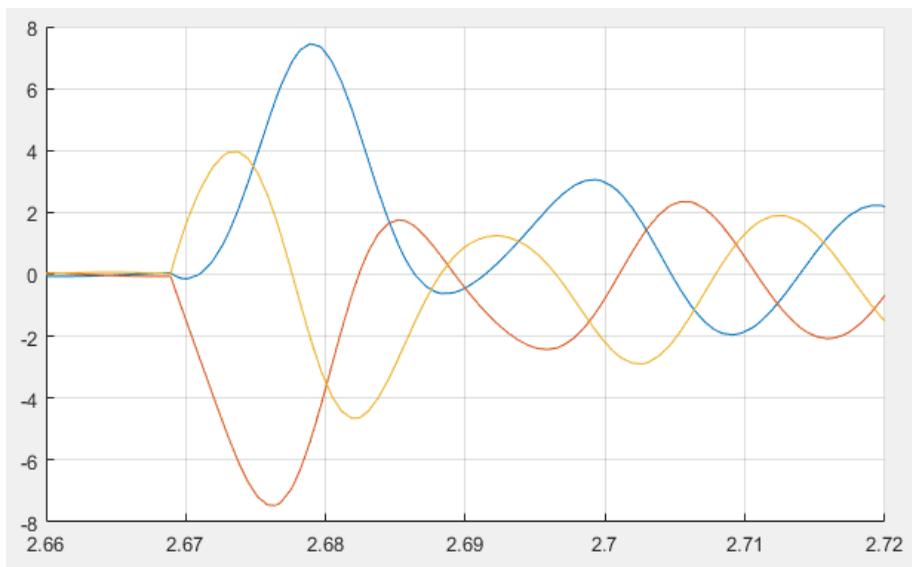


Рис.3. Токи статора при переходе на резервную секцию с углом рассогласования в  $30^\circ$  и начальном сдвиге фаз в  $150^\circ$

Материал поступил в редколлегию 16.10.20.

Н.В. Чуприна, С.В. Седых, А.А. Пугачев  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF CONTROL SYSTEMS  
OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER IN THE COMPOSITION  
OF AC ELECTRIC DRIVE

*Приведены основные энергетические показатели автономного инвертора напряжения в составе электропривода переменного тока при различных системах управления инвертором. Получены зависимости коэффициента гармонических искажений тока и напряжения от различных электрических параметров.*

*The main energy indicators of an autonomous voltage inverter as part of an AC drive with various inverter control systems are presented. The dependences of the harmonic distortion coefficient of current and voltage on various electrical parameters are obtained.*

*Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, энергоэффективность, потери, мощность, энергия, автономный инвертор напряжения, коэффициент гармонических искажений, широтно-импульсная модуляция, пространственно-векторная модуляция.*

*Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, energy efficiency, losses, power, energy, autonomous voltage inverter, harmonic distortion, pulse-width modulation, space-vector modulation.*

Автономные инверторы напряжения (АИН) получили наиболее широкое распространение из всех типов автономных инверторов. Данный тип автономных инверторов считается самым универсальным на данный момент преобразователем. Автономный инвертор напряжения кроме преобразования постоянного напряжения в переменное, может работать в режиме выпрямителя, т.е. преобразовывать переменное напряжение в постоянное. На основе АИН выполняется большое количество электротехнических устройств (активные фильтры, рекуператоры электрической энергии, выпрямители, преобразователи частоты) [1, 2, 3, 4].

В электроприводе для автономных инверторов, наибольшее распространение получили три типа управления АИН [1, 2]:

1. широтно-импульсное регулирование (ШИР);
2. широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
3. пространственно-векторная модуляция (ПВМ).

В ШИР формирование выходного напряжения АИН происходит за счет

импульсов с определенной частотой, амплитудой и длительностью. Частота, амплитуда и длительность импульсов не измена во времени.

В ШИМ формирование выходного напряжения АИН выполняется по квазисинусоидальному закону. Напряжение на выходе формируется за счет импульсов, длительность которых переменна во времени.

В ПВМ модуляции формирование напряжения происходит за счет формирования пространственного вектора напряжения, который получается путем сложения ненулевых и нулевых базовых векторов.

Наибольшее распространение, в настоящий момент, получила конфигурация электропривода, состоящая из преобразователя частоты с векторным или скалярным управлением двигателем и ШИМ или ПВМ автономного инвертора напряжения, входящего в состав силового канала преобразователя частоты.

ПВМ осуществляется путем вращения опорного вектора вокруг диаграммы состояний, которая состоит из шести основных ненулевых векторов, образующих шестиугольник (вектора  $U_1-U_6$ ) (рис. 1).

У трехфазного двухуровневого инвертора возможно 8 состояний, при этом инвертор может сформироваться 8 базовых векторов ПВМ ( $U_0-U_7$ ). Как видно из рис. 5.23 все пространство разделено на шесть одинаковых секторов по  $60^\circ$ . Каждый сектор ограничен двумя активными векторами. Два вектора с нулевой амплитудой расположены в центре ( $U_0, U_7$ ) [1, 3, 4]. Базовые вектора на фазовой диаграмме задаются выражениями:

$$U_k = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot U_d \cdot e^{j \cdot (k-1) \cdot \frac{\pi}{3}}, & \text{если } k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \\ 0, & \text{если } k = 0, 7 \end{cases}$$

где:  $U_k$  – вектор на фазовой диаграмме;  
 $k$  – номер вектора на фазовой диаграмме.

Одним из параметров, используемых в сравнительных оценках различных систем электропривода, является коэффициент гармонических искажений (КГИ). КГИ возможно выразить следующим образом [26]:

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{I_1},$$

где:  $I_i$  – амплитуда  $i$ -ой гармоники, кроме несущей гармоники (1-ой);  
 $I_1$  – амплитуда несущей гармоники.

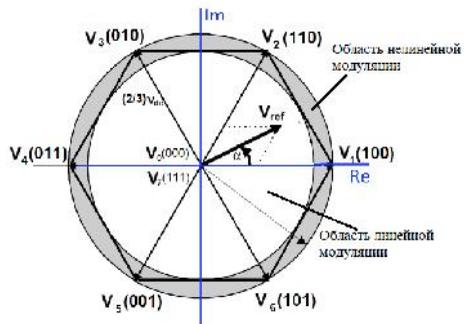


Рис. 1. Области линейной и нелинейной модуляции

Соотношение между опорным вектором напряжения  $U_{оп}$  и значением пика прямоугольной волны ( $2U_d/\pi$ ) называется индексом модуляции ( $\mu$ ). В линейной области индекс модуляции может быть выражен следующим образом:

$$\mu = \frac{U_{оп}}{U_{max-sixstep}}$$

Так как максимальное значение вектора опорного напряжения равно радиусу вписанной окружности в шестиугольник, тогда:

$$U_{оп} = \frac{2}{3} \cdot U_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right);$$

$$\mu = \frac{\frac{2}{3} \cdot U_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)}{\frac{2}{\pi} \cdot U_d} = 0,907.$$

Математическое моделирование проводилось с помощью программного комплекса *MatLab/Simulink*. На рис. 2 (а) и (б) – представлены зависимости *КГИ* тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки на двигателе, при использовании АИН с ШИМ и АИН С ПВМ, (в) и (д) – зависимости *КГИ* напряжения фазы А статора от индекса модуляции  $\mu$ , при использовании АИН с ШИМ и АИН С ПВМ.

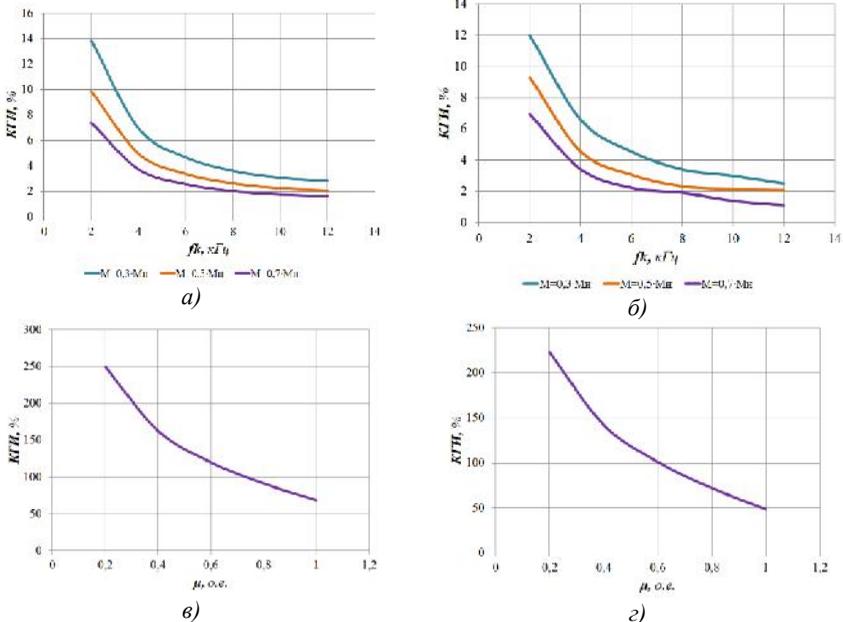


Рис. 2. (а) – зависимость *КГИ* тока от  $f_k$ , при использовании АИН с ШИМ (б) – зависимость *КГИ* тока от  $f_k$ , при использовании АИН с ПВМ, (в) – зависимость *КГИ* тока от  $\mu$ , при использовании АИН с ШИМ (г) – зависимость *КГИ* тока от  $\mu$ , при использовании АИН с ПВМ

Данные результаты получены для математической модели электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем типоразмером 4А112М4У3 номинальной мощностью 5,5 кВт.

Как видно из зависимостей  $K_{ГИ}$  тока фазы А статора от частоты коммутации ключей  $f_k$  при различных моментах нагрузки (рис. 2 (а) и (б)), при увеличении частоты коммутации транзисторных ключей происходит уменьшение гармонических искажений. Относительное значение  $K_{ГИ}$  у АИН с ПВМ в среднем на 9% меньше чем у АИН с ШИМ. Наибольшая разница  $K_{ГИ}$  составляет 1,85% и получается при моменте  $M=0,3 \cdot M_n$ .

Как видно из зависимости  $K_{ГИ}$  напряжения фаза А от индекса модуляции  $\mu$  (рис. 2 (в) и (г)) с уменьшением индекса модуляции происходит возрастание  $K_{ГИ}$ , для АИН с ШИМ в диапазоне от 68,31% (соответствует  $\mu=1$  о.е.) до 249,22% (соответствует  $\mu=0,2$  о.е.) (рис. (в)), а для АИН с ПВМ в диапазоне от 48,49% (соответствует  $\mu=1$  о.е.) до 222,69% (соответствует  $\mu=0,2$  о.е.) (рис. 2 (г)). Относительное значение  $K_{ГИ}$  у АИН с ПВМ в среднем на 20% меньше чем у АИН с ШИМ.

Были получены зависимости потерь мощности двигателя  $\Delta P_{\text{ов}}$  от момента нагрузки двигателя  $M$  при использовании в силовом канале АИН с ШИМ и АИН с ПВМ. Потери мощности в двигателе при использовании АИН с ПВМ в среднем всегда меньше чем при использовании АИН с ШИМ. Например, при  $w=w_n$  и моменте нагрузке на валу двигателя равным  $M=M_n$  потери мощности в двигателе при АИН с ШИМ составляют 840 кВт а при использовании АИН с ПВМ потери в двигателе составляют 580 кВт.

### Список литературы

1. Гельман, М. В. Преобразовательная техника: учеб. пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
2. Томашевский, Д. Н. Автономные инверторы: учеб. пособие / Д. Н. Томашевский. - Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2019 – 120 с.
3. Three-Level NPC Inverter Based SVM-VCIMD with Feed-forward Active PFC Rectifier for Enhanced AC Mains Power Quality [Текст] / Sandeep Madishetti, Bhim Singh, G. Bhuvaneswari // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 4, 2015.
4. Analysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation Inverter [Текст] / E. Hendawi, F. Khater and A. Shaltout // Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on APPLICATIONS of ELECTRICAL ENGINEERING, pp. 124-131.

*Материал поступил в редколлегию 20.10.20.*

Akhmadzhon Akilov

(Republic of Tajikistan, Khujand, Khujand Polytechnic institute of the TTU  
named after academician M.S. Osimi)

## **EXPERIENCE IN USING INFORMATION TECHNOLOGIES IN LABORATORY EXERCISES ON THE COURSE OF ELECTROMECHANICS**

*The article provides a detailed analysis of the main advantages and possibilities of using modern computer technologies for conducting laboratory studies by students of electrical engineering specialties, as well as computer modeling using the example of a DC motor.*

*Keywords: electrical machines, electric drive, Matlab / Simulink, computer technologies, modeling.*

Electric machines and electric drives are widely used in all sectors of the national economy and are one of the most energy-intensive consumers and energy converters. In this regard, knowledge of the theory in these areas is a necessary element and an important component of the professional training of an electrical specialist in the labor market. Today, the achievement of such a goal is possible only with the use of new forms of education using new computer technologies based on modern applied software packages, which are based on mathematical and simulation methods of modeling [3]. Software packages allow you to qualitatively change and significantly improve the study technology, create virtual laboratories and carry out the necessary research in it with obtaining quantitative results, including in the form of reports, graphs, diagrams, etc. [4, 6].

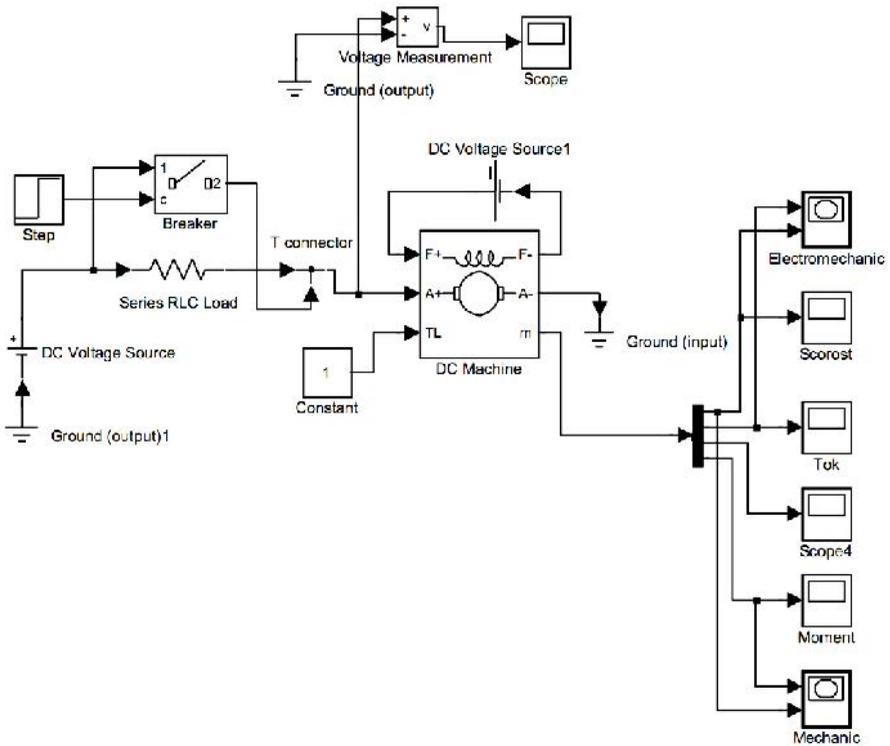
There are numerous computer simulation programs that can be distinguished by their method of operation, as programs for:

- mathematical modeling;
- modeling of block diagrams by transfer functions;
- simulation of electronic circuits;

Each of the listed programs may differ in their intended purpose, for example, programs for mathematical modeling are used at the stage of primary analysis, which allow one to determine some of the numerical characteristics of the system being developed, and programs for modeling structural diagrams make it possible to assess the system's response to various control and disturbing influences [5, 7]. Electronic circuit simulation programs are used to analyze and optimize the electronic part of an electric drive, taking into account the characteristics of the specific elements used.

For a modern student and specialist, computers have become a tool in the study of certain theoretical foundations, and future engineers should also not only master the basics of theory in a particular area, but also be able to solve problems using modern information technology [8]. At the Department of Power Supply and

Automation of the Khujand Polytechnic Institute of the TTU named after academician M.S. Osimi practices using the MATLAB / Simulink program for conducting laboratory studies in the course of electromechanics, electrical machines, as well as for completing coursework and diploma works for bachelors of specialties 1-530105 - "Automated electric drives" and 1-430103 - "Power supply". To demonstrate the effectiveness of using the MATLAB program in laboratory exercises in the course of electromechanics, the article provides an example of a study of a direct current motor (DCM) using this program [1, 2, 9-12]. Figures 1 and 2 show the model for the study of DCM and the window for setting the DCM parameters.



*Fig. 1. Computer model for the study of DC motor*

After creating a model and entering the parameters of the model elements, you can start using the model and exploring the object. The results of DCM simulation are shown in Figures 3-5.

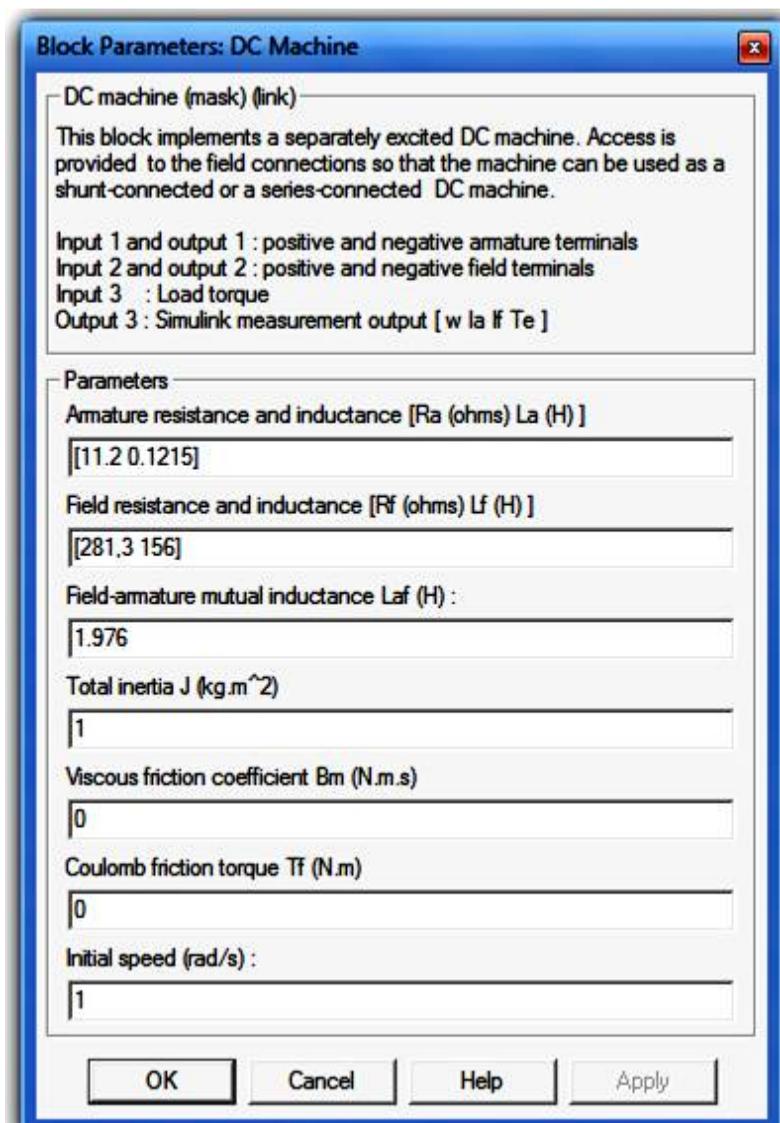


Fig. 2. The window for setting the parameters of DC motor

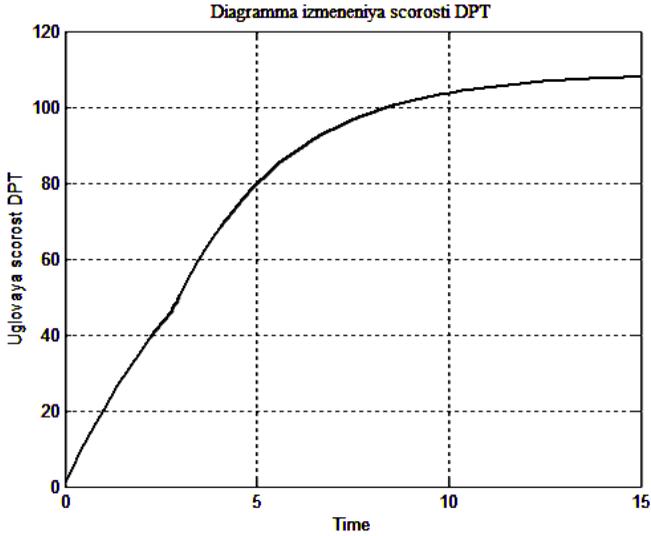


Fig. 3. The diagram of the change in the speed of the DCM at start

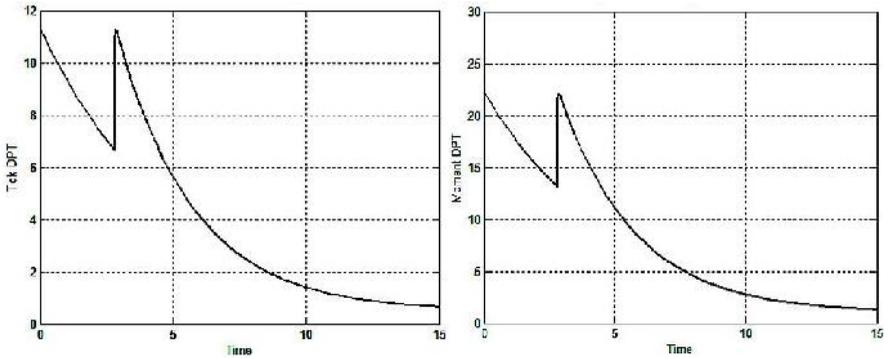


Fig. 4. Graphs of transient processes of current and torque DCM at start

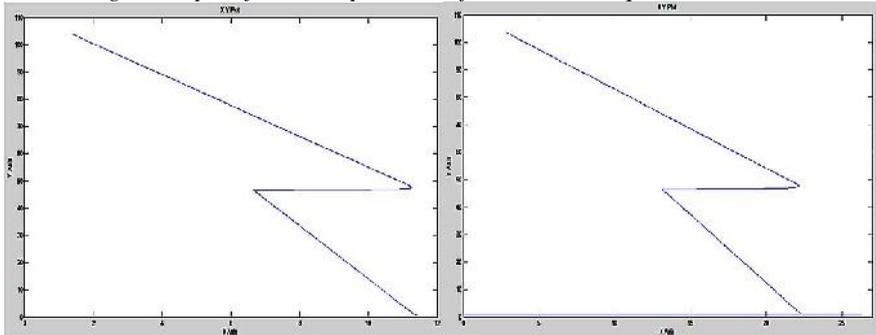


Fig. 5. Current-speed and torque-speed characteristics of DC motor at start-up

Thus, computer technologies greatly simplify the process of conducting laboratory studies, as well as facilitate the work of design engineers, increase the efficiency of research, and the accuracy of calculations at low cost of financial and material resources. It should be noted that the use of computer technology does not exempt students and specialists from general physical literacy and deep knowledge of the physical processes occurring in the elements of electrical systems.

## References

1. *Герман-Галкин, С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учеб. пособие/ С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
2. *Герман-Галкин С.Г.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК/ С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: КОРОНА принт, – 2003. – 256 с.
3. *Дадабаев, Ш.Т.* Математическая модель оросительной насосной станции первого подъёма / Ш.Т. Дадабаев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 3 (178). – С. 239-242.
4. *Дадабаев, Ш.Т.* Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки/ Ш.Т. Дадабаев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – №11. – С. 29-34.
5. *Дадабаев, Ш.Т.* Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема/ Ш.Т. Дадабаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2017. – № 9-1. – С. 532-536.
6. *Дадабаев, Ш.Т.* Постановка задач по оптимизации работы текстильного электрооборудования при жарком климате/ Ш.Т. Дадабаев, А.Р. Разоков // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 11. – С. 58.
7. *Дадабаев, Ш.Т.* Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов / Ш.Т. Дадабаев, Х.А. Рахматов, Б.А. Абдумаликов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 256-263.
8. *Ковач, К.П.* Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 735 с.
9. *Ковчин, С.А.* Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
10. *Поздеев, А.Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А. Д. Поздеев – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
11. *Терёхин, В.Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
12. *Черных, И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

*Материал поступил в редколлегию 06.10.20.*

**СЕКЦИЯ «МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ,  
ПОВЕДЕНЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»**

**MULTIPHYSICAL, MATHEMATICAL, BEHAVIORAL MODELING**

DOI: 10.51932/9785907271739\_217

УДК 621.3

Е.С. Гаврилов, А.А. Пугачев

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

**MATHEMATICAL MODELING OF AN INDUCTION MOTOR IN AN ARBITRARY  
REFERENCING FRAME**

*Приведены уравнения математической модели асинхронного двигателя, показаны реализация модели в программных комплексах MATLAB Simulink и MATLAB SimPowerSystem. Приведены результаты моделирования, дана их оценка.*

*The equations of the mathematical model of an induction motor are given, the implementation of the model in the software complexes MATLAB Simulink and MATLAB SimPowerSystem is shown. The results of simulation are given and their assessment is highlighted.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, моделирование, дифференциальные уравнения, система координат.*

*Keywords: induction motor, simulation, differential equations, referencing frame.*

Уравнения математической модели асинхронного двигателя приведены в ряде источников [1, 2], однако их запись имеет различия из-за несогласованности в выборе направлений и взаимного расположения координатных осей. Это приводит к получению несоответствующих друг другу результатов моделирования с точки зрения направления вращения и знака электромагнитного момента (абсолютные значения, как правило, совпадают). Аналогичная проблема возникает при сравнении результатов моделирования, полученных с использованием MATLAB Simulink и MATLAB SimPowerSystem.

В данной работе решена задача приведения математической модели асинхронного двигателя к такому виду, который обеспечивает полное совпадение результатов ее применения с моделью асинхронного двигателя, имеющейся в библиотеке MATLAB SimPowerSystem. Трехфазная модель двигателя построена таким образом, что ось  $B$  отстает от оси  $A$  на  $2\pi/3$ , ось  $C$

опережает ось  $a$  на  $2\pi/3$ . Двухфазная модель в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$  построена так, что ось  $\alpha$  сонаправлена с осью  $A$ , а ось  $\beta$  отстает от оси  $\alpha$  и ортогональна ей. Перевод переменных из трехфазной системы  $ABC$  в двухфазную  $\alpha\beta$  систему координат покажем на примере напряжений:

$$U_\alpha = \frac{3}{2} \cdot k_c \cdot U_A; \quad U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot k_c (U_C - U_B),$$

где  $k_c$  – согласующий коэффициент, обеспечивающий выполнение условия инвариантности мощности,  $k_c = 2/3$  [1].

Для реализации проверки работоспособности систем векторного управления модель асинхронного двигателя удобно записывать во вращающейся системе координат. Для примера запишем перевод напряжений из неподвижной системы  $\alpha\beta$  во вращающуюся с произвольной частотой  $uv$  (ось  $v$  отстает от оси  $u$  и ортогональна ей):

$$U_u = U_\alpha \cdot \sin\varphi_k + U_\beta \cdot \cos\varphi_k; \quad U_v = U_\alpha \cdot \cos\varphi_k - U_\beta \cdot \sin\varphi_k,$$

где  $\varphi_k$  – частота вращения координатных осей  $uv$ .

Аналогично запишем преобразования из вращающейся системы координат в неподвижную (на примере токов):

$$i_\alpha = i_v \cdot \cos\varphi - i_u \cdot \sin\varphi; \quad i_\beta = i_v \cdot \sin\varphi + i_u \cdot \cos\varphi.$$

Перевод величин из двухфазной неподвижной системы координат в трехфазную систему (так же на примере токов):

$$I_A = I_\alpha; \quad I_B = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta; \quad I_C = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta.$$

Система уравнений, представляющая собой математическую модель асинхронного двигателя как обобщенной электрической машины, синтезирована на основании эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 1, а). На рис. 1 все обозначения соответствуют общепринятым.

Система уравнений записана в форме Коши аналогично записи, приведенной в [1, 2].

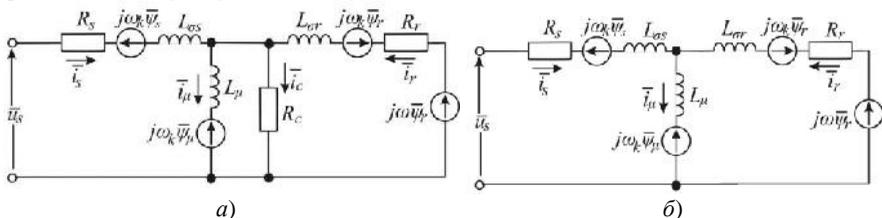


Рис. 1. Эквивалентная T-образная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 2 изображены параметры математической модели и готовой модели асинхронного двигателя MATLAB SimPowerSystem.

Необходимо отметить разницу в параметрах, описывающих индуктивности обмоток статора и ротора. Это обусловлено тем, что готовая модель библиотеки SimPowerSystem требует записи индуктивности рассеяния

обмоток, а математическая модель требует записи полного значения индуктивности обмоток.

На рис. 3 изображены результаты моделирования прямого пуска с последующим нагружением номинальным моментом двигателей для обеих моделей.

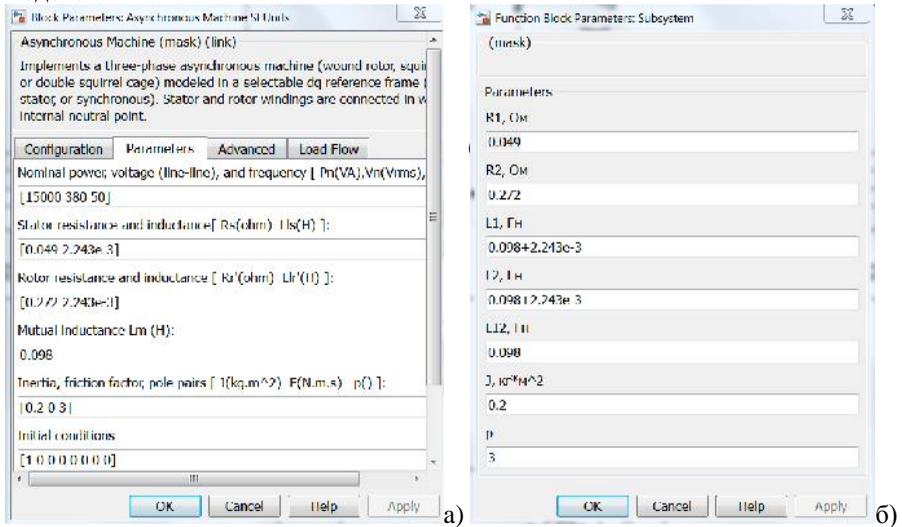


Рис. 2. Параметры а) математической модели; б) готовой модели асинхронного двигателя в MATLAB SimPowerSystem

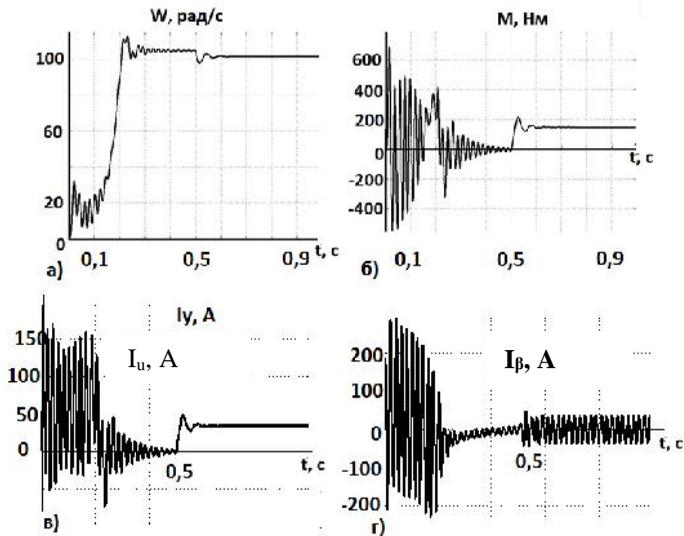


Рис. 3. Результаты моделирования прямого пуска с последующим нагружением номинальным моментом двигателей для обеих моделей.

Из рис. 3 а) и б) очевидно, что результаты применения обеих моделей полностью совпадают, так же формы токов по осям  $\beta$ - статической системы координат на рис. г) и  $i$ -системы координат вращающейся с синхронной скоростью  $2\pi f_1$  на рис. в) полностью соответствуют требуемым, следовательно, реализованная в Simulink математическая модель адекватна.

Основным недостатком реализованной модели является идеализация асинхронного двигателя, что существенно искажает энергетические и динамические показатели качества электропривода. Однако использование математической модели позволяет исправить этот недостаток путем изменения ее уравнений.

Для уточнения энергетических характеристик необходимо учесть потери в стали (потери в стали статора можно учесть введением сопротивления  $R_c$  параллельно ветви намагничивания, как показано на рис. 1, б) [3, 4]. Для уточнения динамических показателей нужно использовать ряд нелинейных зависимостей.

Так, явление насыщения по главному магнитному пути учитывается следующей характеристикой [3]:

$$L_{\mu^*} = -0,002I_{\mu^*}^6 + 0,037I_{\mu^*}^5 - 0,261I_{\mu^*}^4 + 0,87I_{\mu^*}^3 - 1,278I_{\mu^*}^2 + 0,214I_{\mu^*} + 1,413,$$

индекс «\*» указывает на относительное значение параметра.

Нелинейная зависимость потерь в стали от частоты тока статора  $f_s$  учитывается зависимостью [3]:

$$R_c = \begin{cases} 88,3135 + 5,646f_s + 0,0534f_s^2, & f_s \leq 50 \text{ Гц}, \\ 1261,3 - 37868/f_s, & f_s > 50 \text{ Гц}. \end{cases}$$

Для получения корректной картины электромеханических и энергетических процессов сопротивление обмотки ротора необходимо определять с учетом эффекта вытеснения тока, так как он оказывает влияние при работе на низких частотах.

Учет указанных выше явлений позволит использовать математическую модель двигателя при синтезе энергоэффективных электроприводов.

### Список литературы

1. *Ключев, В.И.* Теория электропривода / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. *Копылов, И.П.* Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов – М.: Высш.шк., 2001 – 327 с.
3. *Космодамианский, А.С.* Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. - 2012. - № 12. - С. 26 – 31.
4. *Scalar control systems for a traction induction motor / A.S. Kosmodamianskii, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // Russian Electrical Engineering, 2016, Vol. 87, No. 9, pp. 518 – 524.*

*Материал поступил в редколлегию 16.10.20.*

Д.Г. Гадашев, А.Ю. Дракин, А.Н. Школин  
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **РАЗРАБОТКА ДРАЙВЕРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО LED СВЕТИЛЬНИКА**

### **DEVELOPMENT OF AN ENERGY EFFICIENT LED LAMP DRIVER**

*Выполнен обзор наиболее распространенного в практике схемотехнического решения преобразователей светодиодных источников света. Обоснован подход к созданию высокоэффективного светодиодного источника света со сниженным коэффициентом пульсаций светового потока. Выполнено моделирование силовой и управляющей части преобразователя с предложенной альтернативной схемотехникой.*

*The review of the most common circuit design of led light source converters in practice is performed. An approach to creating a highly efficient led light source with a reduced coefficient of light flux pulsation is justified. Modeling of the power and control parts of the Converter with the proposed alternative circuitry is performed.*

*Ключевые слова: светодиод, драйвер светодиодного модуля, коммутация, энергоэффективность, преобразователь электрической энергии, пульсации светового потока.*

*Keywords: led, led module driver, switching, energy efficiency, electric energy Converter, light flux ripple.*

Необходимость поиска методов более энергоэффективного освещения привела к широкой разработке и внедрению электронных преобразователей светодиодных модулей с АС-драйвером. Использование таких решений целесообразно для множества применений, где основной источник питания - однофазная сеть переменного тока 50/60Гц. Использование светодиодного осветительного оборудования объясняется рядом преимуществ: относительно малым энергопотреблением, долгим сроком службы, компактностью, высокой светоотдачей, возможностью выбора световой температуры и др.

Помимо перечисленных преимуществ, в светодиодных модулях присутствуют недостатки. Одним из существенных является необходимость в обеспечении стабильности параметров питающего напряжения.[1] Этот недостаток преодолевается использованием преобразователя, который выполняет функцию стабилизации питающего напряжения в светодиодных светильниках, а также стабилизацию тока независимо от выходного напряжения. На рис. 1 представлена типовое схемотехническое решение на базе микросхемы SM2082D. При помощи резистора R2 задается величина тока, протекающего через светодиоды. Конденсатор C1 сглаживает пульсации питающего напряжения, что снижает коэффициент пульсаций светодиодов.

© Гадашев Д.Г., Дракин А.Ю., Школин А.Н., 2020.

САПР и моделирование в современной электронике. С. 221 – 224.

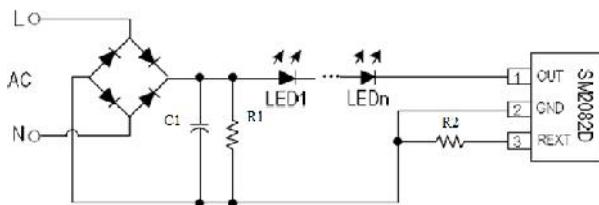


Рис. 1. Типовое схематехническое решение светодиодного модуля на базе микросхемы SM2082D

Как и любое электронное устройство, драйвер имеет определённый срок службы. Использование в качестве накопителей энергии в электрической цепи драйвера электролитических конденсаторов увеличивает массогабаритные показатели и существенно снижает ресурс светодиодного модуля в целом. Это обусловлено частичной или полной потерей ёмкости электролитических конденсаторов в процессе эксплуатации при жестких условиях (высокая температура), что ведёт впоследствии к некорректной работе драйвера, увеличению коэффициента пульсаций светового потока, деградации полупроводниковых кристаллов и выходу из строя светодиодного модуля. Это явление хорошо наблюдается при объединении драйвера, теплоотвода и светодиода в одном корпусе, так как данные реактивные элементы под влиянием повышенной температуры теряют ёмкость гораздо быстрее. [2]

Целью настоящей работы является попытка разрешения данной проблемы путем оценки возможности применения принципа коммутации светодиодов в соответствии с мгновенным напряжением питающей однофазной цепи переменного тока, а также в использовании альтернативной схемотехники.

Для применения данного принципа выходное напряжение с двухполупериодного выпрямителя условно делится на 3 сектора (рис.2), где 1 сектор – это участок с напряжением от нуля Вольт до 103,7 Вольт, 2 сектор – участок с напряжением от 103,7 Вольт до 207,3 Вольт, а 3 сектор – участок с напряжением от 207,3 до 311 Вольт.

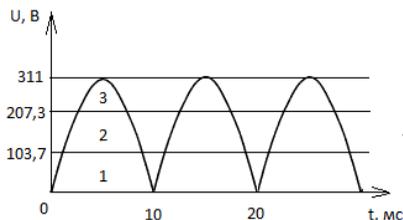


Рис. 2. Развитие по секторам коммутаций светодиодов

На каждом из трёх секторов производится различная коммутация светодиодов. В первом секторе все светодиоды коммутируются параллельно, во втором последовательно-параллельно, а в третьем все последовательно. Это

применяется для обеспечения равномерного светового потока при любом мгновенном напряжении в источнике питания. Указанный алгоритм реализуется при помощи двухполупериодного выпрямителя, девяти управляемых ключей и четырёх светодиодов (рис.3).

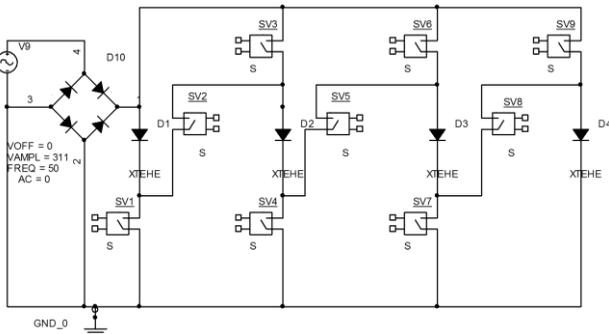


Рис.3. Силовая часть модели

В процессе разработки модели (рис.4) на данном этапе приближения для наглядности было решено осуществлять коммутацию 4 резисторов.

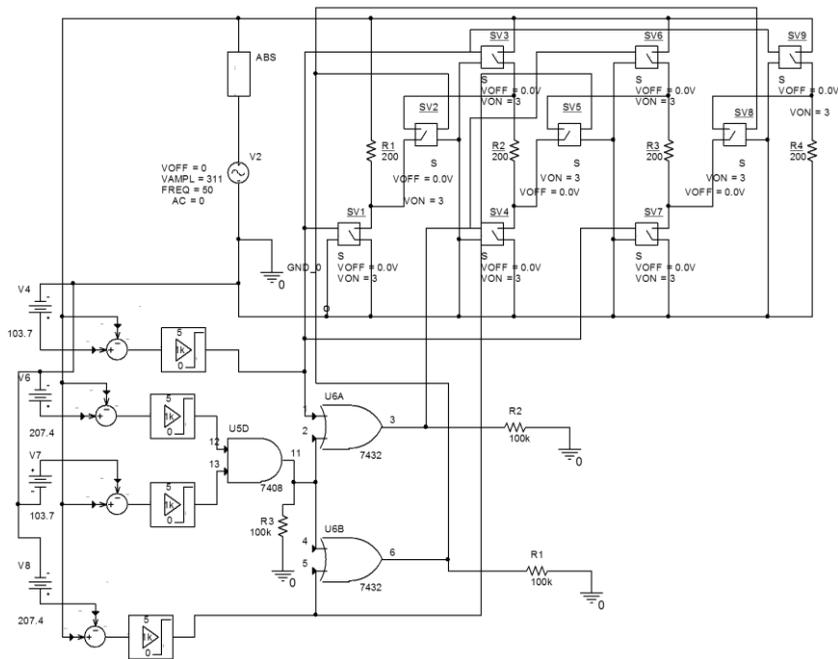


Рис.4 Модель коммутации светодиодов в соответствии с мгновенным напряжением питающей однофазной цепи переменного тока

Была составлена таблица коммутаций ключей в конкретных секторах,

составлены логические уравнения на основе которых реализована система управления ключами. В таблице 1 приведен порядок коммутации ключей в зависимости от сектора мгновенного напряжения сети.

Таблица 1. Коммутации управляемых ключей в трёх секторах.

Сектор мгновенного напряжения сети	Коммутируемые (замыкающиеся) ключи
1	1, 3, 4, 6, 7, 9
2	2, 4, 6, 8
3	2, 5, 8

В процессе моделирования были получены временные зависимости напряжения (рис.5) и тока (рис.6) в светодиодах.

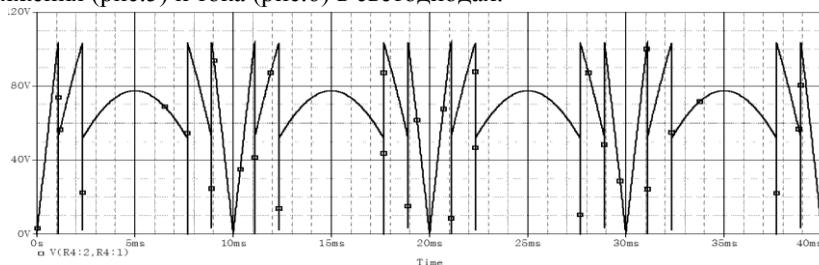


Рис.4 Зависимость напряжения на коммутируемом элементе от времени

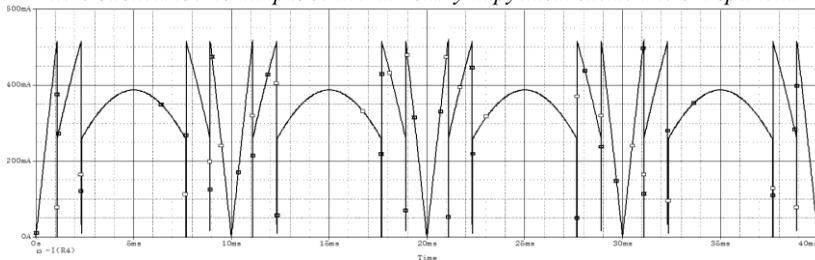


Рис.4 Временная зависимость силы тока в коммутируемом элементе

По временным зависимостям можно сделать выводы об адекватности модели в целом. В дальнейшем предполагается усовершенствование представленной модели.

### Выводы

После выполнения моделирования можно утверждать, что с небольшими усовершенствованиями приведенное схемотехническое решение может использоваться в высокоэффективных светодиодных источниках света.

### Список литературы

1. Бандура, Г. Высокоэффективный источник питания мощностью 150 Вт с корректором коэффициента мощности для уличного светодиодного осветителя/ Г. Бандура // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – №2.
2. Седых, С.В. Методы снижения пульсаций светового потока в светодиодных источниках света / С.В. Седых, Д.Г. Гадашев, А.Ю. Дракин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С. 290-293.

Материал поступил в редколлегию 19.10.20.

Р.В. Ибрагимов, Л.Ю. Фадеева

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

### INHOMOGENEOUS SURFACES SIMULATION FOR RADIO APPLICATIONS

*Проведено моделирование фрактальных поверхностей. Был произведен расчет фрактальной размерности и площади фрактальных поверхностей. Проанализирован характер изменения формы и площади поверхности от значения фрактальной размерности.*

*In this paper, the fractal surfaces modeling was carried out. Fractal dimension and surfaces area were calculated. The surface shape and area dependence of the fractal dimension value was analyzed.*

*Ключевые слова: фрактальная размерность, фрактальные поверхности, моделирование поверхностей.*

*Keywords: fractal dimension, fractal surfaces, surface simulation.*

Фрактальная поверхность – поверхность, сгенерированная с использованием определенного алгоритма, который имитирует внешний вид природной местности. Фрактальную поверхность можно получить путем сложения простейших фрактальных поверхностей, которые, в свою очередь, строятся на основе однозначных фрактальных кривых путем операций трансляции, масштабирования и поворота. Параметр  $D$ , характеризующий фрактальную поверхность, дает исчерпывающую информацию о поверхности, в частности о её форме и нерегулярности.

В данной работе была смоделирована фрактальная поверхность с использованием графической среды NI LabVIEW. На рис. 1 представлена простейшая фрактальная поверхность, построенная по функции Вейерштрасса путем трансляции ее значений вдоль направления  $Y$ . Функция Вейерштрасса задается на всей вещественной прямой единым аналитическим выражением:

$$w(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cos(a^n \pi x).$$

На основе данной простейшей поверхности была смоделирована результирующая поверхность, имитирующая рельеф местности, 3D-модель которой изображена на рис. 2.

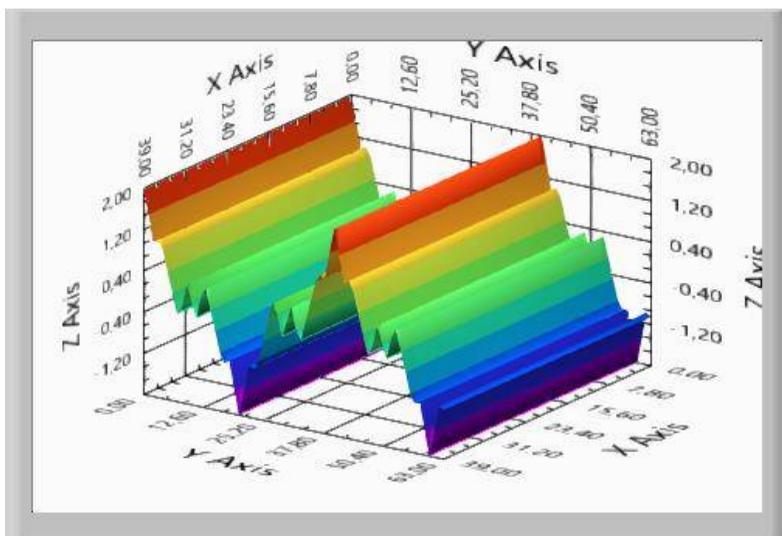


Рис. 1. Простейшая фрактальная поверхность по функции Вейерштрасса

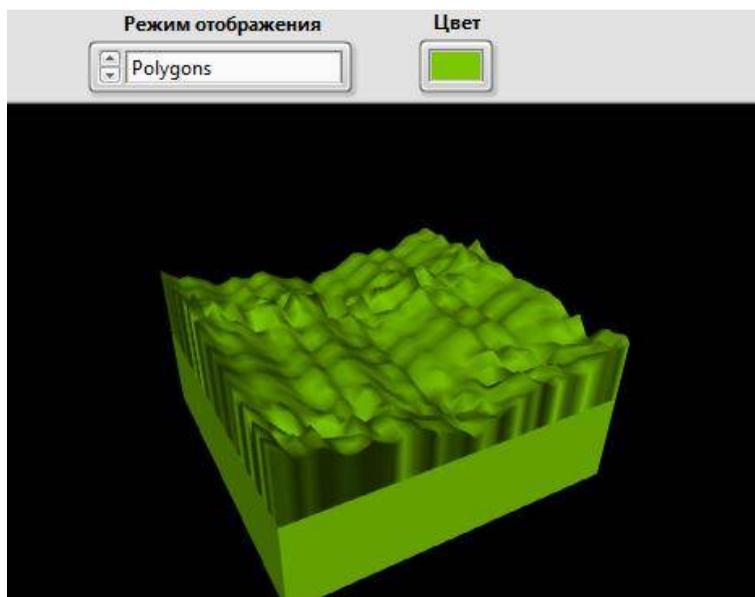


Рис. 2. 3D-модель фрактальной поверхности

В ходе работы для определения фрактальной размерности  $D$  исследуемой поверхности был использован метод Расса. Он заключается в построении

зависимости размаха  $R$  от величины  $r$ . Размахом  $R$  называется максимальный перепад высоты  $z$  поверхности в пределах расстояния  $r$  в плоскости  $XY$ .

$$R(r) = \max(x, y, r) - \min(x, y, r).$$

Линейная аппроксимация зависимости  $\lg R(\lg r)$  позволяет определить тангенс угла наклона  $\beta$ , равный коэффициенту Херста  $H = \beta$ , и фрактальную размерность  $D = 3 - H$ .

Определение фрактальной размерности  $D$  даёт возможность рассчитать площадь данной поверхности:

$$S = S_0 \lim_{\delta \rightarrow 0} \alpha^{2-D},$$

где величина  $\delta$  - линейный масштаб, соответствующий высотам неоднородностей,  $\alpha$  - масштабный безразмерный множитель,  $\alpha < 1$ ,  $S_0$  - проекция поверхности на плоскость.

Определенному значению площади  $S$  соответствует значение коэффициента измерительного масштаба  $a$ . В работе использовано значение  $\alpha = 1/256$ , характеризующее размер накладываемой сетки, практически соответствует наименьшему значению, которое может быть использовано для программной обработки изображений.

Варьируя параметры  $a$  и  $b$  функции Вейерштрасса, были получены различные значения фрактальной размерности  $D$  и площади поверхности  $S$ .

Из полученных значений видно, что с увеличением фрактальной размерности поверхности растет и значение её площади. Таким образом, чем более «изрезана» и нерегулярна поверхность, тем больше будут значения её фрактальной размерности и площади.

### Список литературы

1. *Евдокимов, Ю.К.* Высокоточные измерения положения механической руки робота в субмикронных и наномикронных перемещениях с использованием емкостного датчика/ Ю.К. Евдокимов, Р.К. Сагдиев, Л.Ю. Фадеева // Использование цифровых средств обучения и робототехники в общем и профессиональном образовании: опыт, проблемы, перспективы: сб. науч. статей III Междунар. науч. – практ. конф., Барнаул, 2-3 ноября 2017 г. – Барнаул: Изд – во Алт. Ун-та, 2017. – С. 52-54.

2. *Евдокимов, Ю.К.* Характеристика преобразования емкостного датчика субмикронных и наноразмерных перемещений с учетом шероховатости поверхности электродов/ Ю.К. Евдокимов, Р.К. Сагдиев, Л.Ю. Фадеева // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: I Междунар. науч. – техн. конф. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2017. – С. 102 – 104.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

М.В. Илюшин, К.В. Вершинин, Г.В. Жданов  
(г. Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОСПРИЯТИЯ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА**

### **RESEARCH OF THE MODEL OF PLANNING OF THE QUALITY OF PERCEPTION OF A SPEECH SIGNAL**

*При планировании сети связи основной задачей является сбор необходимой информации о различных компонентах сети и их влиянии на ухудшение качества передачи речи. Представлены результаты аналитического моделирования процесса передачи речевого сигнала в реальной сети связи с учетом ее возможной модернизации.*

*When planning a communication network, the main task is to collect the necessary information about the various components of the network and their impact on the deterioration of the quality of speech transmission. The results of analytical modeling of the process speech transmission in a real communication network, taking into account its possible modernization, are presented.*

*Ключевые слова: планирование сети, качество восприятия речи, E-модель, аналитическое моделирование.*

*Keywords: network planning, quality of experience, E-model, analytical modeling.*

Планирование сети предполагает решение некоторых задач, определяющих основные функциональные возможности и свойства сети связи. Одной из важнейших задач является прогнозирование основных показателей. До недавнего времени речь шла о количестве поддерживаемых услуг, пропускной способности и показателях качества обслуживания. Учитывая нацеленность услуги на конечного пользователя, в последнее время учеными и специалистами телекоммуникационных компаний большое внимание уделяется задаче планирования качества восприятия (QoE – quality of experience) передаваемой информации.

Применительно к задаче планирования сквозного качества передачи речевого сигнала (РС), а также при оценивании влияния на него выбора различных технологий хорошо зарекомендовал себя метод аналитического расчета коэффициента качества передачи (R-фактора) в соответствии с E-моделью [1]. Указанный метод планирования QoE речи позволяет не только получить значение средней экспертной оценки MOS (mean opinion scores) для выбранного варианта сеанса связи в режиме разговора, но и определить параметры функционирования сети (NP – network performance), обеспечивающие значение показателя качества восприятия не ниже требуемого. Что в свою очередь открывает возможность составления более

«прозрачного» соглашения между оператором и абонентом услуги об уровне обслуживания SLA (Service Level Agreement).

Процесс планирования сети связи предполагает изучение основных характеристик эксплуатируемой сети, а также анализ требований, которым должна соответствовать перспективная сеть связи. Далее для фрагментов существующей и перспективной сетей связи составляются упрощенная и подробная схемы различных сценариев соединений. Для каждого сценария производится аналитический расчет показателя MOS. Полученные таким образом значения показателей MOS фрагментов сетей (существующего и перспективного) позволяют принять решение о выборе по критерию пригодности того или иного варианта построения сети связи.

Для наглядности на рисунках 1 и 2 представлены упрощенные схемы некоторых сценариев для фрагментов существующей и перспективной сетей связи соответственно.

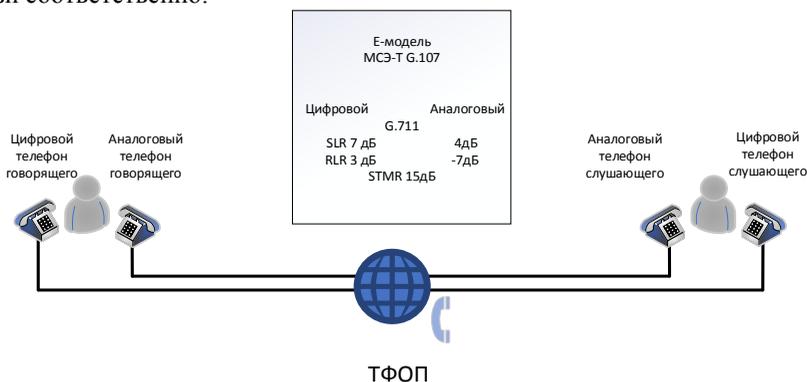


Рис. 1. Упрощенная схема сценариев фрагмента действующей сети связи

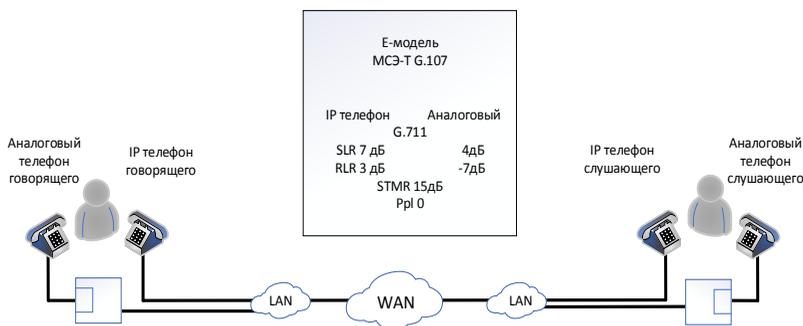


Рис. 2. Упрощенная схема сценариев фрагмента перспективной сети связи

Из рис. 1 видно, что фрагмент действующей сети связи предполагает в качестве транспортной основы использование сети с коммутацией каналов, а

в качестве терминального оборудования – аналоговые (АТА) и цифровые (ЦТА) телефонные аппараты. Транспортная сеть перспективного варианта (рис. 2) строится на основе метода коммутации пакетов, оконечные устройства – АТА и системные IP-телефоны (IP-ТА).

Значения некоторых параметров для расчета оценок MOS были взяты из технической документации применяемого или перспективного оборудования, значения остальных параметров были взяты по умолчанию из [1, 2].

Для удобства вычислений в среде Matlab была разработана программа для ЭВМ (рис. 3).

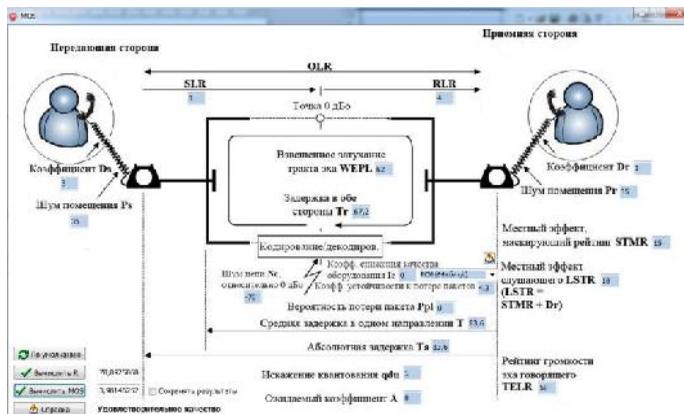


Рис.3. Скриншот интерфейса программы для расчета оценок MOS

Для представленных сценариев (рис. 1 и 2) был произведен расчет оценок MOS в условиях возможных изменений параметров качества функционирования сети. Полученные оценки сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Значения рассчитанных параметров

Вид сценария		Значения параметров			
		Задержка сети (мс)	Задержка в одном направлении (мс)	Задержка в двух направлениях (мс)	MOS
Фрагмент действующей сети связи					
АТА	АТА	не учит.	4,35	8,7	4,35
АТА	ЦТА	не учит.	3,975	7,95	3,875
ЦТА	АТА	не учит.	3,975	7,95	4,224
ЦТА	ЦТА	не учит.	3,6	7,2	3,684
Фрагмент перспективной сети связи					
АТА	АТА	10...350	14,35–354,35	28,7–708,7	4,14–3,5
АТА	IP-ТА	10...83	23,975–69,975	47,95–339,95	3,83–3,5
IP-ТА	АТА	10...170	13,975–173,975	27,95–347,95	4,19–3,5
IP-ТА	IP-ТА	10...56	83,6–115,6	167,2–231,2	3,64–3,54

Данные расчетов (табл. 1) позволяют сделать вывод, что переход на технологию IP приведет к незначительному ухудшению качества восприятия речи, оставляя значение оценок MOS для указанных диапазонов изменения параметров NR не ниже установленной нормы для телефонной сети общего пользования (ТфОП) в 3,5 балла.

С целью обеспечения высокого QoE речи оператору связи необходимо применять эффективные алгоритмы кодирования РС. Так как каждый речевой кодек по-разному ухудшает QoE речи при изменении параметров NR, дополнительно были проведены исследования по выявлению зависимостей между некоторыми показателями NR и оценками QoE.

Для примера на рис. 4 показаны графики поверхности изменения оценок MOS при изменении значений вероятности потери пакетов (Ppl), средней задержки в одном направлении (T) и алгоритма кодирования РС для сценария «АТА-АТА».

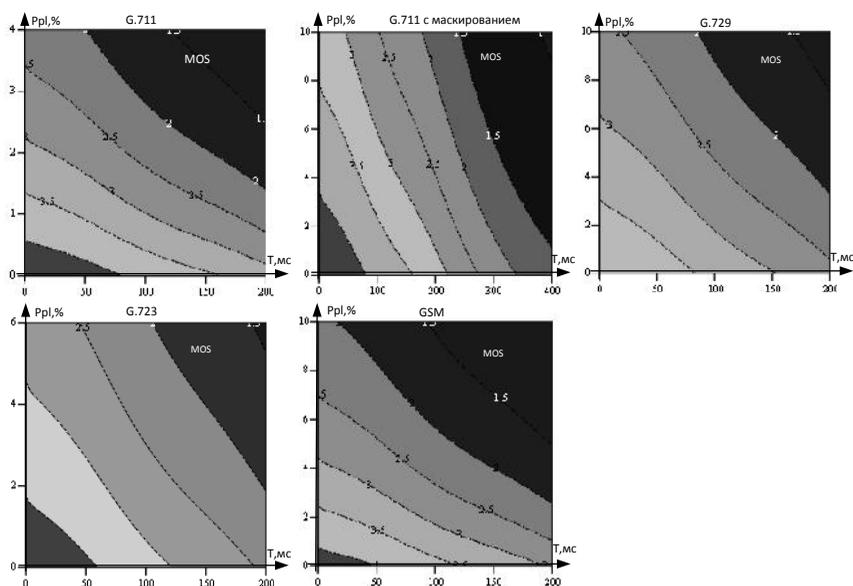


Рис. 4. Графики поверхности изменения оценок MOS при изменении значений вероятности потери пакетов, средней задержки в одном направлении и алгоритма кодирования речевого сигнала для сценария «АТА-АТА»

#### Список литературы

1. *Рекомендация МСЭ-Т G.107*. Е-модель – вычислительная модель, используемая при планировании передачи. – 2015–06. – Женева : ITU-T, 2017. – 30 с.
2. *ITU-T Recommendation G.113*. Transmission impairments due to speech processing. – 2007–11. – Geneva : ITU-T, 2008. – 26 п.

Материал поступил в редколлегию 06.09.20.

К.А. Индюхов, С.Ю. Андреев

(г. Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

**ВЕРОЯТНОСТЬ СИМВОЛЬНОЙ ОШИБКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ БЕЗ ПАМЯТИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

PROBABILITY OF SYMBOL ERROR OF THE OPTIMAL RECEIVER FOR MODULATION WITHOUT MEMORY UNDER THE CONDITIONS OF IMPACT OF NON-STATIONARY INTERFERENCE

*Приведены математические выражения, позволяющие определять вероятность символической ошибки в условиях воздействия нестационарных помех.*

*Mathematical expressions are given to determine the probability of a symbolic error under the influence of non-stationary interference.*

*Ключевые слова: вероятность символической ошибки, позиционность модуляции, ядерные методы оценки.*

*Keywords: probability of a symbolic error, the positional feature modulation, kernel estimation methods.*

Вероятность символической ошибки является значимой характеристикой качества оптимального приемника для модуляции без памяти. Очевидно, что оптимизировать её значение не имеет смысла. Однако, можно выполняя требования по максимально допустимой вероятности ошибки определять минимальное допустимое значение расстояния между позициями модуляции или менять позиционность модуляции сохраняя неизменным расстояние. Отметим, что позиционность характеризует скорость передачи данных, а расстояние в первую очередь взаимосвязано с энергетикой сигнала.

Обычно при расчете вероятности ошибочного приема символа считают что шум, присутствующий в канале связи, распределён нормально с нулевым математическим ожиданием и некоторой дисперсией  $\sigma_{ш}^2$ . В таком случае предлагается использовать следующую формулу из [1]:

$$P_M = \frac{M-1}{M} \frac{2}{\sigma_{ш} \sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\tau}{2}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{ш}^2}} dx, \quad (1)$$

где  $P_M$  - средняя вероятность ошибочного приема символа;

$M$  - позиционность модуляции;

$\tau$  - расстояние между позициями модуляции;

$\sigma_{ш}^2$  - дисперсия шума в канале связи.

Для  $M$ -позиционной амплитудной модуляции расстояние между соседними сигнальными точками описывается следующей формулой:

$$\tau = \sqrt{2d^2 e_g}, \quad (2)$$

где  $d$  – половина расстояния между амплитудами соседних позиций модуляции;  $e_g$  – энергия базового сигнального импульса.

Далее, преобразуем формулу (2) следующим образом:

$$d^2 e_g = \frac{6P_{cp}T}{M^2-1} = \frac{6P_{cp}T_b k}{M^2-1} = \frac{6e_b \log_2 M}{M^2-1}, \quad (3)$$

где  $T$  – символичный интервал;

$P_{cp}$  – средняя мощность сигнала;

$T_b$  – битовый интервал;

$k$  – длина блоков двоичных символов;

$e_b$  – средняя энергия на бит.

Обычно принято показывать зависимость вероятности ошибки из формулы (1) от отношения средней энергии на бит из формулы (3) к удвоенной дисперсии шума  $\sigma_{ш}^2$  [1].

В ходе анализа формулы (1) несложно заметить, что неуправляемым фактором, влияющим на вероятность ошибочного приема, является дисперсия шума в канале связи. Тем не менее, если в канале присутствует нестационарная помеха, то попытка воспользоваться формулой (1) может привести к тому, что значение  $P_M$  не будет адекватно отражать существующую в канале шумовую обстановку. Это является следствием того, что нестационарная помеха не может быть представлена нормальным законом распределения. Неправильно специфицированная параметрическая модель никогда не сойдется к истинной модели [2].

В связи с этим, для расчета средней вероятности ошибочного приема символа, автором предлагается использовать следующую формулу:

$$P_M = \frac{M-1}{M} \left[ 1 - \left( \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{Nh} \sum_{l=1}^N K_k \left( \frac{x_l - x}{h} \right) dx \right) \right], \quad (4)$$

где  $|\tau_2 - \tau_1| = \sqrt{2d^2 e_g}$ ,  $N$  – объем анализируемой выборки,  $h$  – оптимальная ширина окна ядерной оценки.

В ней расчет осуществляется с помощью ядерных функций, которые, в отличие от параметрического нормального закона, позволяют данным самим определять форму функции плотности вероятности. Таким образом, фиксируя среднюю вероятность ошибочного приема символа, с помощью формулы (4) можно определять либо минимальное требуемое расстояние между позициями модуляции, либо позиционность модуляции.

Таким образом, выдвигается предположение о том, что такой подход, в условиях воздействия нестационарной помехи, позволит увеличить технический эффект цифровых линий связи.

### Список литературы

1. *Прокис Джон*. Цифровая связь: пер. с англ./ Прокис Джон.; под ред. Д. Д. Кловского. - М.: Радио и связь. 2000. - 800 с.
2. *Джеффри Расин*. Непараметрическая эконометрика: вводный курс/ Джеффри Расин // Квантиль. – 2008. – №4. – С. 7 - 56.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

И.В. Штенников, Т.А. Инкин  
(г. Ижевск, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)

## **ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ**

**PROGRAM FOR MODELING THE CONDENSATION RATE OF CHROME COATING  
IN VACUUM DEPENDING ON THE MODES OF ITS FORMATION**

*На основе математической модели процесса массопереноса при вакуумном нанесении покрытий на трубчатые изделия разработана программа моделирования скорости конденсации хромовых покрытий в зависимости от режимов и условий их формирования.*

*Based on a mathematical model of the mass transfer process during vacuum coating of tubular products, a program has been developed for modeling the rate of condensation of chrome coatings depending on the modes and conditions of their formation.*

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, вакуумные покрытия, скорость конденсации, режимы нанесения, термическое испарение.*

*Keywords: computer modelling, vacuum coatings, rate of condensation, application process, thermal transpiration.*

При разработке современных технических систем широко используются различные программные продукты компьютерного моделирования. Зарубежные, это Simulink, Skilab, MATRIX, VisSim, LabVIEW и др., отечественные: МИК, ПА 9, CLASSIC, МВТУ, SimInTech и др. [1]. Для расширения их возможностей они постоянно совершенствуются, обновляются, пополняются новыми базами данных, приложениями, библиотеками. Наряду с этим разрабатываются новые алгоритмы, программы моделирования физических процессов, технических систем, для которых математические модели еще в полной мере не составлены. К числу таких процессов можно отнести нанесение металлических конденсационных покрытий в вакууме на внутреннюю поверхность трубчатых изделий [2].

При разработке математического описания данного процесса в работе [3] рассмотрены явления массопереноса вещества при вакуумном конденсационном нанесении покрытий на внутреннюю поверхность трубчатых изделий с соосно расположенного стержневого резистивного испарителя; согласно классической теории состояния идеального газа и теории испарения [4] разработана математическая модель; составлен алгоритм и программа расчета скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности трубчатого изделия в зависимости от режимов и условий его формирования [5, 6]. Погрешность расчёта не превышает 10% [3].

Для более полного использования возможностей полученной модели целесообразно разработать программу моделирования скорости конденсации

хромовых покрытий в вакууме на трубчатые изделия, позволяющую в едином массиве выходных данных представить закономерности изменения скорости конденсации покрытия в зависимости от режимов и условий его формирования. В связи с этим усовершенствованы алгоритм и программа расчета скорости конденсации покрытия. На рис. 1 приведена блок схема алгоритма.

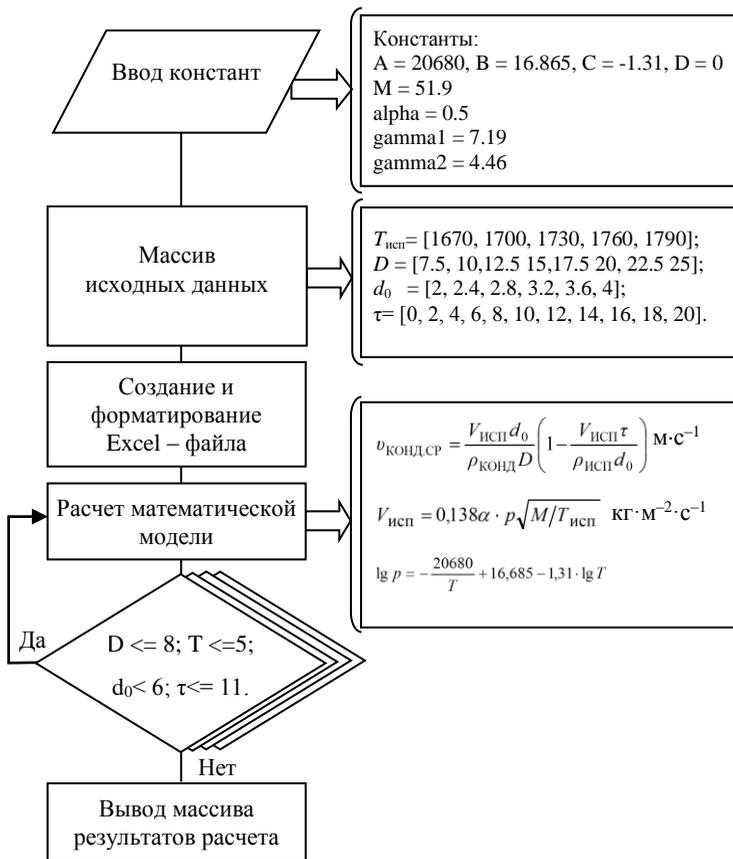


Рис. 1. Алгоритм моделирования скорости конденсации хромовых покрытий в вакууме на трубчатые изделия в зависимости от режимов их формирования.

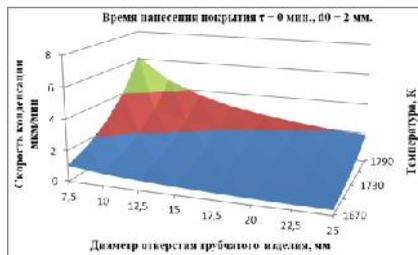
Программа составлена на языке Python 3.8, включает: ввод констант, массив исходных данных, вычисление на основе уравнений давления паров хрома и скорости конденсации покрытия в зависимости от режима испарения и условий формирования покрытия; вывод численных результатов моделирования в виде массива таблиц Excel и представление результатов в виде графиков, гистограмм и др. инструментов Excel. Фрагмент массива выходных данных приведен на рис. 2.

tau = 0, diam0 = 2								
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
1670	1,032138	0,774104	0,619283	0,516069	0,442345	0,387052	0,344046	0,309641
1700	1,652988	1,239741	0,991793	0,826494	0,708424	0,619871	0,550996	0,495897
1730	2,60296	1,95222	1,561776	1,30148	1,115554	0,97611	0,867653	0,780888
1760	4,033762	3,025322	2,420257	2,016881	1,728755	1,512661	1,344587	1,210129
1790	6,156752	4,617564	3,694051	3,078376	2,638608	2,308782	2,052251	1,847025
tau = 2, diam0 = 2								
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
1670	1,025698	0,769274	0,615419	0,512849	0,439585	0,384637	0,341899	0,307709
1700	1,63647	1,227353	0,981882	0,818235	0,701344	0,613676	0,54549	0,490941
1730	2,562	1,9215	1,5372	1,281	1,098	0,96075	0,854	0,7686
1760	3,935396	2,951547	2,361238	1,967698	1,686598	1,475774	1,311799	1,180619
1790	5,927597	4,445698	3,556558	2,963799	2,540399	2,222849	1,975866	1,778279

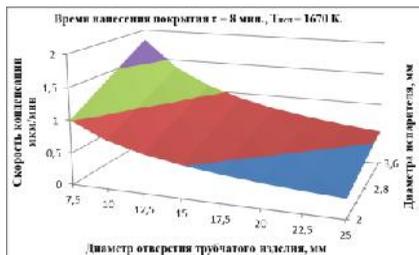
Рис. 2. Фрагмент массива результатов расчета  $v_{\text{конд}} = f(T_{\text{исп}}, D)$  в начальный момент времени нанесения покрытия,  $\tau = 0$  и  $\tau = 2$  мин. при  $d_0 = 2$  мм

Расчет скорости конденсации хромовых покрытий производился для наиболее характерных режимов вакуумного хромирования трубчатых изделий [7, 8]: температуре испарения  $T_{\text{исп}} = 1670 \dots 1790$  К, диаметре отверстия трубчатого изделия  $D = 7,5 \dots 25$  мм, начальном диаметре испарителя  $d_0 = 2,0 \dots 4,0$  мм и длительности нанесения покрытия  $\tau = 0 \dots 20$  мин.

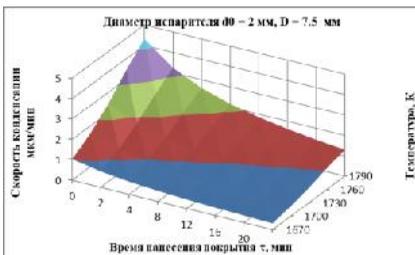
На рис. 3 приведены результаты математического моделирования в виде графиков Excel, которые демонстрируют изменение скорости конденсации хромовых покрытий  $v_{\text{конд.ср.}}$  в зависимости от режимов и условий их формирования: температуры испарения  $T_{\text{исп}}$ , диаметра отверстия трубчатого изделия  $D$ , начального диаметра испарителя  $d_0$  и длительности нанесения покрытия  $\tau$ .



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость скорости конденсации хромового покрытия от режимов его формирования

Таким образом, разработанная программа позволяет методом математического моделирования представить закономерность и провести анализ изменения скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности трубчатого изделия в едином массиве выходных данных в зависимости от различных режимов и условий формирования покрытия методом термического испарения в вакууме с соосно-расположенного стержневого резистивного испарителя.

### Список литературы

1. *Карташов, Б.А.* Среда динамического моделирования технических систем SimInTech/ *Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров.* – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
2. Патент № 1487486 Российская Федерация, МКИ С23С 14/00. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий: № 4107792/24-21: заявл. 04.06.86 / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников, А.Б. Яриков.*
3. *Инкин, Т.А.* Математическая модель прогнозирования скорости формирования конденсационного покрытия при термическом испарении в вакууме / *Т.А. Инкин, И.В. Штенников* // САПР и моделирование в современной электронике: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф., 24-25 октября 2019 г. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С.175-178. – DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e0282122f44/32093157.
4. Технология тонких пленок. Справочник / под ред. Л.Майссела, Р. Глэнга. –М.: Сов. радио, 1977.
5. *Инкин, Т.А.* Алгоритм и программа анализа скорости конденсации хромовых покрытий на внутренней поверхности трубчатых изделий в зависимости от условий испарения и конденсации / *Т.А. Инкин, И.В. Штенников* // «Молодежь и научно-технический прогресс»: сб. докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. студ. аспирант. и молод. учен., 9 апр. 2020г. – Губкин; Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2020.– Т.1. – С.100-105.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020613299. Программа расчета скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности полого изделия при термическом испарении материала с соосно расположенного стержневого испарителя / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников, Т.А. Инкин.*– № 2020612179; Заявл. 27.02.2020. Гос. регистрации 12.03.2020.
7. *Сидоренко, В.И.* Конусообразные кристаллиты в структуре хромовых покрытий / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников* // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства: Труды научно-технической конференции. – Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 2001.–С.48–52.
8. *Сидоренко, В.И.* К вопросу о слоистом строении вакуумных конденсатов хрома / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников* // Вестник ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. – №1(33) – С. 50-53.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Д.А. Княгинин

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБЪЕДИНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА РАЗНОГО ПОРЯДКА**

### IDENTIFICATION OF LINEAR SYSTEMS FOR SOLVING THE PROBLEM OF COMBINING OBJECT MODELS OF DIFFERENT ORDERS

*Рассмотрены проблемы, возникающие при решении задачи объединения математических моделей одного объекта представленных передаточными функциями разного порядка. Рассмотрены случаи перехода от модели третьего порядка к модели второго посредством исключения производной с наименьшим коэффициентом (грубое понижение порядка системы). Также показаны преимущества использования методов идентификации для получения вектора начальных условий требуемого порядка на основе результата расчета предыдущей модели.*

*The problems arising for solving the problem of combining mathematical models of one object represented by transfer functions of different orders are considered. Cases of transition from a third-order model to a second-order model by eliminating the derivative with the smallest coefficient (rough reduction of the system order) are considered. It also shows the advantages of using identification methods to obtain a vector of initial conditions of the required order based on the calculation result of the previous model.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, идентификация линейных систем, объединение математических моделей, начальные условия.*

*Keywords: math modeling, identification of linear systems, combining mathematical models, initial conditions.*

Как правило, сложные технические объекты могут быть описаны с разной степенью абстрагирования, в том числе и математическими моделями в виде передаточных функций разного порядка [1]. При этом, различные модели одного объекта могут быть наиболее эффективно использованы на разных участках временных (или других) характеристик объекта. В связи с этим, возникает ситуация, когда в процессе моделирования необходимо корректно перейти от одной модели объекта к другой. При этом переход необходимо осуществлять в произвольный момент, корректно отобразив пространство состояния одной модели на пространство другой модели, посредством передачи начальных условий необходимых для расчета данной модели.

В данной статье рассмотрены проблемы возникающие в рамках задачи автоматизации процесса моделирования объекта, описанного математическими моделями в форме передаточных функций разного порядка.

На примере моделей электромеханического преобразователя [2] (1, 2), рассмотрены возможные методы перехода между моделями и их недостатки.

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_3 T_M p^2 + T_M p + 1} \quad (1)$$

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_M p + 1} \quad (2)$$

Понижение порядка системы (переход от модели (1) к (2)) посредством отбрасывания производной старшего порядка, является грубым методом и приводит к искажению диаграммы выходной величины системы. На рис. 1 показан результат такого перехода во временной области, также приведены графики выходных величин для обеих моделей, рассчитанных отдельно. Как видно из рисунка, существует явное отклонение результата объединения моделей от результатов при полном расчете.

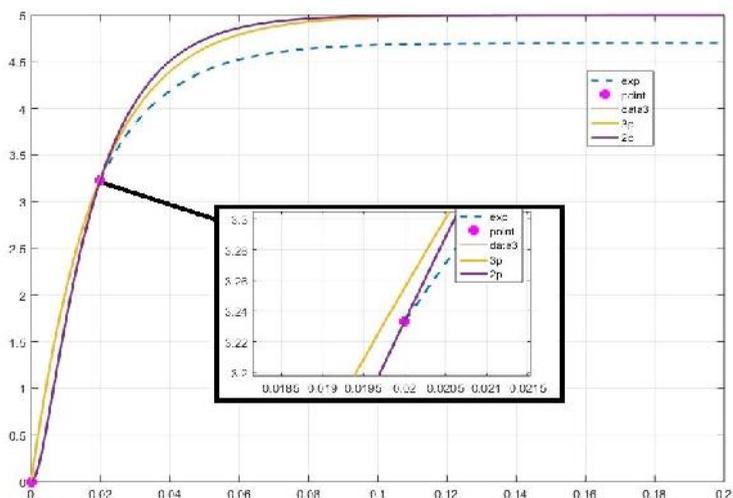


Рис. 2. Переход от модели второго порядка к модели первого

Очевидно, что описанное выше решение не является верным. Для обеспечения более корректного определения начальных условия для перехода между моделями разного порядка предложено использовать возможности идентификации модуля System Identification Toolbox программного комплекса Matlab.

Для автоматизации перехода между моделями принят следующий алгоритм:

1. Расчет актуальной на первом участке модели до точки сопряжения.
2. Получение ПФ, порядка соответствующего актуальной на следующем участке модели, методами идентификации модуля System Identification Toolbox.
3. Получение точки фазового пространства, конечной для первого участка и передача в качестве начальных условий в следующую модель.

4. Расчет модели с полученными начальными условиями, оценка корректности объединения.

На рис. 2 показан результат перехода от модели (2) к (1) во временной области, при использовании методов идентификации, также приведены графики выходных величин для обеих моделей, рассчитанных отдельно.

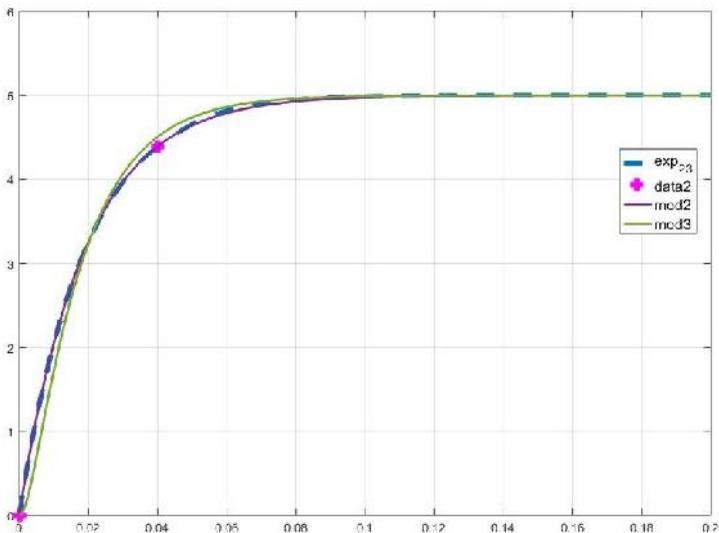


Рис. 3. Переход от модели первого порядка к модели второго с предварительной идентификацией системы

Использование предварительной аппроксимации значительно повышает качество сопряжения моделей в произвольной точке пространства, однако представленный выше алгоритм не позволил полностью автоматизировать процесс перехода между моделями. Для получения более плавного перехода необходимо использовать пропорциональные зависимости и коэффициенты, что связано с ненормированным диапазоном коэффициентов аппроксимации.

В качестве альтернативного решения сложившейся ситуации планируется разработать методы автоматизации масштабирования координат пространства состояний на основе различных метрик, позволяющих детектировать разрывной характер функции в области сопряжения моделей разного порядка.

### Список литературы

1. Горлач, Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация: учеб. пособие/ Б.А. Горлач. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 292 с.
2. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов/ В.И. Ключев. – 2-е изд. – М.: Энергомиздат, 2001. – 704 с.

Материал поступил в редколлегию 20.10.20.

Э.С. Константинов, З.М. Гизатуллин  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ**

FUNCTIONAL AND BEHAVIORAL MODEL OF REMOTE DIAGNOSTICS  
OF CARDIAC STIMULATORS

*Рассматриваются современные тенденции и проблемы дистанционной диагностики кардиостимуляторов, а также понятие и устройство, как «кардиостимулятор». Разрабатываются функциональная и поведенческая модели данной задачи.*

*This article discusses current trends and problems of remote diagnostics of pacemakers, as well as the concept and device as a "cardiac stimulators". Functional and behavioral models of this problem are developed.*

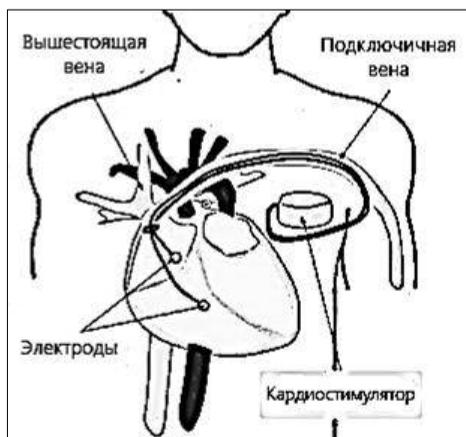
*Ключевые слова: модель, кардиостимулятор, искусственный водитель ритма, дистанционная диагностика.*

*Keywords: model, cardiac stimulators, artificial heart rate driver, remote diagnostics.*

В настоящий момент во всем мире и в России наблюдается быстрый рост количества установки кардиостимуляторов (КС). Использование таких электронных устройств дает новое направление в кардиологии для наблюдения, диагностики, а также и лечения пациентов. [1, 4]

Кардиостимулятор или электрокардиостимулятор (ЭКС) – это искусственный водитель ритма (ИВР), представляющий собой медицинский прибор (рис. 1), который имплантируется под кожу грудной клетки и служит для поддержания правильного ритма сердца, способствует исправления нарушений, а также дает возможность людям вернуться к нормальной и полноценной жизни. [5]

Такое устройство состоит из микросхемы, которая генерирует импульсы, батарейки, обеспечивающей питанием микросхему, а также из электрода, расположенного в сердце и выполняющего функции слежение за главным органом человека и приведение к нему электрического импульса.



*Рис. 1. Расположение кардиостимулятора в грудном отделе человека*

Существует несколько видов электрокардиостимуляторов: временный используется в случае необходимости срочной коррекции сердечного цикла человека; наружный является электрокардиостимулятором для коррекции сердечной ритмики человека по различным показаниям; имплантируемый является медицинским прибором, состоящий из титанового или любого другого сплава, совместимого с живыми клетками организма; однокамерный является самым распространенным типом электрокардиостимуляторов, включающий в себя один электрод в сердечном желудочке пациента; двухкамерным является кардиостимулятор, состоящий из двух электродов, один из которых устанавливается в желудочке, а другой - в предсердии; трехкамерные и четырехкамерные служат для стимулирования необходимой последовательности работы камер сердца.

В медицине известны случаи, когда неправильный режим работы, сбой в настройках или механическая травматизация искусственного водителя ритма приводила к смерти пациента. В эту категорию можно отнести и разряд аккумулятора устройства, когда пациент с тяжелой формой заболевания сердца затягивает замену батарейки, и излом проводника со стойкой полной и неполной утратой проводимости, и дислокация проводника, и нарушение целостности изоляции проводника.

Новой ролью в возможностях своевременных изменений параметров ЭКС является дистанционная диагностика (рис. 2). Весь процесс работы передачи данных требуется только участие пациента.

Для того чтобы свести к минимуму развитие тяжелых побочных реакций и летального исхода от некорректной работы кардиостимулятора, пациент должен регулярно проходить кардиологические обследования. Прибор проверяется программатором, который при необходимости корректирует режим стимуляции, устраняя неполадки [2].

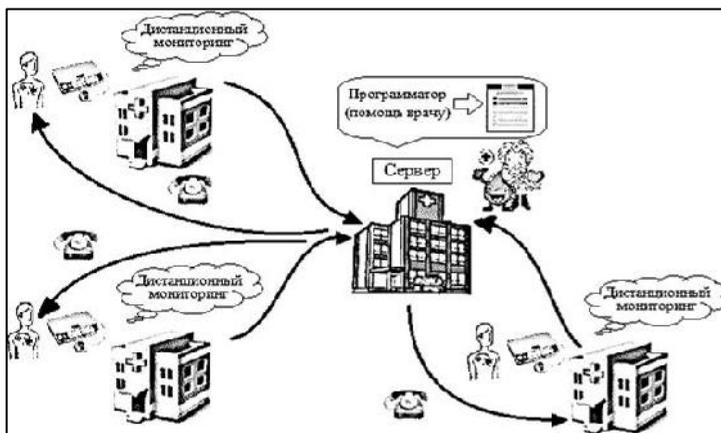


Рис. 2. Схема работы дистанционной диагностики имплантируемых ЭКС

В большинстве случаев усовершенствования дистанционной диагностики дает возможность наблюдения за пациентами, которые находятся в большом удалении от медицинского учреждения, которые вынуждены приехать на мониторинг своего ЭКС. Следовательно, врачу приходится больше тратить время на диагностику работы электрокардиостимулятора. [3]

Разработка функциональных и поведенческих моделей (IDEF0 и IDEF3) процедуры дистанционной диагностики кардиостимуляторов показаны на рисунках 3, 4.

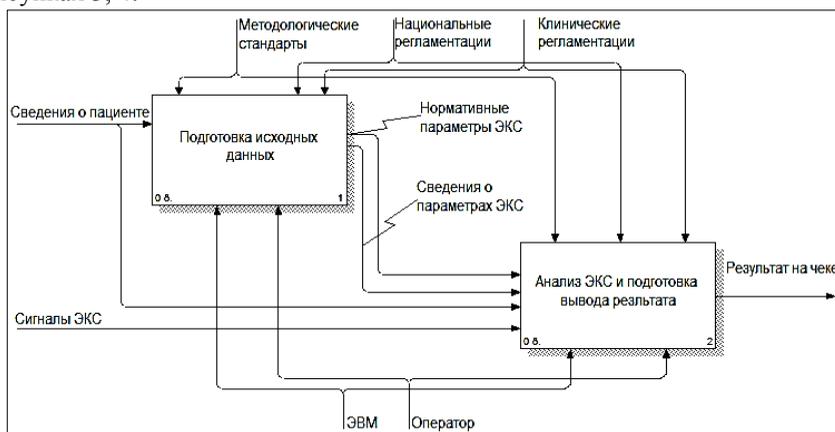


Рис. 3. A0 уровень IDEF0 диаграммы

В блоке «Подготовка исходных данных» проводится подготовка исходных данных о пациенте и электрокардиостимуляторе. Сведения о пациенте включает в себя ФИО и номер полиса ОМС; ЭКС – определения типа параметров, характеризующие с нормативными документами: методологические стандарты, национальные и клинические регламентации.

Блок «Анализ ЭКС и подготовка вывода результата» отвечает непосредственно за сам процесс диагностики электрокардиостимулятора. Результатом данного блока является вывод результата на чеке.

Декомпозицией описанного выше блока являются «Мониторинг ЭКС», который производит длящийся процесс наблюдения за электрокардиостимулятором, который включает в себя снятие параметров ЭКС, их регистрацию, и «Анализ, полученных сигналов ЭКС», где происходит диагностика, т.е. полное изучение состояния электрокардиостимулятора, выявление дисфункции, неисправностей и неполадок, влияющие на корректную работу ЭКС.

Во всех блоках экспертами выступают оператор и вычислительная система. А также в блоках главными нормативными документами являются методологические стандарты, национальные и клинические регламентации.

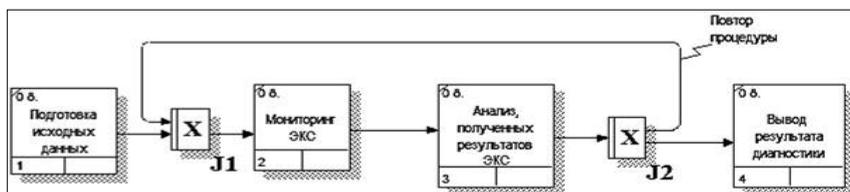


Рис. 4. Диаграмма проектной процедуры IDEF3

Модель проектной процедуры IDEF3 (рис. 4) позволяет понять каждый дальнейший этап проектирования. Сначала идет подготовка исходных данных. Далее выполняется мониторинг ЭКС, происходит анализ, полученных результатов с нормированными параметрами. После анализа следует вывод результата, следовательно, печать на чеке.

### Список литературы

1. Дорощев, В.И. Восстановительное лечение больных с имплантированными электрокардиостимуляторами / В.И. Дорощев, Г.Б. Сеидова // Вестник аритмологии, 2005. – № 41. – 21 - 26 с.
2. Желнов, В.В. Оценка состояния кардиодинамики у пациентов с искусственным водителем ритма / В.В. Желнов, Т.А. Капралова, Л.Е. Кузьминишин, А.К. Гиляревский // Кардиология, 1983. – Т.23. – № 11. – 27 - 31 с.
3. Ефимов, И.Р. Прогресс в изучении механизмов электрической стимуляции сердца / И.Р. Ефимов, Ю. Ченг, А.Т. Самбелашвили, В.Н. Никольский // Вестник аритмологии, 2002. – № 28. – 79–83 с.
4. Ponikowski, P. Heart failure: preventing disease and death worldwide / P. Ponikowski, et al. // ESC Heart Fail, 2014. – № 1. – 4 - 25 p.
5. Morin, D.P. The state of the art: atrial fibrillation epidemiology, prevention, and treatment / D.P. Morin, M.L. Bernard, C. Madias, P.A. Rogers, S. Thihalolipavan, N.A. Estes // Mayo Clin Proc, 2016. – № 91. – 1778 – 1810 p.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Э.С. Константинов, З.М. Гизатуллин  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ**

MATHEMATICAL SUPPORT OF THE AUTOMATED SYSTEM  
OF REMOTE DIAGNOSTICS OF CARDIAC STIMULATORS

*Рассматривается содержательная и математическая постановка задачи дистанционной диагностики кардиостимуляторов, а также методы и алгоритмы решения.*

*This article discusses the meaningful and mathematical formulation of the problem of remote diagnostics of pacemakers, as well as methods and algorithms for solving.*

*Ключевые слова: модель, кардиостимулятор, искусственный водитель ритма, дистанционная диагностика.*

*Keywords: model, cardiac stimulators, artificial heart rate driver, remote diagnostics.*

Все современные электрокардиостимуляторы включают в себя источник энергии, стимулирующую и воспринимающую цепь. При имплантации ЭКС используют один электрод при однокамерных, два большинства случаев при двухкамерных, где один из них расположен в правом предсердии, а другой – в правом желудочке. [1]

Сами электроды для постоянной стимуляции состоят из таких компонентов, как проводники, покрытие, соединительные кончики и механизм фиксации. На данный момент современные электроды часто содержат на кончике кортикостероид (стероидные электроды), который позволяет иметь низкий острый и хронический пороги стимуляции и получать хороший сигнал от миокарда.

Имплантация ЭКС позволяет улучшить прогноз и качество жизни пациентов, но не всегда положительно влияет на проявление основного заболевания, его осложнений и способна вызвать свои собственные осложнения, снижающие эффективность работы. Наблюдение за пациентами после имплантации ЭКС позволяет выявить отдельные факторы, учет и адекватная коррекция которых могут улучшить результаты лечения и повлиять на ближайший и отдаленный прогнозы у этих больных, но и не у всех есть возможность каждый раз диагностировать кардиостимулятор, так как находятся далеко от МКДЦ.

Динамическое наблюдение за больными с имплантированными ЭКС предусматривает проведение периодических контрольных исследований системы электрокардиостимуляции (контроль состояния кардиостимулятора и электрода) и состояния пациента. Необходимо контролировать состояние уже имплантированного электрода для того, чтобы предупредить его дисфункцию, которая может представлять опасность для пациента.

Исходными данными являются входные параметры (напряжение (В), сила тока (мА), импеданс (Ом)) соответственно  $x_1, x_2, x_3$ , которые характеризуют сведения о дислокации функций: разряд батареи, излом проводника со стойкой полной утратой проводимости, излом проводника неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника.

Результирующие данные – определение значение параметра характера нарушения (разряд батареи, излом проводника со стойкой полной и неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника).

Для разработки автоматизированной системы дистанционной диагностики электрокардиостимуляторов могут служить искусственные нейронные сети. [4] В основу необходимости нейронных сетей, то есть самообучающихся системах включаются такие способности, как выполнять запрограммированные действия, анализировать поток поступающей информации, находить некие закономерности, производить диагностирование.

Оптимизация нейронной сети направлена на уменьшение объёма вычислений при условии сохранения точности решения задачи на требуемом уровне. Параметрами оптимизации в нейронной сети могут быть размерность и структура входного сигнала нейросети, синапсы нейронов сети, количество нейронов каждого слоя сети, количество слоёв сети. [5]

Перечень, который используется в математической модели, показан в таблице 1.

*Таблица 1. Математическая модель искусственного нейрона*

Обозначение компонента объекта и результата проектирования	Наименование компонента объекта и результата проектирования	Наименование соответствующего элемента математической модели
$n$		Число входных сигналов
$m$		Число выходных сигналов
$x_i$	Входные сигналы	Значение $i$ -го входа нейрона
$w_i$	Коефф-т обучения	Вес $i$ -го синапса
$S_j$	Ячейка нейрона	Взвешенная сумма вх. сигн.
$y_i$	Выход нейрона	Значение $i$ -го выхода нейрона
$e_i$		Ошибки нейронов ( $i = \overline{1..m}$ )

Состояние нейрона определяется по формуле (1):

$$S_j = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_{ij} \quad (1)$$

Определяется значение аксона нейрона по выражению (2):

$$y_j = f(S_j) \quad (2)$$

В процессе обучения искусственной нейронной сети заключается в необходимости настройки сети таким образом, чтобы для некоторого множества входов давать желаемое (или, по крайней мере, близкое, сообразное с ним) множество выходов.

В качестве активационной функции, которая преобразует взвешенную сумму в число, которое будет выходом нейрона, выбрана сигмоидальная функция, так как в отличие от пороговой функции, выход которой равен либо нулю, либо единице, она позволяет получить число, расположенное в диапазоне от 0 до 1. Чем больше взвешенная сумма, тем ближе выход будет к 1 и соответственно наоборот - чем меньше взвешенная сумма, тем ближе выход нейрона будет к 0.

Модель разработанной НС представляет собой однослойную нейронную сеть. Нейроны входного слоя представляют собой данные ЭКС в виде числовых характеристик (напряжение (В), сила тока (мА), импеданс проводника (Ом)), а выходного слоя представляют собой определение характера нарушения так же числовыми значениями (нормальные величины при длительном ЭКС, разряд батареи, излом проводника со стойкой полной и неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника).

На вход выходного слоя подаются числовые значения требуемых характеристик, затем значения нейрона сравниваются с признаками, с помощью активационной функции определяет значимость данного параметра, и на каждом выходе нейронной сети получается оптимальное значение соответствующего данному нейрону.

Процесс функционирования нейронной сети зависит от значений синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой НС, отвечающей какой-либо задаче, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов.

Модель, взятая за основу при построении алгоритмов адаптации в нейронных сетях, позволила формировать критерий первичной оптимизации в рассматриваемых системах в виде требований минимума средней функции ошибки и его модификаций:

- максимум апостериорной вероятности (условная вероятность случайного события при условии того, что известны апостериорные, т. е. основанные на опыте, данные);
- минимум средней функции ошибки;
- минимум средней функции ошибки при условии равенства условных функций риска для различных классов;

- минимум средней функции ошибки при условии заданного значения условной функции ошибки для одного из классов и другие критерии первичной оптимизации, вытекающие из требований конкретной практической задачи.

Отметим, что в подавляющем большинстве работ в области теории нейронных сетей и в алгоритмах обратного распространения рассматривается простейший критерий – минимум среднеквадратической ошибки.

Один из основных недостатков этого классического алгоритма состоит в возможном попадании в локальные минимумы функции. Для нейронной сети требуется подобрать оптимальные веса  $w_{11}$ ,  $w_{12}$ ,  $w_{13}$ ,  $w_{21}$ ,  $w_{22}$ ,  $w_{23}$ ,  $w_{31}$ ,  $w_{32}$ ,  $w_{33}$ , минимизирующие значение целевой функции, определяемой среднеквадратичной погрешностью. Параметрами практически любой задачи являются веса, которые определяют точку пространства поиска и, следовательно, представляет собой возможное решение.

Условием прекращения работы алгоритма может быть, как достижение суммарной квадратичной ошибкой результата на выходе сети предустановленного заранее минимума в ходе процесса обучения, так и выполнения определенного количества итераций алгоритма.

Для ограничения области поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая находится по методу наименьших квадратов (3):

$$E(w_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p e_i^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где для ошибки служит формула (4):

$$e_i = \frac{(y_j - d_i)}{\varepsilon} \rightarrow 0 < \varepsilon \leq 1. \quad (4)$$

Минимизация ограниченной функции является устойчивостью нейронной сети (входное воздействие в любой момент времени). Взаимодействие нейронов описывается весовыми коэффициентами  $w_i$ , которые характеризуют силу воздействия нейронов.

### Список литературы

1. *Ермолаева, Т.Н.* Динамика сердечной недостаточности и качества жизни у больных с имплантированным кардиостимулятором / Т.Н. Ермолаева, В.Ю. Кашин, С.В. Шиховцов, И.В. Кубышкин // *Анналы аритмологии: Мат. I Всерос. съезда аритмологов.* – 2005. – № 2. – 101 с.
2. *Аксенов, С.В.* Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев. – Томск, 2006. – 128 с.
3. *Dey, N.* Classification in BioApps: Automation of Decision Making / N. Dey, A.S. Ashour, S. Borra. // *Springer*, 2017. – № 26. – 781-788 p.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

В.И. Пищик, А.М. Игнатченко, О.В. Обидина  
(Республика Беларусь, г. Могилев, Белорусско-Российский университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**SIMULATION OF GLOW DISCHARGE PLASMA PROCESSES DURING  
METALS AND ALLOYS PROCESSING**

*Рассмотрены результаты моделирования процессов, происходящих при обработке материалов в плазме тлеющего разряда. Плазменная обработка используется для упрочнения материалов и улучшения их эксплуатационных характеристик.*

*The results of simulation of glow discharge processes during material processing has been discussed in the paper. Plasma processing is widely used to harden the materials and improve their performance.*

*Ключевые слова: моделирование, плазма тлеющего разряда, металл, сплав.*

*Keywords: simulation, glow discharge plasma, metal, alloy.*

Широкое использование станков с программным управлением различного спектра, появление материалов, трудно поддающихся обработке, приводят к повышению качества инструментальной оснастки.

Создание новых материалов не позволяет увеличить резервы улучшений эксплуатационных характеристик инструментального оснащения. Поэтому важной перспективой настоящего времени является внедрение технологий модификации рабочих поверхностей. Улучшения эксплуатационных свойств материалов можно добиться, используя известные методы модификации материалов: ионная имплантация, химико-термический, лазерная обработка. Однако перечисленные способы имеют недостатки, именно поэтому поиск новых методов модификации материалов актуален. Наиболее популярной методикой обработки является плазменная обработка. Обладая достаточной универсальностью, высокой производительностью и эффективностью в плане возможной модификации различных материалов, обработка плазмой занимает ведущую и перспективную роль обработки поверхностей. Плазменное воздействие способно обрабатывать большие площади и сложной формы изделия, нежели лазерная обработка и ионная имплантация. Хорошей отличительной особенностью от химико-термических методов является

отсутствие использования в процессе обработки жидких растворов, это приводит к экологически чистому и не энергоемкому выводу.

В исследовательской работе рассматривается тлеющий разряд, используемый для модификации свойств и структуры материалов. [1-4] Прикатодная область выступает в роли отличительной особенности, которая характеризуется большой величиной падения напряжения. Поддержание разряда происходит путем генерации свободных электронов в катодной области. Свободные электроны увеличивают свою скорость воздействием на них электрического поля до значений энергии, находящейся вблизи катода, достаточных для ионизации атомов и молекул электронным ударом. Возникшие ионы под действие поля направляются в сторону катода, выбивая с его поверхности электроны.

В тлеющем разряде область катода составляет важную часть, сосредотачивая в себе все необходимые процессы, ответственные за существование разряда. Возникновение первоначальных электронов, а в дальнейшем их ускорение, появление электронных лавин, генерирующих необходимое количество для питания остальной части разряда электронов, происходит в катодной области, также образуются положительные ионы и фотоны, поддерживающие процессы эмиссии.

Сложность описания процессов в тлеющем разряде вынуждает использовать профессиональные пакеты моделирования. В этой роли прекрасно подходит COMSOL Multiphysics, предназначенный для решения физических задач большого спектра. Данное программное обеспечение производит вычисления, используя методы конечных элементов.

Разряд для моделирования рассматривался в промежутке между анодом и катодом и поддерживался за счет эмиссии вторичных электронов на катоде. Решение уравнение дрейфовой диффузии позволяют определить плотность электронов и их средней энергии.

Эксперимент проводился в среде, заполненной аргоном при давлении 3-10 Па. Межэлектродное расстояние составляет 0,4 м. Электрический потенциал составлял 125 В, а температура газа 293 К.

В ходе моделирования было представлено распределение плотности электронов вдоль центральной оси. При увеличении давления замечается возрастание плотности электронов в зоне разрядного промежутка, также

область, имеющая наибольшую температуру, сужается. В области катода температура газа выше, чем в соседних зонах тлеющего разряда. Катод распыляется за счет выдергивания нейтральных атомов металла во время бомбардировки катода положительными ионами.

Моделирования показало то, что ширина падения потенциала на катоде уменьшается с увеличением давления, также принято, что основное падение потенциала происходит именно в близости с катодом.

В ходе работы были рассмотрены плотности электронного и ионного токов и суммарная плотность тока. В области падения потенциала вблизи с катодом возрастает ионный ток. Происходит выбивание электронов катода в результате ионной бомбардировки.

Замечено систематическое возрастание электронной плотности в области катодного падения потенциала, связано это в первую очередь с высокой температурой. Наблюдается возрастание электронной плотности из-за образования новых электронов после прохождения области катодного падения потенциала электронами.

#### Список литературы

1. *Tereshko, I.V.* Formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation / *I.V. Tereshko, V.V. Abidzina, I.E. Elkin et al.* // *Surface and Coatings Technology*. V. 201, 2007. - P. 8552-8556.
2. *Shamiankou, U., Abidzina, V., Belaya, M.* Structure changes and improvement of operating properties of high-speed and tool steels irradiated in glow-discharge plasma // *Materials, Environment, Technology: Conference Proceedings*. – Riga. –2013. – P.49-54.
3. *Обидина, О. В.* Модификация структуры и свойств металлических материалов под действием плазмы тлеющего разряда: автореф. ... канд. физ.-мат. наук. – Барнаул: 2013. – 23 с.
4. Патент РБ № 14716 ВУ, U C 21 D 1/78, 2011/ *В.М. Шеменков, А.Ф. Короткевич.*
5. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток/ В.Л. Грановский. –М.: «Наука», 1971. – 543 с.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

С.В. Седых, А.Н. Школин

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ 5340EU01x**

### **DEVELOPMENT AND TESTING OF THE BEHAVIORAL MODEL OF THE 5340EU01x INTEGRAL MICROCIRCUIT**

*Приведено описание функциональной схемы поведенческой модели интегральной схемы (ИС) ШИМ-контроллера 5340EU01x. Выполнена верификация поведенческой модели, путем проведения экспериментальных исследований на компьютерном прототипе, с использованием типовых схем измерения наиболее важных электрических параметров ИС, и сравнения полученных данных с нормированными техническими условиями величинами. Разработка тестового проекта в среде моделирования LTspice и анализ поведения ИС при использовании ее в схеме понижающего, импульсного источника питания.*

*The description of the functional diagram of the behavioral model of the integrated circuit (IC) of the 5340EU01x PWM controller is given. The verification of the behavioral model was carried out by conducting experimental studies on a computer prototype, using standard circuits for measuring the most important electrical parameters of the IC. Comparison of the obtained data with standardized technical conditions and values. Development of a test project in the LTspice modeling environment and analysis of the behavior of the IC when used in a step-down, switching power supply circuit.*

*Ключевые слова: моделирование в электронике, поведенческая модель, импульсный источник питания, ШИМ-контроллер, LTspice, язык SPICE.*

*Keywords: simulation in electronics, behavioral model, switching power supply, PWM controller, LTspice, SPICE language.*

Современный этап развития разработок в сфере проектирования электронных устройств характеризуется стремлением использования компьютерных средств моделирования, нежели исследование устройства на тестовом макете.

Компьютерное моделирование является очень важным этапом разработки электронного устройства, без которого уже сложно, а в некоторых случаях невозможно, представить проектирование всевозможных современных радиоэлектронных устройств. Данная стадия выступает как в роли дополнительной меры для улучшения прогнозируемости поведения и исследования отдельных узлов устройства, а также в полной мере послужить заменой физическому моделированию (макетированию), что положительно

отразится как на стоимость, так и надежность конечной, разрабатываемой продукции. Данный факт аргументируется, например, следующими обстоятельствами:

1. Необходимостью сокращения сроков разработки новых электронных устройств.
2. Наличием эффективных алгоритмов и программ компьютерного моделирования электрических цепей.
3. Развитой теорией математического моделирования электронных компонентов.
4. Часто физическое моделирование просто невозможно из – за повышенной сложности устройства.

Ключевыми проблемами, препятствующие использованию компьютерного моделирования, являются: отсутствие верифицированных поведенческих моделей (ПМ) того или иного компонента, входящего в разрабатываемое устройство, а также неправильное их применение; неверная настройка и использование вычислительных алгоритмов, приводящие к получению ошибочных результатов моделирования, что в свою очередь требует высокую квалификацию инженера-проектировщика. [3]

В данной работе описана и верифицирована, разработанная в ФГБОУ ВО «БГТУ», ПМ однокантного экономичного многофункционального ШИМ-контроллера с токовым режимом, предназначенная для моделирования блоков питания, выполненных на основе данной интегральной схемы(ИС) серии 5340EY01x, в средах моделирования и системах автоматизированного проектирования(САПР), использующих язык схемотехнического моделирования SPICE.

Областью применения ПМ является анализ электрических переходных процессов во временной области в средах моделирования и САПР [1–4].

ПМ интегральной микросхемы ШИМ-контроллера серии 5340EY01x реализована в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 1.

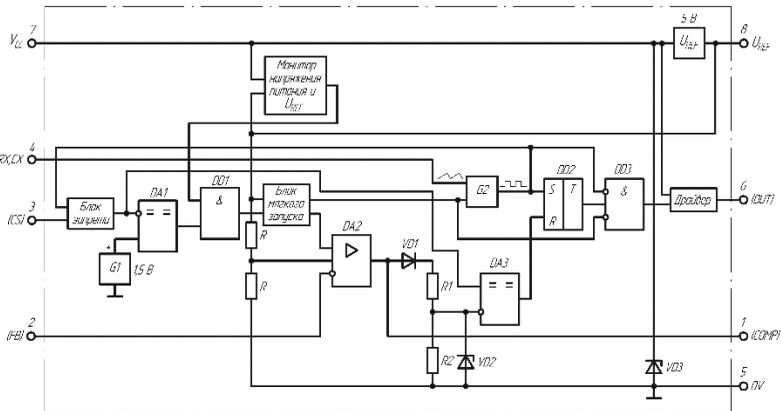


Рис. 1. Функциональная схема ПМ ИС 5340EY01x

Функциональный блок ПМ монитора питания и опорного напряжения формирует разрешающие логические сигналы для остальных внутренних блоков ПМ в зависимости от поданного напряжения питания на ИС согласно двум порогам – порогу срабатывания (включения) и порогу отпускания (выключения).

Функциональный блок ПМ генератора обеспечивает задающее пилообразное нарастающее напряжение, частота которого зависит от внешних подключенных к ИС компонентов. Задающее пилообразное нарастающее напряжение на выходе генератора используется для формирования импульсов предустановки ШИМ «защелки», реализованной в виде триггера.

Функциональный блок ПМ усилителя ошибки обеспечивает усиление сигнала обратной связи по напряжению и формирование напряжения на внешнем выводе COMP. Уровень задающего напряжения в усилителе определяется как половина от опорного напряжения, т.е. при уровне опорного напряжения в установившемся режиме равном 5В он составляет 2,5В.

Функциональный блок ПМ мягкого запуска обеспечивает плавный во времени процесс нарастания напряжения на выводе COMP.

Функциональный блок токового компаратора ПМ сравнивает сигналы обратной связи по току (вывод CS) с выходным сигналом блока усилителя ошибки по напряжению, и формирует входной логический сигнал ШИМ «защелки», реализованной в виде триггера.

Верификация ПМ ИС проведена на соответствие статических и динамических электрических параметров модели параметрам, приведенным в технических условиях. Диаграммы результатов работы ПМ, иллюстрирующие некоторые параметры, входящие в технические условия, приведены на рис. 2.

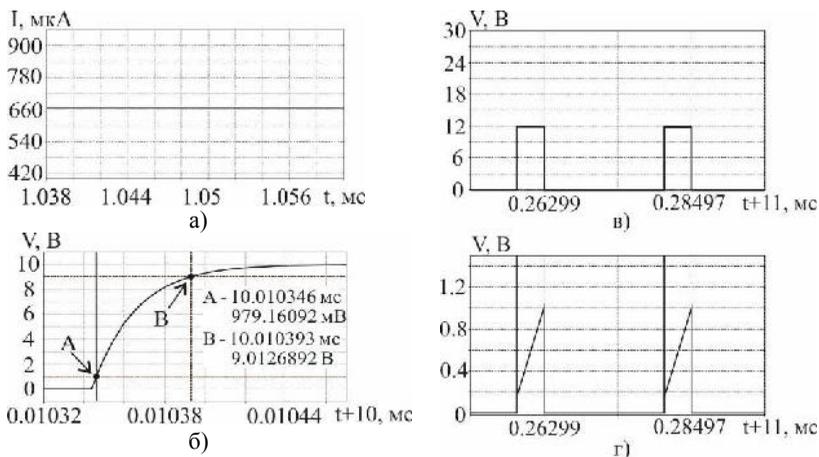
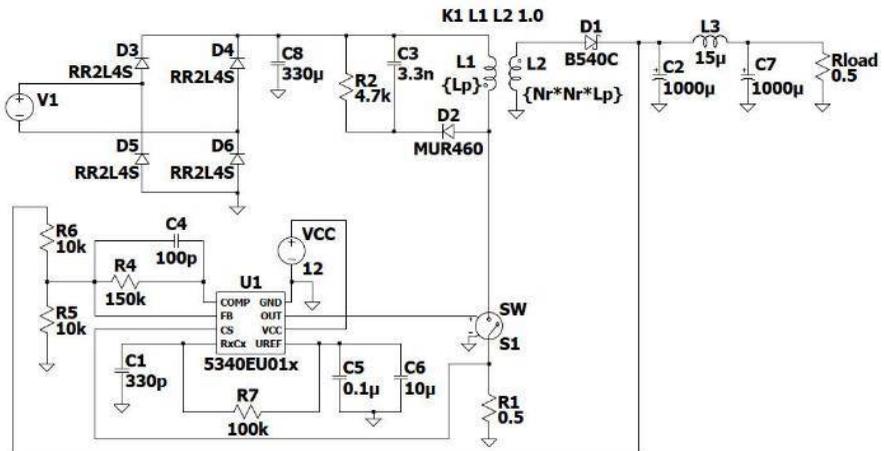


Рис. 2. Диаграммы результатов верификации параметров: (а)ток потребления; (б) время нарастания выходного сигнала; (в)выходное и (г) входное максимальное, напряжение токового компаратора

Проверка адекватности ПМ, осуществляется путем сравнения, полученных на диаграммах, значений с интервалом допустимых значений электрических параметров ПМ ИС, которые нормируются техническими условиями. Таким образом, для параметров: ток потребления ( $< 3\text{mA}$ ); время нарастания выходного сигнала ( $< 70\text{ns}$ ); входное максимальное напряжение токового компаратора (1В). [1]

Тестовый проект реализован в среде моделирования LTSpice. Графическое представление тестового проекта в редакторе LTSpice приведено рис. 3. Данная схема источника питания, собранная по типовой схеме обратного преобразователя напряжения, включает в себя разработанную ПМ ИС 5340EU01x и обеспечивает работу нагрузки мощностью 48 Вт с выходными параметрами:  $U_{\text{вых}}=5\text{В}$  и  $I_{\text{вых}}=10\text{А}$ .



```
.tran 0 12m 0 50n startup
.param Lp=760u
.param Nr=8/90 ; Nr=Wsecondary/Wprimary
.MODEL sw sw ron=75m roff=10Meg von=2.5 voff=2
SINE(0 311 50 0 0 90)
.ic V(HV)=310
```

Рис. 3. Тестовый проект источника питания в среде моделирования LTSpice

Диаграммы переходных процессов, характеризующих переходные процессы, при моделировании импульсного источника питания по типовой схеме включения ИС, приведены на рис. 4.

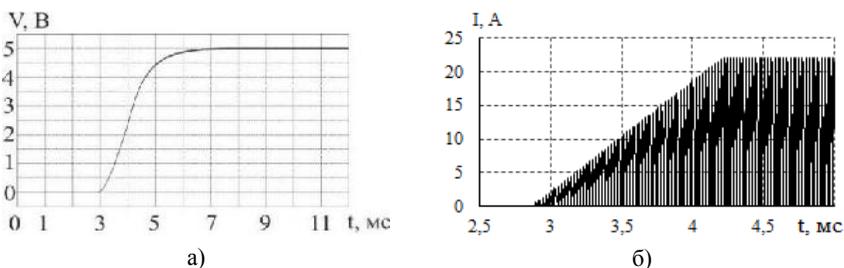


Рис. 4. Диаграммы результатов моделирования работы источника питания: (а) выходное напряжение на нагрузке в процессе запуска; (б) переходный процесс тока вторичной обмотки

В работе были описаны функциональные блоки, входящие в структурную схему ПМ ИС 5340EУ01х, такие как: монитор питания, опорного напряжения, генератора пилообразного напряжения, усилителя ошибки, мягкого запуска и токового компаратора. Вследствие проведения экспериментальных исследований ПМ, на компьютерном прототипе измерительной схемы, были получены диаграммы статических и динамических электрических параметров, из которых можно сделать вывод том, что они соответствуют установленным критериям допустимых значений нормированных, техническими условиями, величин. Соответственно, можно судить о подтверждении валидности ПМ. Тестовый проект, реализованный в среде моделирования LTspice, показал адекватность работы ПМ в составе компьютерной модели обратноходового преобразователя напряжения.

### Список литературы

1. Дракин, А.Ю. Использование имитационных моделей при контроле параметров интегральных микросхем / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин, А.А. Пугачев // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 4.
2. Княгинин, Д.А. Поведенческая модель ШИМ-контроллера на структурном уровне / Д.А. Княгинин, А.Н. Школин // САПР и моделирование в современной электронике // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 ноября 2017 г. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 200-203.
3. Школин, А.Н. Разработка поведенческих моделей интегральных микросхем ШИМ-контроллеров высокочастотных импульсных источников питания / А.Н. Школин, С.В. Михеев // САПР и моделирование в современной электронике // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции, Брянск, 22–23 ноября 2017 г. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 146-152.
4. Shkolin, A.N. Development of automated measurement systems for testing integrated circuits of switching converters / A.N. Shkolin, A.Y. Drakin, V.F. Zotin // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2018. – P. 1-4.

Материал поступил в редакцию 20.10.20.

В.И. Семенов, А.К. Шурбин

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ**

### **CONSTRUCTION OF WAVELETS WITH A RECTANGULAR AMPLITUDE-FREQUENCY RESPONSE**

*В научной литературе отмечается, что цифровые фильтры с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой физически не реализуемы. В работе на примере вейвлетов показано, что такие фильтры можно синтезировать.*

*In the scientific literature, it is noted that digital filters with a rectangular frequency response are not physically realizable. In the work, using the example of wavelets, it is shown that such filters can be synthesized.*

*Ключевые слова: непрерывное вейвлет-преобразование, прямоугольная амплитудно-частотная характеристика, симметричный ортогональный вейвлет, цифровой фильтр.*

*Keywords: continuous wavelet transform, rectangular amplitude-frequency response, symmetric orthogonal wavelet, digital filter.*

Для того, чтобы при реконструкции сигнала не было искажений, необходимо иметь ортогональные симметричные и антисимметричные вейвлеты. В литературе отмечается, что таких вейвлетов не существует. При синтезе цифровых фильтров также желательно иметь симметричные и антисимметричные импульсные характеристики, обеспечивающие одинаковую временную задержку для всех частот сигнала. Такие фильтры имеют импульсную характеристику конечной длины (КИХ-фильтры). Применение таких фильтров приводит для прямоугольных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) к пульсациям слева и справа от частоты среза и появлению переходной полосы (явление Гиббса). Объясняется это усечением ряда Фурье. Чем короче ряд, тем в большей степени происходит отклонение частотной характеристики от первоначальной на крутых перепадах. Объясняют явление Гиббса еще используя свойство свертки. Произведение функции с бесконечно длинной импульсной характеристикой на функцию окна конечной длины в частотной области соответствует свертке их Фурье-образов. Для прямоугольного окна Фурье-образом является sinc-функция, которая имеет более широкий центральный пик для более коротких окон. Если Фурье-образом импульсной характеристики является передаточная функция (частотная характеристика) с прямоугольной АЧХ, то ее свертка с sinc-функцией порождает явление Гиббса. Для уменьшения пульсаций применяются различные виды окон (весовые функции). В литературе по

цифровым фильтром на основе критерия Пэли - Винера (Пели - Виннера) доказывалось, что фильтры с прямоугольной АЧХ физически нереализуемы. Так как вейвлеты являются импульсными характеристиками при разложении (декомпозиции) и реконструкции (восстановлении) сигнала, то на основе критерия Пэли-Винера нельзя получить вейвлеты с прямоугольной АЧХ.

Насколько цифровой фильтр (вейвлет) подходит для практического применения, можно проверить, декомпозируя сигнал прямым и реконструируя обратным вейвлет-преобразованием (ВП). Если реконструированный сигнал точно совпадает с оригинальным сигналом, то вейвлет подходит и он ортогональный. В теории обобщенного преобразования Фурье доказывалось, что вейвлеты ортогональны, если скалярное произведение этих вейвлетов равно нулю. Исследования показывают, что чем меньше наложение спектров вейвлетов для разных масштабных коэффициентов, тем меньше скалярное произведение этих вейвлетов. Не будет наложения, когда спектры имеют прямоугольную форму.

Основным признаком вейвлетов являются нулевое среднее. Нулевое среднее означает, что график функции должен осциллировать (быть знакопеременным) вокруг нуля на оси времени и иметь нулевую площадь:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0.$$

Часто для приложений необходимо, чтобы все первые  $n$  моментов были равны нулю:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \psi(t) dt = 0.$$

Для получения вейвлетов  $n$ -го порядка были проведены исследования и в ходе исследования были сконструированы ортогональные симметричные и антисимметричные вейвлеты с прямоугольной АЧХ. На рис. 1 представлена пятая часть ортогонального симметричного вейвлета.

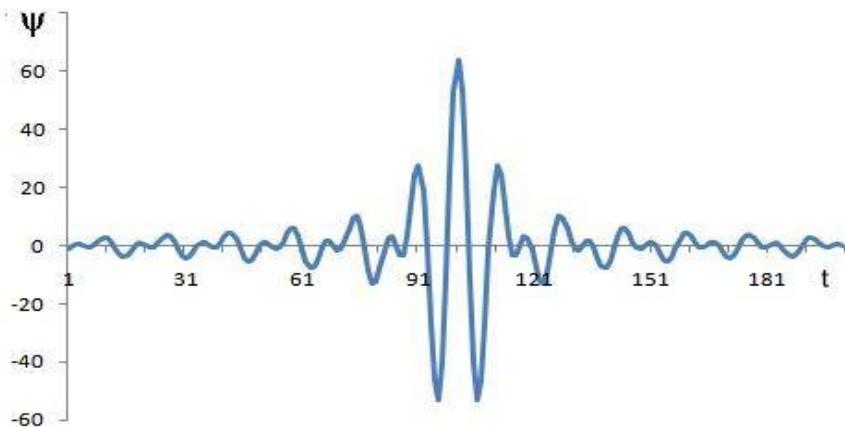


Рис. 1. Ортогональный симметричный вейвлет

Вейвлеты  $n$ -го порядка позволяют анализировать более тонкую (высокочастотную) структуру сигнала, подавляя медленно изменяющиеся его составляющие. Такие вейвлеты позволяют концентрировать энергию в немногих значимых коэффициентах. Концентрация энергии в немногих значимых коэффициентах называется локализацией энергии, она является основной предпосылкой для сжатия данных. Концентрирующий механизм работает более эффективно с увеличением  $n$ . На рис. 2 представлена АЧХ этого вейвлета в децибелах. Видно, что в полосе задержания ослабление около  $-300$  дБ, что сравнимо с погрешностью вычисления. Например, при скалярном произведении синусоид с разными частотами с числом отсчетов, как у данного вейвлета, вычисленное значение больше  $-300$  дБ. Вместе тем, скалярное произведение должно быть равно нулю, так синусы и косинусы образуют ортогональный базис.

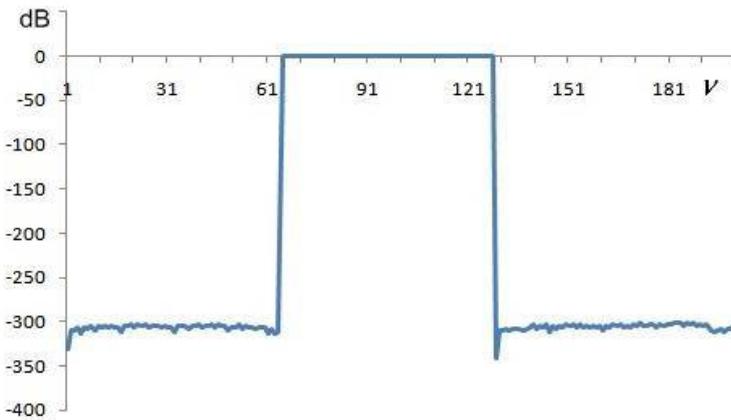


Рис. 2. АЧХ симметричного ортогонального вейвлета

Скалярное произведение данных вейвлетов равно нулю в пределах погрешности. Такое наблюдается для всех скалярных произведений вейвлетов с другими масштабными коэффициентами. Только скалярные произведения вейвлетов с одинаковыми масштабными коэффициентами не равны нулю. Вид АЧХ симметричных и антисимметричных вейвлетов не зависит от размера (длины) вейвлета. Можно сказать, что вейвлеты имеют идеальную АЧХ в пределах погрешности вычисления.

Если в критерии Пэли - Винера модуль

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|Ln|K(i\omega)|}{1 + \omega^2} d\omega < \infty$$

частотной передаточной функции не равен нулю, но меньше погрешности вычисления, то интеграл не расходится. В связи с этим, можно сказать, что сконструированные вейвлеты не противоречат критерию Пели – Винера. А

явление Гиббса не наблюдается. Объяснить это можно, если представить вейвлет конечной длины произведением вейвлета конечной длины на окно бесконечной длины. Тогда в частотной области будет свертка Фурье-образа вейвлета с дельта-функцией. Если Фурье-образом вейвлета является передаточная функция с прямоугольной АЧХ, то ее свертка с дельта-функцией не порождает явление Гиббса.

Сконструированные вейвлеты применялись для декомпозиции и реконструкции сигналов. Для количественного сравнения использовалась мера типа корреляции между реконструированным сигналом и оригинальным сигналом. Вычисленное значение коэффициента корреляции Пирсона сигнала и реконструированного сигнала равнялось 0,99999.

Для увеличения быстродействия разработаны алгоритмы непрерывного быстрого ВП с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), т.е. ВП производится в частотной области [1 - 4]. Разработанные алгоритмы позволили уменьшить время вычисления ВП на четыре порядка по сравнению с прямым численным интегрированием для вейвлетов на основе производных функции Гаусса при большой выборке. Вейвлеты с прямоугольной АЧХ позволили уменьшить время вычисления прямого ВП в частотной области в 2 раза по сравнению, когда использовались вейвлеты на основе производных функции Гаусса. Также такие вейвлеты позволили уменьшить время вычисления обратного ВП сигнала с размером выборки 32768 и 262144 отсчетов в 260 и 5000 раз соответственно по сравнению с алгоритмом с использованием БПФ. Конструирование симметричных и антисимметричных вейвлетов с прямоугольной АЧХ позволило обратное ВП вычислять во много раз быстрее, чем с использованием БПФ. Профилировка проводилась для процессора Celeron® с частотой 2,54 ГГц, ОЗУ 1 Гб.

### Список литературы

1. Семенов, В.И. Фильтрация изображений, полученных с помощью оптического микроскопа, с применением кратномасштабного анализа. / В.И. Семенов, К.Г. Михеев, А.К. Шурбин, Г.М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия. – Ижевск, 2014. – Т. 16. – №3. – С. 399-404.
2. Семенов, В.И. Конструирование ортогональных вейвлетов в частотной области для кратномасштабного анализа сигналов/ В.И. Семенов, А.К. Шурбин, К.Г. Михеев, Г.М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия – Ижевск, 2018. – Т. 20. – №2. – С. 230-238.
3. Семенов, В.И. Конструирование вейвлетов в частотной области/ В.И. Семенов, С.И. Чучкалов, О.В. Христофоров // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. Issue 7-2. – P. 26-29
4. Semenov V.I., Khristoforov O.V., Chuchkalov S.I. Calculating the standard deviation of the size of objects in an image. Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2017. – 62-64 p.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Т.М. Халилов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК С БОЛТОВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ В СИСТЕМЕ АРМ FEM КОМПАС 3Д**

**MODELING THE STRENGTH OF BEAMS WITH BOLTED CONNECTION  
IN THE АRM FEM КОMPAS 3D**

*Проведено моделирование нагрузки на болтовое соединение балок по следующим критериям: нагрузка сверху, нагрузка сбоку при воздействии распределенной силы. Расчет прочности производится с помощью метода конечных элементов в программе АRM FEM КОМПАС 3Д.*

*In this article, the load on a bolted connection of beams is modeled according to the following criteria: load from above, when a force is applied from the side. Strength calculation is performed using the finite element method.*

*Ключевые слова: моделирование нагрузки, болтовое соединение, метод конечных элементов.*

*Keywords: load simulation, bolted connection, finite element method.*

Вступление России в 2012 году в ВТО стимулирует развитие конкурентоспособности всех отраслей российской промышленности. Для сокращения затрат на строительство новых промышленных зданий требуется снижение материалоемкости строительных конструкций. Одним из путей решения этой задачи является оптимальное распределение материала по площадям поперечных сечений в соответствии с напряженно-деформированным состоянием элементов. Этому направлению отвечает применение тонколистовой стали для балок двутаврового сечения. Масса двутавровой балки снижается благодаря тому, что толщина стенки назначается из условия прочности, а местную устойчивость, в отличие от обычных сварных балок, разрешается не проверять исходя из следующих конструктивных особенностей. В связи с этим актуальной задачей повышения эффективности использования тонкостенных балок является оптимизация известных конструктивных решений с учетом характера распределения внутренних усилий от нагрузки [1]. Исходная модель строительной балки с болтовым соединением представлена на рис. 1.

Так же задаем свойства металла нашей модели согласно ГОСТ 26020-83 представленными на рис. 2.

Наиболее эффективным приближенным методом расчета прочности является метод конечных элементов (МКЭ) [2]. Аппроксимация производится тетраэдральными изопараметрическими элементами с линейным полем перемещений (деформации постоянные, грани плоские) и с параболическим

полем перемещений (деформации линейные, грани – полиномы второго порядка).

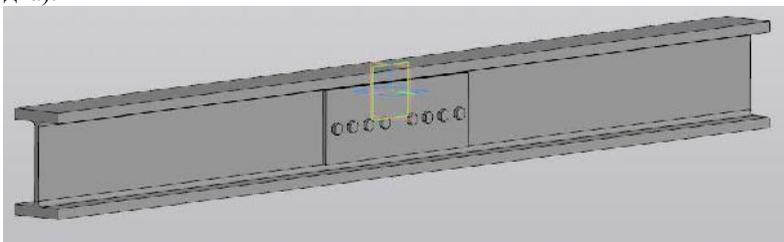


Рис. 1. Исходная модель балки

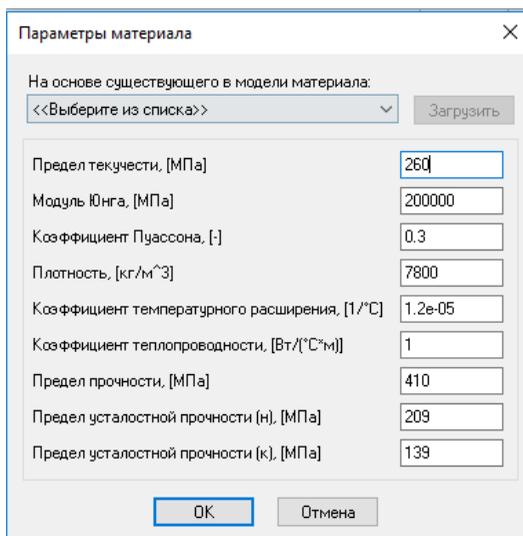


Рис. 2. Свойства металла модели

В табл. 1 представлены нагрузки, применённые к исходной модели балки с болтовым соединением:

Таблица 1. Описание нагрузок

Наименование	Внешние нагрузки	Параметры нагрузки
Статический №1	Распределенная сила	Величина: 14000 Н
Статический №2	Распределённая сила	Величина: 10000 Н

На рис. 3 представлены эквивалентные деформации статистического расчёта №1. Оценка жёсткости конструкции при нагрузке №1 осуществлялась при расчёте на всю верхнюю поверхность балки.

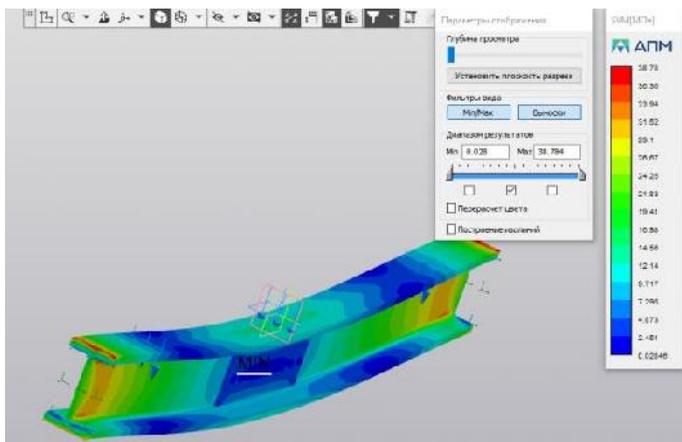


Рис.3. Эквивалентные деформации нагрузки №1.

На рис. 4 представлены эквивалентные деформации статистического расчёта №2.

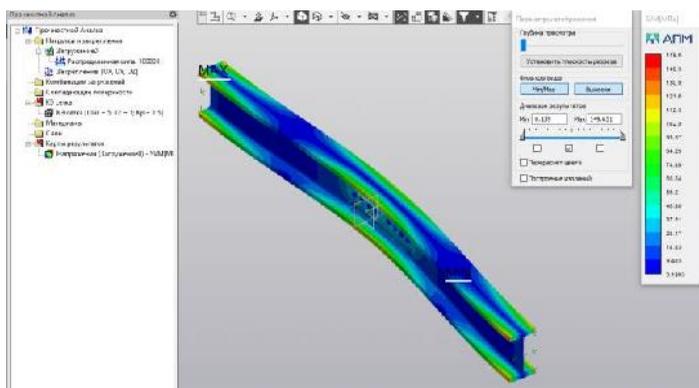


Рис.4. Эквивалентные деформации нагрузки №2.

Оценка жёсткости конструкции при нагрузке №2 осуществлялась при расчёте на всю боковую поверхность балки. Все нагрузки, использованные при расчете регламентированные стандартами ГОСТ, наглядно показали, что данное болтовое соединение устойчиво к распределенной силе, распределенной массе, следовательно, болтовое соединение достаточно прочное. Инерционные характеристики модели 1 и 2, представлены на рис. 5 и рис. 6.

Таким образом, выбранный метод МКЭ и инструмент для моделирования позволяют решить задачу анализа прочности болтового соединения при различных типах нагрузки. Аналогично, МКЭ позволяет эффективно решать и задачи связанные с электромагнитными полями, например электромагнитной совместимости [3, 4].

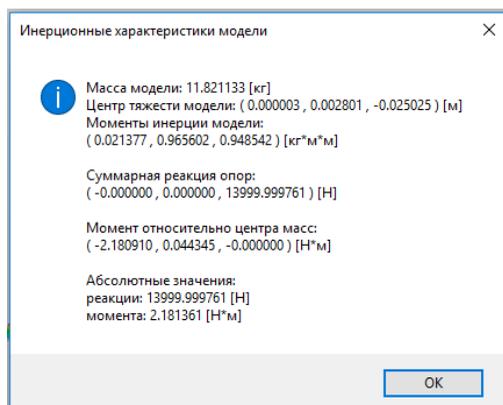


Рис. 5. Инерционные характеристики модели №1

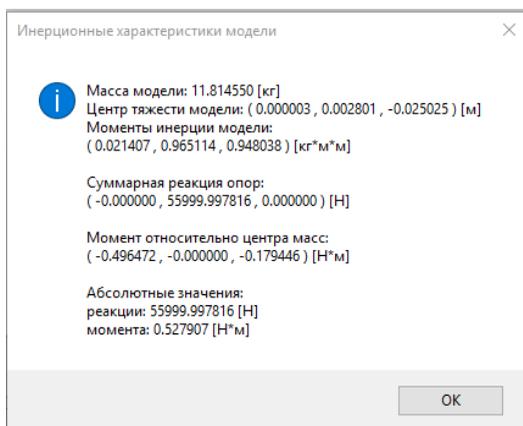


Рис. 6. Инерционные характеристики модели №2.

### Список литературы

1. *Серазутдинов, М.Н.* Справочные сведения по курсу «Сопротивление материалов / М.Н. Серазутдинов, К.А. Абдулхаков, В.М. Котляр, М.Н. Убайдуллоев. – Казань: Казан. гос. технол. ун-т; 2007. – 50 с.
2. Программа Компас 3Д АРМstudio. – Текст : электронный // Программа Компас 3Д АРМstudio: [официальный сайт]. – URL: [https://kompas.ru/source/info\\_materials/2018/APM\\_FEM\\_17.pdf](https://kompas.ru/source/info_materials/2018/APM_FEM_17.pdf) (дата обращения 11.09.2020).
3. *Гизатуллин, З.М.* Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №9. – С. 7.
4. *Гизатуллин, З.М.* Целостность информации в USB флэш-накопителе при воздействии импульсного магнитного поля / З.М. Гизатуллин, Ф.М. Фазулянов, Л.Н. Шувалов, Р.М. Гизатуллин // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №8. – С. 8.

*Материал поступил в редколлегию 05.10.20.*

Т.М. Халилов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева)

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА СИМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ**

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF CUTTING THE SHEET MATERIAL BY THE SIMPLEX METHOD**

*Выполнен раскрой листового материала по критерию: симплексного метода. Расчет раскроя производится с помощью симплексного метода.*

*In this article, the cutting of sheet material is made according to the criterion: the simplex method. The calculation of the cutting is carried out using the simplex method.*

*Ключевые слова: раскрой листового материала, симплекс метод.*

*Keywords: cutting sheet material, simplex method.*

Одной из главных задач промышленности является снижение затрат производства, в том числе и путем оптимального использования материалов и ресурсов. Во многих отраслях промышленности требуется раскрой материала. Дерево, пластик, металл, стекло и другие промышленные материалы поступают на производство в виде целых единиц (объектов): листы, рейки, доски, рулоны, мотки, полосы. Эти материалы необходимо раскраивать на части определенных размеров и форм, при этом значительная часть материала идет в отходы, которые не находят применения в производстве. Количество отходов составляет значительный процент, заметно влияющий на общий бюджет предприятий, ведь помимо прямых затрат на дорогостоящие материалы существуют и второстепенные, например, такие, как транспортировка, складирование и утилизация. На практике для решения задачи раскроя используются автоматизированные системы поддержки принятия решения [1, 2].

Рассмотрим завод по производству металлических конструкций. Для производства конструкций необходима нарезка листа металла на определенные размеры прямоугольной формы. Возникает необходимость в минимизации отходов с листов металла при минимальном количестве листового материала. Данная задача относится к классу задач линейного раскроя. Общая постановка формулируется следующим образом. Дан прямоугольный лист определенных размеров и  $n$  прямоугольных деталей, деталь вида  $j$  имеет индивидуальные размеры. Лист необходимо раскроить таким образом, чтобы было наименьшее число отходов с одного листа и было затрачено наименьшее число листов.

Задача оптимального раскроя материалов заключается в определении наиболее рационального способа раскроя имеющегося материала (бревна, стальные листы, кожа и т.д.), при котором будет изготовлено наибольшее количество готовых изделий в заданном ассортименте или будет достигнуто наименьшее количество отходов [3].

Пусть на обработку поступает  $a$  единиц сырьевого материала одного вида (например,  $a$  листов одной длины). Из него требуется изготовить комплекты, в каждый из которых входит  $n$  видов изделий в количестве, пропорциональном числам  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . Имеется  $m$  способов раскроя (обработки) данного материала, т.е. известны величины  $a_{ij}$  ( $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ ), определяющие количество единиц  $j$ -х изделий при  $i$ -м способе раскроя единицы сырьевого материала.

В таблице 1 определен план раскроя, обеспечивающий максимальное количество комплектов. Согласно условиям задачи имеем таблицу раскроя, где по вертикали идет способ раскроя, а по горизонтали вид изделия.

Таблица 1. Таблица раскроя

	1	i	n
1	$a_{11}$	$a_{1i}$	$a_{1n}$
i	$a_{i1}$	$a_{ij}$	$a_{in}$
m	$a_{m1}$	$a_{mj}$	$a_{mn}$

Пусть  $x_i$  – количество единиц сырьевого материала, раскраиваемого  $i$ -м вариантом ( $i = \overline{1, m}$ )

Тогда количество изделий 1-го вида равно:

$$a_{11} x_1 + \dots + a_{1i} x_i + \dots + a_{1m} x_m.$$

Принимая во внимание условие комплектности, имеем:

$$a_{11} x_1 + \dots + a_{1i} x_i + \dots + a_{1m} x_m = b_1 y,$$

где  $y$  – количество комплектов.

Аналогичные равенства можно записать и для всех остальных видов изделий, т.е. условие комплектности приводит к системе ограничений:

$$a_{11} x_1 + \dots + a_{1i} x_i + \dots + a_{1m} x_m = b_j y \quad (j = \overline{1, n}).$$

Очевидно,

$$x_1 + \dots + x_i + \dots + x_m \leq a$$

(на раскрой поступает  $a$  единиц сырьевого материала), а также

$$x_i \geq 0 \quad (i = \overline{1, m}).$$

Цель задачи – максимизировать количество комплектов:

$$Z = y \rightarrow \max.$$

Итак, приходим к математической модели задачи о раскрое представленной в формуле 1:

$$Z = y \rightarrow \max,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i = b_j y \quad (j = \overline{1, n}) \\ \sum_{i=1}^m x_i \leq a \end{array} \right.$$

$$x_i \geq 0 \quad (i = \overline{1, m}).$$

*Формула 1. Математическая модель задачи раскроя.*

Чтобы выразить целевую функцию через переменные  $x_1, \dots, x_m$ , достаточно воспользоваться любым из соотношений формулы 2:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij} x_i}{b_j} \quad (j = \overline{1, n})$$

*Формула 2. Целевая функция.*

Одним из решен задачи раскроя с максимальным количеством деталей является симплекс-метод. Симплекс метод - это метод последовательного перехода от одного базисного решения (вершины многогранника решений) системы ограничений задачи линейного программирования к другому базисному решению до тех пор, пока функция цели не примет оптимального значения (максимума или минимума)

Всякое неотрицательное решение системы ограничений называется допустимым решением.

Пусть имеется система  $m$  ограничений с  $n$  переменными ( $m < n$ ). Допустимым базисным решением является решение, содержащее  $m$  неотрицательных основных (базисных) переменных и  $n-m$  не основных (небазисных или свободных) переменных. Неосновные переменные в базисном решении равны нулю, основные же переменные, как правило отлично от нуля, то есть являются положительными числами. Любые  $m$  переменных системы  $m$  линейных уравнений с  $n$  переменными называются основными, если определить из коэффициентов при них отличен от нуля. Тогда остальные  $n-m$  переменные называются не основными (или свободными) [4, 5].

Требуется разработать оптимальный план раскроя стандартных листов стали, обеспечивая выход планового числа заготовок разного вида при минимальных суммарных отходах, если известно, что из партии листовой стали необходимо нарезать четыре вида различных заготовок в количестве  $b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 4$ ) штук. Лист стали стандартных размеров может быть раскроен четырьмя способами. Каждому возможному способу раскроя соответствует карта раскроя. Из карт раскроя известен выход заготовок в штуках разных видов  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, 4$ ), а также площадь отходов  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) при раскрое одного листа стали по  $j$ -му способу раскроя. Какое количество листов стали необходимо раскроить тем или иным способом, чтобы отходы были минимальными? В таблице 2 приведен план задачи

Таблица 2. План

Виды заготовок	План задание по количеству заготовок ( $b_i$ )	Выход заготовок (шт) разных видов из карт раскроя ( $a_{ij}$ )			
		1	2	3	4
1	240	1	4	0	1
2	200	1	0	4	0
3	120	1	0	0	3
4	140	1	1	0	3
Площадь отходов, $m^2$ ( $c_j$ )		1.4	0.1	2.1	0.1

Составим математическую модель задачи. Обозначим через  $x_j$  – количество исходного материала (листов стали), которые необходимо раскроить по одному из способов  $j$ . Ограничения в задаче должны соответствовать плановому выходу заготовок различных видов. Целевая функция сводится к нахождению минимума отходов при раскрое

$$F = 1,4 \cdot x_1 + 0,1 \cdot x_2 + 2,1 \cdot x_3 + 0,1 \cdot x_4 \rightarrow (\min) ..$$

Ограничения по выходу заготовок  $i$ -го вида по всем  $j$  способам раскроя:

$$\begin{aligned} x_1 + 4x_2 + x_4 &\geq 240 \\ x_1 + 4x_3 &\geq 200 \\ x_1 + 3x_4 &\geq 120 \\ x_1 + x_2 + 3x_4 &\geq 140 \\ x_1, x_2, x_3, x_4 &\geq 0 \end{aligned}$$

Симплекс-таблица с дельтами в табл. 3.

Таблица 3 Готовая симплекс таблица

C	$\frac{5}{7}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{21}{10}$	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	0
Базис	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	b
X <sub>5</sub>	$\frac{1}{6}$	1	0	0	$\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{12}$	0	50
X <sub>6</sub>	$\frac{1}{4}$	0	1	0	0	$\frac{1}{4}$	0	0	50
X <sub>7</sub>	$\frac{1}{3}$	0	0	1	0	0	$\frac{1}{3}$	0	40
X <sub>8</sub>	$\frac{1}{6}$	0	0	0	$\frac{1}{4}$	0	$\frac{11}{12}$	1	30
Δ	$\frac{33}{40}$	0	0	0	$\frac{1}{40}$	$\frac{21}{40}$	$\frac{1}{40}$	0	114

Проверяем план на оптимальность: положительные дельты отсутствуют, следовательно план оптимален (План оптимален, если в таблице отсутствуют положительные дельты.)

**Ответ:**  $x_1 = 0, x_2 = 50, x_3 = 50, x_4 = 40, F = 114$

Основным требованием при выборе способа раскроя листовой заготовки является создание оптимальной карты раскроя, позволяющей выполнить резку обрабатываемой детали с минимальным расходом материала и максимальным количеством деталей на ней.

Процесс раскроя фигурных заготовок заключается в анализе конструкторско-технических характеристик обрабатываемой детали, параметров раскроя и организационно-технических условий выполнения операции.

#### Список литературы

1. Аверченков, В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов / В. И. Аверченков, 2004. - 228 с.
2. Свами, М. Графы и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Мир, 1984. - 454 с.
3. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. - 430 с.
4. Хемди А. Таха. Симплекс-метод. Введение в исследование операций/ Хемди А. Таха. – 7-е изд. – М.: «Вильямс», 2007. - 95 с.
5. Акулич, И.Л. Задачи линейного программирования. Математическое программирование в примерах и задачах/ И.Л. Акулич — М.: Высшая школа, 1986. - 319 с.

Материал поступил в редколлегию 05.10.20.

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ»**

**MODELING AND IDENTIFICATION OF NONLINEAR  
DYNAMIC SYSTEMS AND PROCESSES**

DOI: 10.51932/9785907271739\_270

УДК 519.6

В.Г. Давыдов

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНО-НЕЛИНЕЙНОЙ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДМИТРИЕВА-КИСЛОВА  
С СЕЛЕКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ФОРМИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ**

**MODELING OF THE DISCRETE-NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM  
OF DMITRIEV-KISLOV WITH SELECTIVE REJECTION OF FORMED SIGNALS**

*Рассмотрено влияние величины нормированного шага интегрирования на эффективность селективного подавления сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева-Кислова.*

*The influence of the value of the normalized integration step on the efficiency of selective rejection of signals of the discrete-nonlinear Dmitriev-Kislov system is considered.*

*Ключевые слова: динамический хаос, селективное подавление.*

*Keywords: dynamic chaos, selective rejection.*

Широкополосные сигналы на основе динамического хаоса применяются в конфиденциальных системах передачи информации. В цифровых устройствах реализуются дискретные модели порождающих нелинейных систем. Актуальным является исследование селективного подавления с целью эффективной обработки сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева-Кислова.

Шаг интегрирования при численном решении системы уравнений влияет на характеристики формируемых сигналов. Формирование и обработка сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева-Кислова осуществляется в цифровом устройстве. Цель работы заключается в сокращении вычислительных затрат на формирование сигналов и реализацию селективного подавления. Задача исследования состоит в определении допустимого диапазона, в котором можно варьировать величину нормированного шага численного интегрирования, когда селективное подавление может быть эффективно произведено при заданных параметрах дискретной системы Дмитриева-Кислова.

В среде *Mathcad* получена модель дискретной системы Дмитриева-Кислова для генерирования исходных хаотических сигналов. Численное решение системы уравнений производится методом Эйлера при вариации

величины нормированного шага интегрирования. Применена модель белого шума, сформированного встроенной функцией *rnd*.

Производится селективное подавление сигнала в одном из каналов (канал *X*) в условиях действия шума и при вариации уровня шума. С целью повышения помехоустойчивости производится предварительная НЧ-фильтрация смеси входных сигналов с шумом. Для осуществления селективного подавления формируется опорный сигнал на основе интегральной оценки (1).

$$X_{oi} = \sum_{Np} dX_{oi} + Const. \quad (1)$$

Структурная схема системы селективного подавления сигналов показана на рис.1.

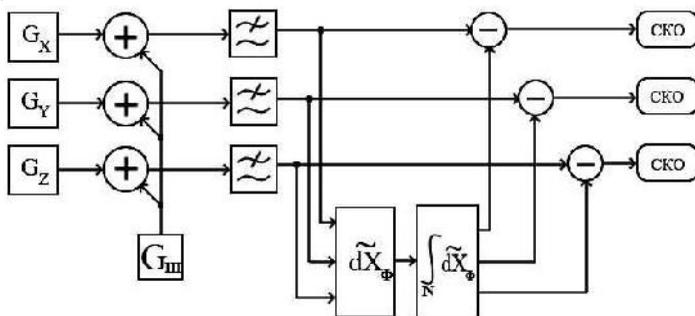


Рис. 1. Структурная схема устройства избирательного подавления при формировании опорного сигнала на стороне приёма

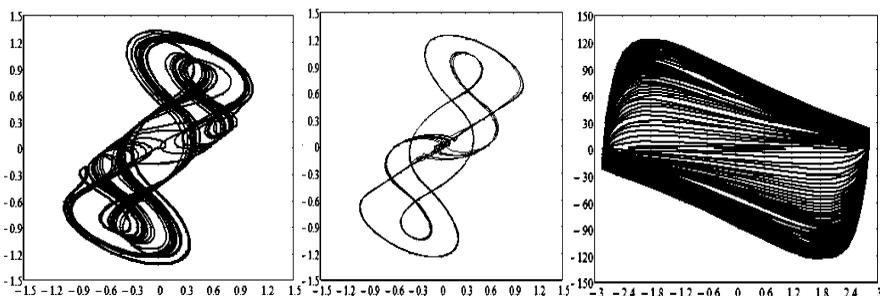


Рис.2. Фазовые портреты (X-Z) при нормированном шаге 0.08, 0.095 и 0.2

Результаты моделирования представлено в табл.1–3.

Табл.1. Нормированный шаг интегрирования – 0.001

Отношение сигнал/шум		0	-20	-40	-60	-80	-85
Подавление сигнала X	относительно Y, дБ	74,3	78.7	52.9	32.9	12.9	7.9
	относительно Z, дБ	74,6	79.1	53.3	33.2	13.2	8.3

Табл.2. Нормированный шаг интегрирования – 0.08

Отношение сигнал/шум		0	-20	-40	-60	-70
Подавление сигнала X	относительно Y, дБ	71.2	54.9	34.5	14.6	4.8
	относительно Z, дБ	70.7	54.4	34.0	14.1	4.3

Табл.3. Нормированный шаг интегрирования – 0.095

Отношение сигнал/шум		0	-20	-40	-60	-70
Подавление сигнала X	относительно Y, дБ	69.7	54.3	34.1	14.1	4.4
	относительно Z, дБ	69.0	53.5	33.4	13.4	3.8

Критерий осуществления подавления сигнала в канале установлен по превышению уровня отношения СКО в двух каналах в 10 дБ. Зависимости минимально допустимого уровня сигнала при вариации нормированного шага интегрирования приведены в табл.4.

Табл.4. Вариация шага интегрирования и минимальное отношение сигнал / шум

Нормированный шаг интегрирования	0.001	0.04	0.08	0.09	0.095
Мин. уровень сигнала	-80	-75	-60	-60	-60

Согласно данным табл.4 уменьшение величины нормированного шага интегрирования при численном решении системы уравнений, описывающих динамическую систему с заданными параметрами, снижает минимально допустимый уровень хаотического сигнала в канале.

При уменьшении шага с 0.09 до 0.001 требуемый уровень сигнала по отношению к уровню шума снижается на 20 дБ. При величине шага от 0.001 до 0.09 возможно осуществление селективного подавления сигналов дискретно-нелинейной системы, сформированных при численном решении системы методом Эйлера. Максимально допустимый нормированный шаг интегрирования составляет 0.09. При увеличении шага до 0.1 в спектре проявляются отдельные частотные компоненты, при шаге 0.2 происходит переход к многочастотному режиму системы. Использование при численном решении метода Рунге-Кутты 4-го порядка позволяет увеличить величину максимально допустимого шага интегрирования до 0.3 [1].

Установлено, что для экономии вычислительных ресурсов для численного решения системы уравнений может быть применён метод Эйлера. Величину нормированного шага интегрирования следует выбирать из диапазона от 0.001 до 0.09, при этом спектральные характеристики формируемых сигналов сохраняются, селективное подавление может быть произведено.

### Список литературы

1. Давыдов, В.Г. Влияние шумов на селективное режектирование сигналов динамической системы Дмитриева-Кислова с хаотической динамикой/ В.Г. Давыдов, В.В. Афанасьев // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: А43 материалы Всероссийской научно-технической конференции, 21 -23 апреля 2020 г /Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; под. ред. А.И. Данилина. – Самара: Вектор, 2020. – С.53– 55.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

А.В. Золотухин

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕХА**

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR ORGANIZING THE WORK OF A PRODUCTION WORKSHOP

*Рассматривается разработка информационной системы для автоматизации контроля качества продукции, выпускаемой на конвейере производственного цеха, приведено сравнение нейросетевых моделей анализа изображений и обучена модель анализа дефектов на изображениях изделий.*

*The article discusses the development of an information system for automating quality control of products manufactured on the conveyor belt of a production workshop, a comparison of neural network models for image analysis is given, and a model for analyzing defects in product images is trained.*

*Ключевые слова: информационная система, анализ изображений, нейронные сети.*

*Keywords: information system, image analysis, neural networks.*

В настоящее время здоровая рыночная конкуренция заставляет фирмы стремиться к оптимизации производственных процессов. На данный момент все производства хотят внедрить больше процессов автоматизации и качественное планирование производства, сборки и выпуска изделий. Однако, автоматизированное производство без человеческого контроля может привести к частому выпуску бракованной продукции. Средние потери прибыли компании от выпуска бракованных деталей с внешними или техническими повреждениями приводят к списания товара на сумму, составляющую более 2% от товарооборота.

А управление и обслуживание отдела по контролю качества в среднем требует от 100 до 200 человек рабочего персонала, каждый из которых за один рабочий день производит оценку качества не более 1200 наименований товаров. В то время как сеть из 15 камер, оснащённых модулями компьютерного зрения и анализа изображений, позволит оценивать качество товаров с большей скоростью, позволит увеличить скорость конвейера и уменьшить процент ошибок при оценке качества изделий на производстве.

Поэтому в современных производствах задача автоматизации процесса контроля качества выпускаемых изделий представляет собой важный прикладной раздел и позволяет решить задачи по управлению, автоматизации и оптимизации производства. Задача контроля качества в практическом плане представляет собой задачу распознавания дефектов на изделиях, выпускаемых производственным цехом. На сегодняшний день существует ряд методов

обработки и сегментации изображений, позволяющих распознать объекты на фото или видео. Для изучения данных методов требуется провести исследование методов компьютерного зрения по сегментации изображений, а также актуальных методов анализа изображений с помощью нейронных сетей и предиктивных алгоритмов.

На сегодняшний день существует 6 основных и наиболее популярных алгоритмов сегментации изображений: Метод выращивания регионов, метод нормальных разрезов, метод водораздела (WaterShed), метод сдвига среднего (MeanShift), метод наводнения (FloodFill) и метод среза (GrabCut).

Применительно к задаче выделения деталей на конвейере наиболее точно работает метод среза (GrabCut). Он выделяет изделие на конвейере, считая его за объект, а фон заливает черным. Затем сегментированные изображения попадают на вход алгоритма анализа изображений [1].

Задача анализа изображений является одной из самых сложных задач компьютерного зрения за счет своей нетривиальности и невозможности решения детерминированными полиномиальными алгоритмами. Для решения подобных сложно формализуемых задач активно используются методы машинного обучения и нейронных сетей.

В решении задач анализа изображений преуспели четыре вида нейронных сетей: многослойный перцептрон (MLP), рекуррентная нейронная сеть (RNN), сверточная нейронная сеть (CNN) и нейронная сеть обратной свертки (DNN) [2].

Для того, чтобы определить оптимальную модель нейронной сети для решения задачи анализа дефектов, было проведено сравнение методов анализа изображений. Сравнение проводилось по скорости и точности работы метода на задачах распознавания. Эксперименты по тестированию нейронных сетей проводились на ПК с процессором Intel Core i5-7200U, работающим на частоте 2,5 ГГц на SSD. Кроме того, использовался графический процессор NVIDIA GeForce 940M.

Была использована система обучения нейросетей DIGITS Dev 5 для создания наборов обучающих и проверочных выборок изображений. Для создания модели были протестированы несколько стандартных сетей: MLP-300 (MLP), LSTM (RNN), LeNet5 (CNN), ResUNet (DNN), на наборе данных chars74k20 для распознавания символов. Этот набор данных состоит из рукописных цифр и английских символов, т. е. содержит 62 класса объектов. Для экспериментов по сравнению этот набор данных был поделен на 34658 обучающих изображений, 12586 проверочных изображений (20%) и 15748 тестовых изображений (25%).

Для MLP сети была использована полносвязная модель со скрытым слоем из 300 нейронов. MLP обучается по алгоритму обратного распространения ошибки. Сеть LSTM представляет собой стандартную рекуррентную нейронную сеть модификацией долгой краткосрочной памяти. Для сети CNN использовалась стандартная модификация LeNet5 с ядром свертки 5x5 и ядром

субдискретизации 2x2. Сеть ResUNet структурно представляет собой комбинацию CNN и RNN с чередованием сверточных и полносвязных слоев.

В таблице 1 показана производительность обучения и классификации MLP, LSTM, LeNet5 и ResUNet на наборе данных chars74k. По данным тестов можно видеть, что CNN, RNN и DNN превосходят MLP в примерно 1,35 раза по точности обучения и в 2 раза по точности классификации. Среди нейронных сетей можно выделить лидерование ResUNet.

*Таблица 1. Сравнение точности обучения нейросетей*

Нейросеть	Точность обучения (%)	Точность классификации (%)
MLP-300 (MLP)	70.72	43.4
LSTM (RNN)	88	88.39
LeNet5 (CNN)	86.23	85.53
ResUNet (DNN)	89.90	90.56

Также была проведена оценка времени обучения и классификации на GPU на наборе данных chars74k. Табл. 2 показывает общее время обработки для обучения и классификации всех символов набора данных с использованием размера батча в 64 символа.

*Таблица 2. Сравнение времени обучения нейросетей*

Нейросеть	Обучение (с.)	Классиф. (с.)	Класс. 1-ого симв. (мс.)
LSTM (RNN)	120	10	0.635
LeNet5 (CNN)	100	10	0.635
ResUNet (DNN)	556	19	1.2

Можно заметить, что ResUNet несмотря на более высокую точность проигрывает в скорости LSTM и LeNet5. Это связано с тем, что модель ResUNet обрабатывает изображения  $60 \times 60$ , а LSTM и LeNet5 обрабатывают соответственно изображения  $28 \times 28$  и  $32 \times 32$ .

На основании полученных результатов было принято решение для решения задачи анализа дефектов использовать глубокую нейронную сеть (DNN) модели ResUNet.

Для программной реализации выбранных алгоритмов сегментации и распознавания была спроектирована и обучена сверточная нейронная сеть, написанная на языке Python версии 3.7. Разработанная нейронная сеть решает задачу анализа изображений на наличие дефектов.

На вход нейронной сети поступают изображения поверхности металла размером 250 на 1600 пикселей, на которых может присутствовать 4 вида дефектов, в разных количествах и комбинациях. Тренировочная выборка состоит из 12600 изображений, тестовая из 5000. В тренировочной выборке только 6700 изображений имеют различные дефекты, остальные 5900 дефектов не имеют. Таким образом на входной слой нейронной сети поступает трехканальное изображение  $250 \times 1600$ : 4500000 параметров. На выходном слое – 5 однозначно определяемых классов.

Максимальное количество эпох (циклов) обучения было установлено на 25. Однако, минимизация целевой функции достигла своего предела на 18 эпохе, завершив обучение нейронной сети. Точность предсказания нейросети

на 18 эпохе на обучающей и валидационной выборках была соответственно равна 0.7985 и 0.7505, график роста точности представлен на рис. 1.

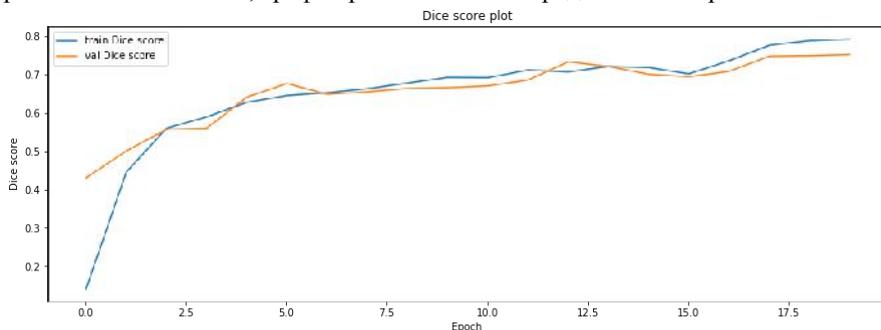


Рис. 1. График роста точности предсказания нейронной сети  
На рисунках 2 и 3 представлен результат классификации дефектов.

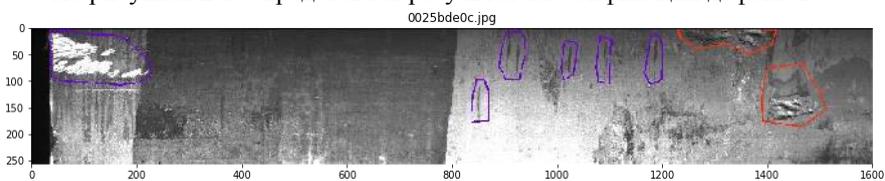


Рис. 2. Изображение смешанного класса «Дефекты 3 и 4 типов»

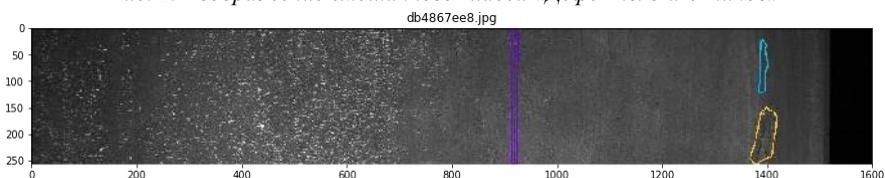


Рис. 3. Изображение смешанного класса «Дефекты 1, 2 и 3 типов»

Результат работы разработанного ПО демонстрирует высокую точность определения дефектов на изделиях, тем самым автоматизирует процесс контроля качества продукции на конвейерных лентах производственного цеха. Выполняется основная цель разработки информационной системы: Повышение производительности работы промышленного цеха за счет автоматизации контроля качества продукции.

### Список литературы

1. Zhang Yong, Yuan Jiazheng, LiuHongzhe, Li Qing. GrabCut image segmentation algorithm based on structure tensor // The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications – 2017. – v. 24-2, pp. 38-47.
2. Marius-Constantin Popescu, Valentina E. Balas, Liliana Perescu-Popescu, Nikos Mastorakis. Multilayer Perceptron and Neural Networks // WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS – Issue 7, Volume 8, July 2009 – pp. 579-588.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

А.П. Корнеев

(Республика Беларусь, г. Могилев, Белорусско-Российский университет)

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ  
ПАРАМЕТРАМИ В СРЕДЕ MATLAB**

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMECHANICAL  
SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN MATLAB**

*Представлена математическая модель электромеханической системы с распределенными параметрами в среде моделирования MATLAB с применением элементов библиотеки Power System Blockset. Для моделирования использован способ замены непосредственных вычислений резонансных частот интерполяцией значений. Разработаны и представлена модель вычислителя, общая модель передаточной функции от усилия на валу двигателя к скорости перемещаемой массы, модель тиристорного преобразователя, реализованная при помощи моделей тиристорных для получения данных о напряжении и токе.*

*A mathematical model of an electromechanical system with distributed parameters in the MATLAB modeling environment using elements of the Power System Blockset library is presented. For modeling, a method was used to replace direct calculations of resonant frequencies by interpolating values. A computer model was developed and presented, a general model of the transfer function from the force on the motor shaft to the speed of the moving mass, a thyristor converter model implemented using thyristor models to obtain voltage and current data.*

*Ключевые слова: математическая модель, система с распределенными параметрами, MATLAB, резонанс, тиристорный преобразователь.*

*Keywords: mathematical model, system with distributed parameters, MATLAB, resonance, thyristor converter.*

Многочисленные объекты различных областей техники представляют собой системы с распределенными параметрами (СРП). К ним относятся длинные линии электропередач, трубопроводы для перекачки воды и нефти, объекты, включающие длинные стержни (как, например, в бурении — колонна труб, в глубинно-насосных установках — штанга, в подъемных механизмах — трос и канат) и т. д. Недостаточно точное математическое описание такого оборудования приводит к большим погрешностям при анализе и синтезе систем управления, к уменьшению точности их работы, а в наиболее неблагоприятных случаях — к потере устойчивости электропривода и возникновению незатухающих колебаний, а в наиболее неблагоприятных случаях к разрушению установки [1, 2].

Моделирование СРП в общем виде во временной области затруднительно,

так как передаточная функция СРП содержат гиперболические функции, а существующие математические программы используют численный расчет. Эта проблема решается при аппроксимации передаточной функции любым известным способом. Но при работе СРП постоянно меняются собственные резонансные частоты. Вследствие этого, необходимо постоянно рассчитывать не только резонансные частоты, но выполнять другие вспомогательные вычисления в зависимости от метода аппроксимации, например вычеты. Расчет на каждом шаге моделирования приведет к резкому увеличению мощности ПК при увеличении времени моделирования [3].

Для решения этой проблемы разработан способ аппроксимации СРП при разложении на произведения  $(p^2 + \omega^2)$  подробно описанный в [4]. При такой аппроксимации не требуются дополнительные вспомогательные вычисления, что значительно упрощает и ускоряет процесс моделирования СРП. Для еще большего упрощения и ускорения процесса моделирования СРП использован способ замены непосредственных вычислений резонансных частот интерполяцией значений, рассчитанных в некоторых промежуточных точках. Метод интерполяции – сплайном. Данный метод является достаточно простым и точным для инженерных расчетов.

Для выполнения этих вычислений разработаны модели вычислителя резонансных частот. Теоретическое обоснование вычислителя представлено в [5]. Модель вычислителя представлен ниже.

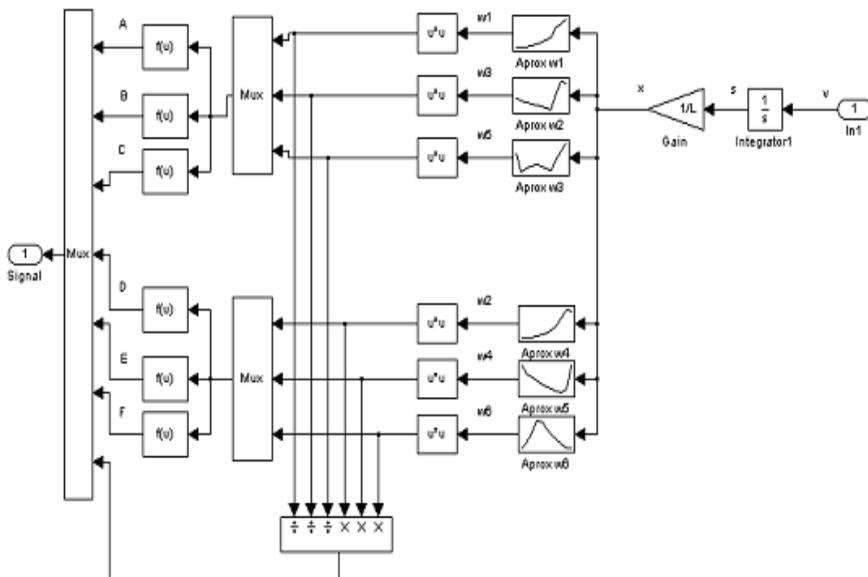


Рис.1 Модель вычислителя резонансных частот

На рис. 2 представлена общая модель передаточной функции от усилия на валу двигателя к скорости перемещаемой массы.

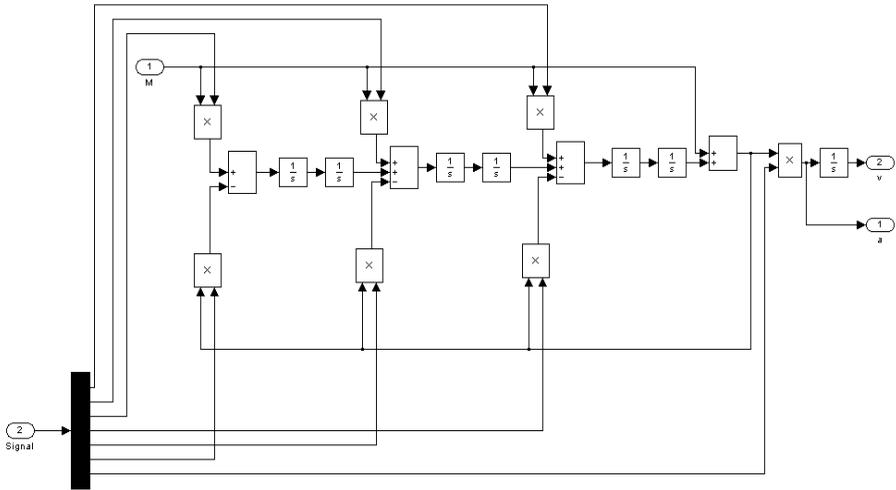


Рис.2 Модель вычисления скорости от усилия на валу двигателя

На рис. 3 представлена модель тиристорного преобразователя, реализованная при помощи моделей тиристоров для получения данных о напряжении и токе.

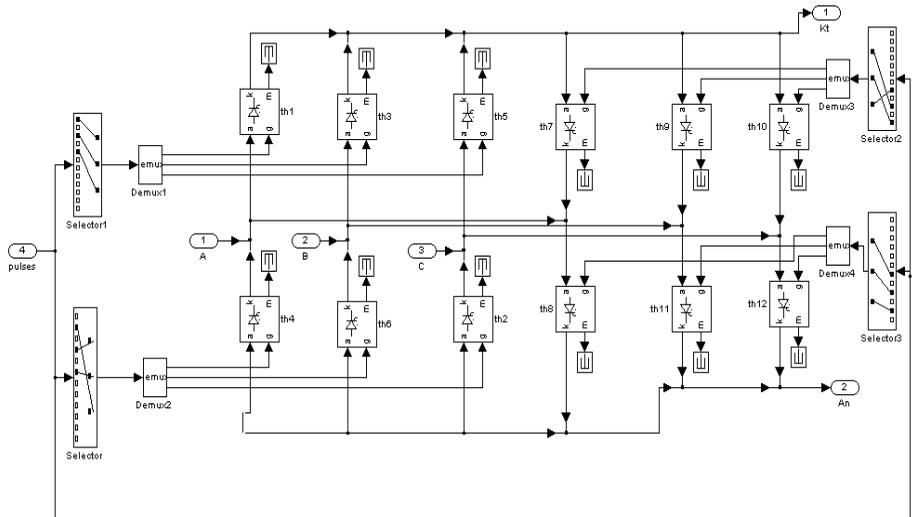


Рис.3 Модель тиристорного преобразователя

На основании полученных моделей механической и электрической части СРП построена полная математическая модель ЭМС СРП.

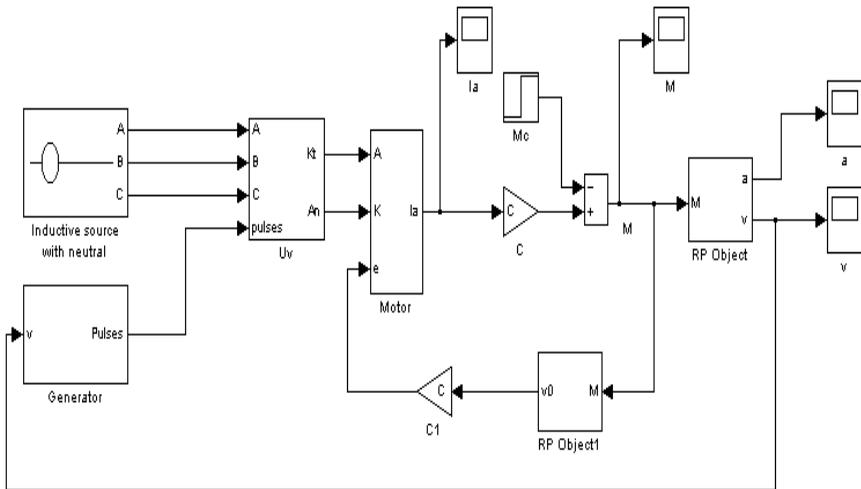


Рис.4 Модель ЭМС СРП с учетом изменения парциальных параметров

Разработанная математическая модель может применяться для расчета и исследования как частотных, так и энергетических характеристик. Данная математическая модель ЭМС СРП разработана в пакете MATLAB/Simulink с применением элементов библиотеки Power System Blockset.

#### Список литературы

1. *Киселев, Н.В.* Электроприводы с распределенными параметрами / Н.В. Киселев, В.Н. Мядель, Л.Н. Рассудов. – Л.: Судостроение, 1985. – 220 с.
2. *Рассудов, Л.Н.* Расчет электроприводов с распределенными параметрами с помощью цепных дробей / Л.Н. Рассудов, В.Н. Мядель // Системы управления технологическими процессами: Кн.– Новочеркасск, 1981.– С. 108-116.
3. *Karneyev, A.P.* Development of a stand for research of systems with the distributed parameters / A.P. Karneyev, G.S. Lenevsky // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 41' 2011 (32-35).
4. *Корнеев, А.П.* Новый способ аппроксимации механической части нестационарной электромеханической системы с распределенными параметрами // Наука настоящего и будущего: Сборник материалов конференции V научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург. 17-18 марта 2017 г. // СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – Санкт-Петербург, 2017 – С. 168–170.
5. *Толочко, О.И.* Анализ та синтез електромеханічних систем зі спостерегачами стану. – Донецк: Норд-Пресс, 2004.– 298 с.

Материал поступил в редколлегию 15.09.20.

А.П. Корнеев

(Республика Беларусь, г. Могилев, Белорусско-Российский университет)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ  
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SYSTEM  
WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN THE FREQUENCY DOMAIN

*Представлено экспериментальное исследование системы с распределенными параметрами в частотной области. Приведено описание программно-аппаратного комплекса и комплекта измерительных устройств экспериментального стенда. Максимальная относительная погрешность экспериментальных значений относительно теоретических расчетов не превысила 10%.*

*An experimental study of a system with distributed parameters in the frequency domain is presented. A description of the software-hardware complex and a set of measuring devices of the experimental stand is given. The maximum relative error of the experimental values relative to theoretical calculations did not exceed 10%.*

*Ключевые слова: экспериментальное исследование, система с распределенными параметрами, программно-аппаратный комплекс.*

*Keywords: experimental research, distributed parameter system, hardware and software complex.*

Многочисленные объекты различных областей техники представляют собой системы с распределенными параметрами (СРП). К ним относятся длинные линии электропередач, трубопроводы для перекачки воды и нефти, объекты, включающие длинные стержни (как, например, в бурении — колонна труб, в глубинно-насосных установках — штанга, в подъемных механизмах — трос и канат) и т. д. Недостаточно точное математическое описание такого оборудования приводит к большим погрешностям при анализе и синтезе систем управления, к уменьшению точности их работы, а в наиболее неблагоприятных случаях — к потере устойчивости электропривода и возникновению незатухающих колебаний, а в наиболее неблагоприятных случаях к разрушению установки [1, 2].

Для исследования электромеханических характеристик СРП экспериментальный стенд снабжен комплектом измерительных устройств. Система измерения обеспечивает измерение и сохранение данных:

- напряжений в диапазоне от -400В до +400В с точностью не менее 0.1%;
- тока якоря двигателя в диапазоне от -10А до +10А с точностью не менее 0.1%;
- напряжения, снимаемого с тахогенератора в диапазоне от 0В до +2,5В.

Для упрощения дальнейшей обработки полученной информации существует связь системы измерения с персональным компьютером и возможность сохранения получаемых данных.

Для получения заданной точности измерения в цифровой системе сбора данных необходимо наличие в ней аналогово-цифровых преобразователей с количеством цифровых разрядов не менее 10.

Частота дискретизации в соответствии с дискретной теоремой Найквиста должна быть не менее чем в два раза больше частоты самого быстро изменяющегося сигнала – (отношение частоты дискретизации к частоте среза системы для возможности воспроизведения сигнал должно быть не менее двух) [3]. Так как частота питающего напряжения, а соответственно и тока равна 50 Гц, частота дискретизации должна быть не менее 100 Гц.

Для получения информации о токе двигателя используется программно-аппаратный комплекс. Аппаратная часть представлена сенсорным модулем, который может использоваться для измерения высоковольтных аналоговых сигналов, а также для мониторинга процессов в силовых электрических цепях. Устройство имеет четыре гальванически развязанных аналоговых входа для измерения высоковольтного напряжения (диапазон входных напряжений от +600 В до -600 В), а также один аналоговый вход для измерения низковольтных напряжений, снимаемых с шунта (диапазон входных напряжений на измерительном шунте от +150 мВ до -150 мВ). Разрядность аналогово-цифровых преобразователей по всем каналам равна 12. Элементом, ведущим обработку информации в составе модуля, является микроконтроллер Fujitsu MB90F543. Для разработки управляющих программ используется среда программирования Softune Workbench for FR-microcontroller. Программирование контроллера осуществляется при помощи комплекта программ StrimShell - StrimServer ОДО «СТРИМ». Разработанная управляющая программа позволяет производить измерения по четырем каналам напряжения с частотой до 4 кГц. Данные преобразования формируются CAN-фреймом, которые в последствии передается по CAN-шине. Далее они преобразуются CAN-USB конвертером и перенаправляются в персональный компьютер, где в последующем может производиться их дальнейшая обработка.

Программная часть комплекса основана на комплекте программ StrimServer и CANMonitor, позволяющих фиксировать и сохранять информацию, полученную от сенсорного модуля в режиме реального времени.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, описанном в [4]. Полученные данные сводим в табл. 1 и 2.

*Таблица 1. Экспериментальные значения ЛАЧХ СРП*

Частота круговая, рад/с	0,1	0,3	0,5	0,6	0,65	0,7
Кoeffициент усиления, dB	1	-6,1	-3,8	6,3	11,1	-1,5
Частота круговая, рад/с	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5
Кoeffициент усиления, dB	-10,6	-18,4	-18,7	10,5	-26,5	-38,3
Частота круговая, рад/с	1,6	1,7	1,8	1,85	1,9	2,0
Кoeffициент усиления, dB	-48,5	-60,5	-82,7	-156,6	-81,2	-63,6

На рис. 1 представлены теоретические (тонкой линией) и экспериментальные (толстой линией) ЛАЧХ СРП.

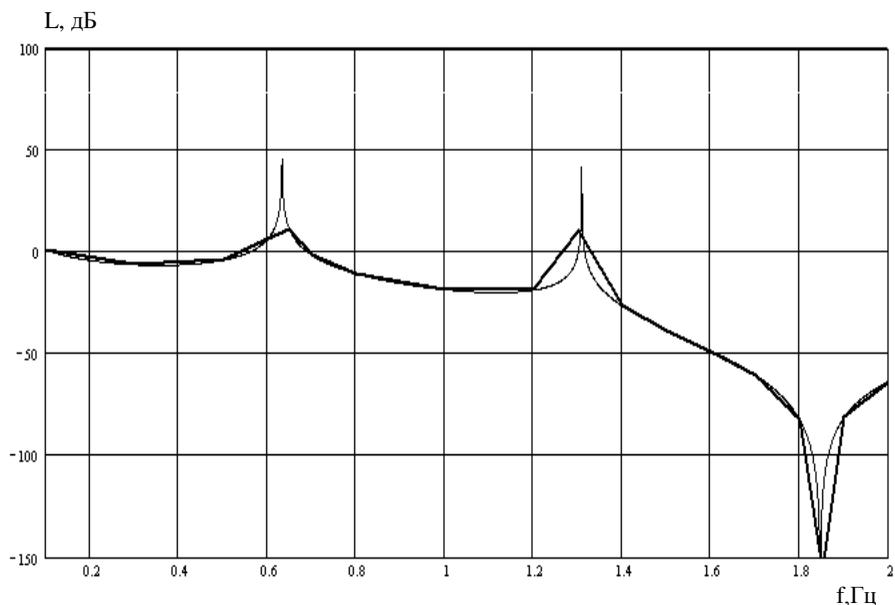


Рис.1. Теоретическая и экспериментальная ЛАЧХ СРП

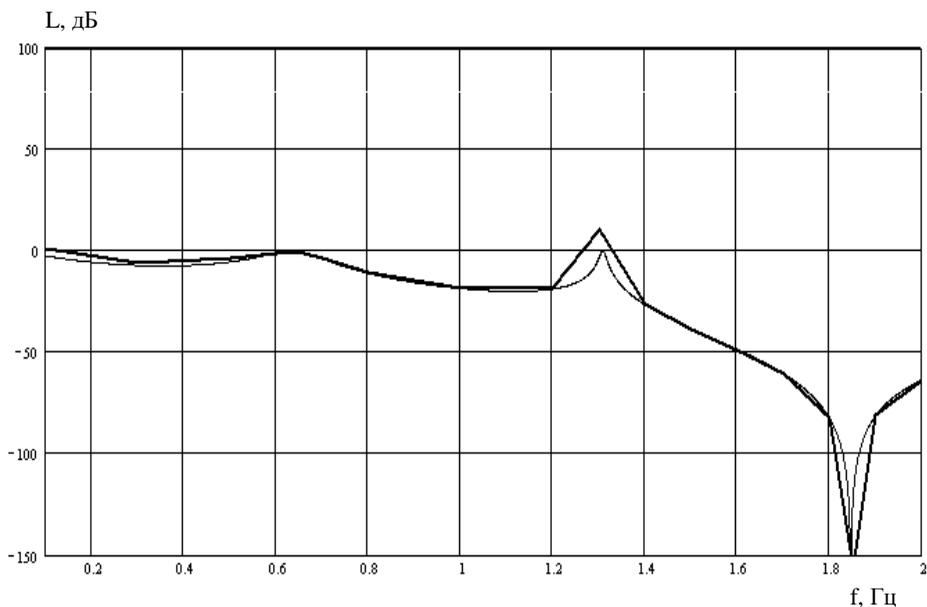
Далее проводились экспериментальные исследования для проверки разработанной методики синтеза системы управления ЭМС СРП, рассмотренной в [5].

Полученные данные сводим в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные значения ЛАЧХ СРП

Частота круговая, рад/с	0,1	0,3	0,5	0,6	0,65	0,7
Коэффициент усиления, dB	1	-6,1	-3,8	-0,9	-0,3	-3,8
Частота круговая, рад/с	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5
Коэффициент усиления, dB	-10,6	-18,4	-18,7	10,5	-26,5	-38,3
Частота круговая, рад/с	1,6	1,7	1,8	1,85	1,9	2,0
Коэффициент усиления, dB	-48,5	-60,5	-82,7	-156,6	-81,2	-63,6

На рис.2 представлены теоретические (тонкой линией) и экспериментальные (толстой линией) ЛАЧХ СРП с обратной связью, снимаемой с точки  $\xi$ .



*Рис.2 Теоретическая и экспериментальная ЛАЧХ СРП с обратной связью*

Как видно из графиков экспериментальные значения подтвердили правильность теоретических расчетов. Максимальная относительная погрешность не превысила 10%.

#### Список литературы

1. *Киселев, Н.В.* Электроприводы с распределенными параметрами / Н.В. Киселев, В.Н. Мядель, Л.Н. Рассудов. – Л.: Судостроение, 1985. – 220 с.
2. *Рассудов, Л.Н.* Расчет электроприводов с распределенными параметрами с помощью цепных дробей / Л.Н. Рассудов, В.Н. Мядель // Системы управления технологическими процессами: Кн.– Новочеркасск, 1981.– С. 108-116.
3. *Анхимюк, В.Л.* Теория автоматического управления / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко, Н.Н. Михеев. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
4. *Karneyev, A.P.* Development of a stand for research of systems with the distributed parameters / A.P. Karneyev, G.S. Lenevsky // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 41' 2011 (32-35).
5. *Кабушева, В.В.* Синтез системы управления электромеханической системы с распределенными параметрами/ В.В. Кабушева, А.П. Корнеев, Г.С. Ленеvский // Информационные технологии, энергетика и экономика: Материалы докладов XIII межрегиональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов в 4-х т., Смоленск. 14-15 апреля 2016 г. // филиал «МЭИ (ТУ)». – Смоленск, 2016. – Т.1.– С. 307–310.

*Материал поступил в редколлегию 15.09.20.*

Г.В. Малинин, Л.С. Севриков

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### SIMULATION OF A RESONANT DC-DC VOLTAGE CONVERTER

*Рассмотрены методы математического моделирования резонансного преобразователя постоянного напряжения как нелинейной системы. Показаны достоинства и недостатки методов моделирования.*

*Methods of mathematical modeling of a resonant DC-DC voltage converter as a nonlinear system are considered. The advantages and disadvantages of modeling methods are shown.*

*Ключевые слова: резонансный преобразователь постоянного напряжения, векторно-матричные уравнения, метод разделения движений, метод припасовывания.*

*Keywords: resonant DC-DC converter, vector-matrix equations, motion separation method, fitting method.*

Наиболее целесообразным методом расчета процессов в резонансных преобразователях постоянного напряжения (ППН) является метод припасовывания. Он сводится к решению систем линейных дифференциальных уравнений на интервалах времени линейности ППН и может быть использован как при ШИМ, так и при ЧИМ регулировании. Для упрощения математического описания в резонансных ППН метод припасовывания может использоваться в сочетании с методом разделения процессов на быстрые (в  $LC$ -контуре) и медленные (в выходной цепи). Тогда при расчете процессов в  $LC$ -контуре, который можно выполнять отдельно от выходной цепи, выходное напряжение ППН считается постоянным за полпериода колебаний инвертора  $T_{\text{п}}=T/2$ , изменение выходного напряжения рассчитывается методом усреднения, его пульсации не учитываются. Уравнения  $LC$ -контра могут решаться векторно-матричным, классическим и операторным методами. Далее методы расчета рассматриваются применительно к резонансному ППН типа  $LLC$  [1, 2]. Полученные соотношения будут справедливы и для ППН с простым последовательным  $LC$ -контуром, если в них принять индуктивность намагничивания, равной бесконечности.

На рис. 1 представлена схема силовой части ППН типа  $LLC$ . С учетом  $T$ -образной линейной эквивалентной схемы трансформатора схема замещения колебательного  $LC$ -контра представляется в виде, указанном на рис. 2, а, где  $u_{\text{н}}$  – напряжение на выходе инверторного моста,  $u'_2$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, приведенное к первичной обмотке,  $L_1=L_{\text{к}}+L_{\text{с1}}$ ,  $L_{\text{к}}$  – индуктивность внешнего дросселя,  $L_{\text{с1}}$ ,  $L'_{\text{с2}}$  – индуктивность рассеяния

первичной обмотки трансформатора и приведенная к первичной обмотке индуктивность рассеяния вторичной обмотки;  $r_1, r_2'$  - активные сопротивления цепи первичной обмотки трансформатора и приведенное к первичной обмотке активное сопротивление цепи вторичной обмотки. В преобразователях типа *LLC* индуктивность намагничивания трансформатора  $L_\mu$  обычно соизмерима с индуктивностью рассеяния  $L_s = L_{s1} + L'_{s2}$  ( $L_\mu \approx 10L_s$ ).

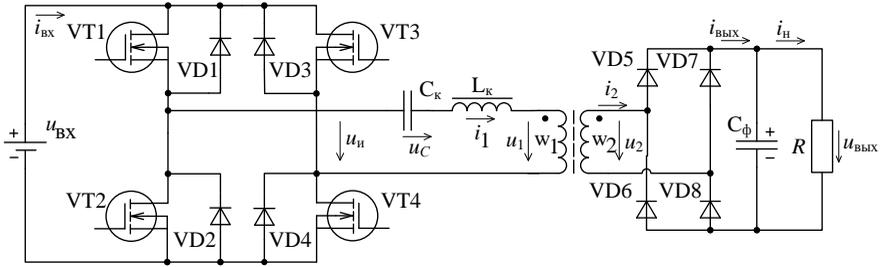


Рис. 1. Силовая часть резонансного преобразователя постоянного напряжения *LLC* типа

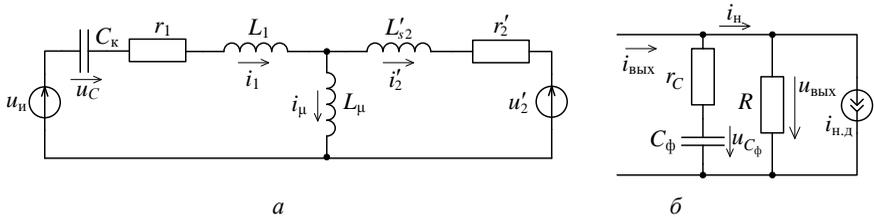


Рис. 2. Эквивалентные схемы: а - для колебательного *LC*-контура; б - для выходной цепи ППП

*Векторно-матричный метод.*

Для схемы на рис. 1, б справедливы следующие уравнения

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 + u_C + L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} + r_2 i'_2 &= u_\mu - u'_2, \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} - L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} - r_2 i'_2 &= u'_2, \\ C_\kappa \frac{du_C}{dt} &= i_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Принимая за переменные состояния *LC*-контура токи  $i_1, i'_2$  и напряжение  $u_C$ , исключим ток намагничивания  $i_\mu = i_1 - i'_2$  из второго уравнения (1). Тогда из уравнений (1) получим уравнения

$$\frac{di_1}{dt} = -(1 + \lambda_2) \frac{r_1}{L_1} i_1 - \frac{r_2'}{L_1^*} i'_2 - \frac{1 + \lambda_2}{L_1^*} u_C + \frac{1 + \lambda_2}{L_1^*} u_\mu - \frac{1}{L_1^*} u'_2, \quad (2)$$

$$\frac{di_2'}{dt} = -\frac{r_1}{L_1^*} i_1' - \frac{(1+\lambda_1)r_2'}{L_1^*} i_2' - \frac{1}{L_1^*} u_C + \frac{1}{L_1^*} u_{и} - \frac{1+\lambda_1}{L_1^*} u_2', \quad (3)$$

где введены обозначения

$$\lambda_1=L_1/L_{и}, \lambda_2=L'_{s2}/L_{и}, L_1^* = L_1(1+\lambda_2+\lambda_2/\lambda_1).$$

Систему, состоящую из (2), (3) и третьего уравнения (1), можно записать в векторно-матричной форме

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bv}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния LC-контура,  $\mathbf{v}$  – вектор внешних воздействий;

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} i_1' \\ i_2' \\ u_C \end{pmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{pmatrix} u_{и} \\ u_2' \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{(1+\lambda_2)r_1}{L_1^*} & -\frac{r_2'}{L_1^*} & -\frac{1+\lambda_2}{L_1^*} \\ -\frac{r_1}{L_1^*} & -\frac{(1+\lambda_1)r_2'}{L_1^*} & -\frac{1}{L_1^*} \\ \frac{1}{C_K} & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1+\lambda_2}{L_1^*} & -\frac{1}{L_1^*} \\ \frac{1}{L_1^*} & -\frac{1+\lambda_1}{L_1^*} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В схеме на рис. 2, а  $u_{и}=u_{вх}$  при открытых транзисторах VT1, VT4 (или при открытых диодах VD1, VD4) и  $u_{и}=-u_{вх}$  при открытых транзисторах VT2, VT3 (или при открытых диодах VD2, VD3).

$$u_2' = \begin{cases} u_{\text{вых.ср}}/n_{\text{тр}} & \text{при } i_2' > 0, \\ -u_{\text{вых.ср}}/n_{\text{тр}} & \text{при } i_2' < 0, \end{cases}$$

где  $u'_{\text{вых}} = u_{\text{вых}}/n_{\text{тр}}$  – среднее значение выходного напряжения, приведенное к первичной обмотке трансформатора;  $n_{\text{тр}}=w_2/w_1$  – коэффициент трансформации трансформатора. Процессы в выходной цепи, а именно, определение  $u_{\text{вых.ср}}$ , рассматриваются отдельно [1, 2].

На интервалах времени постоянства вектора внешних воздействий ( $\mathbf{v}=\text{const}$ ) решение уравнения (4) можно представить в виде

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} [\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}(\infty)] + \mathbf{x}(\infty), \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}(0)$  – начальное значение вектора  $\mathbf{x}(t)$  для рассматриваемого интервала времени;  $\mathbf{x}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t)$  – асимптотическое значение вектора  $\mathbf{x}(t)$ , элементы

которого можно найти непосредственно из рис. 2, а. Фундаментальная (переходная) матрица  $\Phi(t) = e^{\mathbf{A}t} = L^{-1}[(p\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}]$  определяется через обратное преобразование Лапласа.

Достоинством рассмотренного метода математического моделирования является компактность представления математической модели с одновременной простотой ее реализации, например, средствами MatLab.

### Операторный метод.

Этот метод основан на преобразовании по Лапласу уравнений (2), (3) и третьего уравнения системы (1). После преобразований имеем

$$pI_1(p) - i_1(0) = -(1 + \lambda_2) \frac{r_1}{L_1^*} I_1(p) - \frac{r_2'}{L_1^*} I_2'(p) - \frac{1 + \lambda_2}{L_1^*} U_C(p) + \frac{1 + \lambda_2}{L_1^*} U_u(p) - \frac{U_2'(p)}{L_1^*},$$

$$pI_2'(p) - i_2'(0) = -\frac{r_1}{L_1^*} I_1(p) - \frac{(1 + \lambda_1)r_2'}{L_1^*} I_2'(p) - \frac{U_C(p)}{L_1^*} + \frac{U_u(p)}{L_1^*} - \frac{1 + \lambda_1}{L_1^*} U_2'(p),$$

$$pU_C(p) - u_C(0) = \frac{I_1(p)}{C_k} \quad \text{или} \quad U_C(p) = \frac{I_1(p)}{pC_k} + \frac{u_C(0)}{p}.$$

Другой вариант операторного метода расчета, изучаемый в теории электрических цепей, основан на составлении операторных уравнений непосредственно по схеме замещения рис. 2, а. При этом операторное падение напряжения на индуктивности определяется выражением

$$U_L(p) = L[pI_L(p) - i_L(0)], \quad \text{а на емкости} - \text{выражением} \quad U_C(p) = \frac{I_C(p)}{Cp} + \frac{u_C(0)}{p}.$$

Тогда для схемы на рис. 2, а вместо уравнений (1) с учетом равенства  $i_u = i_1 - i_2'$  сразу можно записать

$$L_1 [pI_1(p) - i_1(0)] + r_1 I_1(p) + \frac{1}{p} \left[ \frac{1}{C_k} I_1(p) + u_C(0) \right] +$$

$$+ L_{s2}' [pI_2'(p) - i_2'(0)] + r_2' I_2'(p) = U_u(p) - U_2'(p),$$

$$L_u \{ p [I_1(p) - I_2'(p)] - i_1(0) + i_2'(0) \} - L_{s2}' [pI_2'(p) - i_2'(0)] - r_2' I_2'(p) = U_2'(p),$$

$$C_k [pU_C(p) - u_C(0)] = I_1(p).$$

В простейшем случае изображения искомых переменных вектора состояния определяются методом исключения, что, однако, довольно громоздко. Особенностью операторного метода математического моделирования является то, что для определения величин  $i_1(t)$ ,  $i_2'(t)$  и  $u_C(t)$  не требуется проводить никаких матричных преобразований. Однако вероятность появления ошибки при определении оригинала по его изображению значительно выше, чем в рассмотренном векторно-матричном способе моделирования резонансного ППН.

### Список литературы

1. Белов, Г.А. Расчет и моделирование переходных процессов в резонансном преобразователе постоянного напряжения типа LLC/ Г.А. Белов, Г.В. Малинин, Л.С. Севриков // Электротехника. – 2019. – №8. – С. 26-31.

2. Белов, Г.А. Методика расчета переходных процессов резонансном преобразователе постоянного напряжения/ Г.А. Белов, Г.В. Малинин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2020. – С. 164-172.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

В.Р. Мукаева, М.В. Горбатков, Р.Г. Фаррахов, Е.В. Парфенов  
(г.Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет)

## **ДИАГНОСТИКА ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ В ХОДЕ ПЭО МАГНИЕВОГО СПЛАВА AZ31**

### **DIAGNOSTICS OF COATING THICKNESS DURING PEO OF MAGNESIUM ALLOY AZ31**

*Рассмотрен вопрос разработки способа определения толщины покрытия в ходе ПЭО магниевого сплава AZ31 по электрическим параметрам с преимуществами точной диагностики на начальном этапе технологического процесса.*

*The issue of coating thickness control during plasma electrolytic oxidation by electrical parameters with the advantages of accurate diagnostics at the initial stage of the technological process is considered.*

*Ключевые слова: оксидирование, магний, косвенное измерение толщины.*

*Keywords: oxidation, magnesium, indirect thickness measurement.*

Магний и его сплавы имеют применение в различных отраслях промышленности, например, в аэрокосмической и автомобильной. Также биосовместимые магниевые сплавы вызывают интерес для изготовления биорезорбируемых имплантатов [1]. Но существуют необходимость улучшения коррозионных свойств поверхности магниевых сплавов за счет формирования на поверхности оксидного покрытия. Для этого могут применяться различные методы химической и электрохимической обработки. В данной работе был исследован перспективный, экологичный и производительный процесс плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Однако, ПЭО сложный и нелинейный процесс, поэтому для повышения точности и воспроизводимости результатов обработки требуются системы автоматизированного управления с идентификацией свойств покрытия в ходе обработки. Исследование посвящено изучению процесса модификации поверхности на начальном этапе технологического процесса, который является ответственным для формирования физико-химических свойств покрытия.

ПЭО образцов сплава AZ31 проводилось на автоматизированной технологической установке с одновременной регистрацией значений тока и напряжения в водном силикатно-щелочном электролите в импульсном униполярном режиме. Частота импульсов составляла 3000-3500 Гц. После запуска установки в течение 45 с производился выход на рабочий режим обработки: амплитуда импульсов напряжения повышалась линейно от 0 до напряжения 460 В, далее амплитуда поддерживалась на постоянном уровне. Исследовались длительности обработки 20 с, 30 с, 40 с, 1 мин, 5 мин и 10 мин.

После обработки измерялась толщина покрытия вихретоковым толщиномером Defelsko Positector 6000.

Был проведен анализ электрических параметров, который показал, что среднее значение напряжения  $U_{\text{cp}}$ , зарегистрированное в ходе ПЭО отличается от расчетных средних значений идеальных прямоугольных импульсов той же амплитуды  $U_{\text{имп}}$ . Скорость роста  $U_{\text{cp}}$  выше при выходе на рабочий режим, и при установке рабочего напряжения  $U_{\text{cp}}$  продолжает увеличиваться достигая постоянного значения приблизительно после 6 минут обработки. Это связано с тем, что уже при выходе на рабочий режим оксидное покрытие проходит стадии роста при выделении кислорода, возникновении искровых и микродуговых разрядов в соответствии с ВАХ. Покрытие обладает электрическим сопротивлением и емкостью и вызывает переходные процессы в сигнале напряжения, искажая форму идеальных импульсов, поэтому  $U_{\text{cp}} > U_{\text{имп}}$  и чем толще покрытие, тем больше величина  $U_{\text{cp}}$ . Данные величины могут быть связаны функциональной зависимостью. Для корректного косвенного измерения толщины покрытия  $h$  при росте напряжения предлагается использовать разность  $(U_{\text{cp}} - U_{\text{имп}})$  по формуле:

$$h = k(U_{\text{cp}} - U_{\text{имп}}),$$

где  $k = 0,64$  мкм/В – градуировочный коэффициент, рассчитанный по измеренным датчиком значениям толщины покрытия.

Данная закономерность справедлива и после достижения рабочего напряжения. Допущением формулы является то, что удельное сопротивление покрытия принято постоянной во всем объеме покрытия. Коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,94$ . На начальном этапе обработки точность разработанного способа выше, чем у способа, описанного в статье [2]

Таким образом, получено, что в рассматриваемых условиях обработки прирост покрытия на 50-60% от возможной достигаемой толщины происходит на начальном этапе при 45 с при плавном повышении напряжения до рабочих 460 В. Получена зависимость, позволяющая контролировать толщину покрытия в ходе ПЭО магниевого сплава AZ31 при изменяющейся амплитуде импульсов напряжения.

*Исследование ПЭО магниевых сплавов осуществляется в рамках работы по программе Стипендии Президента РФ СП-1962.2019.4.*

#### Список литературы

1. Zheng, Y.F. Biodegradable metals / Y.F. Zheng, X.N. Gu, F. Witte // Mater Sci Eng R Rep. - 2014. - № 77 P. 1-34.
2. Mukaeva, V.R. Diagnostics of the thickness of a plasma electrolytic oxidation coating on a nanostructured Mg-Sr alloy / V.R. Mukaeva, O.B. Kulyasova, R.G. Farrakhov, E.V. Parfenov, Y.F. Zheng // IOP Conf Ser: Mater Sci and Engineering. - 2018. - Vol. 292 (1). - № 134405.

*Материал поступил в редколлегию 09.10.20.*

В.Р. Мукаева, А.Е. Шарипов, О.В. Мельничук, Е.В. Парфенов  
(г.Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет)

## ДИАГНОСТИКА ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ В ХОДЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ТИТАНА

### DIAGNOSTICS OF THE COATING THICKNESS DURING THE ELECTROLYTIC-PLASMA OXIDATION OF TITANIUM

*Рассмотрены вопросы разработки математической модели изменения толщины покрытия в ходе плазменно-электролитического оксидирования, статистической оценки повторяемости экспериментов, сравнению толщины покрытия, полученной на поверхности титана с крупнозернистой и нано-структурированной.*

*The issues of developing a mathematical model for changing the thickness of the coating during plasma electrolytic oxidation, statistical evaluation of the repeatability of experiments, comparing the thickness of the coating obtained on the surface of titanium with a coarse- and nano-grained structure.*

*Ключевые слова: оксидирование, диагностика, моделирование, наноструктурирование титана.*

*Keywords: oxidation, diagnostics, modeling, nanostructuring of titanium.*

Для повышения надежности нефтяных насосов и увеличение их срока службы актуальной задачей является защита алюминиевых и титановых деталей оксидными покрытиями. В данном направлении большими перспективами обладает экологичная и производительная технология плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО). ПЭО покрытие позволяет повысить износо- и коррозионную стойкость деталей [1,2]. Однако возникающие в ходе ПЭО вблизи обрабатываемой поверхности электроразрядные явления, наряду с повышением эффективности обработки, существенно усложняют механизм процесса, поэтому актуальна задача построения математических моделей для планирования и диагностики свойств покрытия. В работе построена модель изменения толщины покрытия во времени, проведена статистическая оценка повторяемости экспериментов; выполнено сравнение толщин покрытия, на поверхности титана с различным размером зерна.

Экспериментальные исследования были проведены с использованием автоматизированной установки для изучения процессов ПЭО в импульсном режиме с амплитудой положительных и отрицательных импульсов 470 В и -40 В соответственно. В качестве электролита использовался водный фосфатный электролит, частота импульсов 200-500 Гц. Для построения модели динамики толщин покрытия эксперименты проводились различной

длительности  $t = 40$  с; 1 мин; 1,5 мин; 2 мин; 3 мин; 4 мин; и 5 мин на образцах крупнозернистого титана. Для статистической оценки повторяемости экспериментов проведено по 25 эксперимента по 5 минут на образцах крупнозернистого и наноструктурированного титана.

После обработки измерялась толщина покрытия  $h$  вихретоковым толщиномером Defelsko Positector 6000. Экспериментальные данные были аппроксимированы в среде MatLab следующим уравнением:

$$h(t) = h_{\max}(1 - e^{(-t/\tau)}),$$

где  $h_{\max} = 20,22 \pm 1$  мкм – коэффициент, характеризующий максимальную толщину покрытия в данных условиях обработки;

$\tau = 1,257 \pm 0,18$  мин – постоянная времени. Коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,98$ .

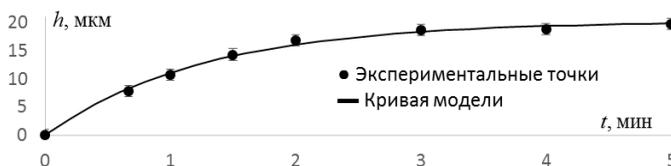


Рис. 1. Экспериментальные точки и кривая модели толщины ПЭО покрытия на Ti

Сравнение толщины покрытия, полученной на поверхности титана с крупнозернистой и наноструктурой за 5 минут обработки показало, что с измельчением зерна можно достичь большей толщины покрытия. Среднее значение толщины покрытия составило  $18,9 \pm 1,1$  мкм для образцов из крупнозернистого титана и  $21,6 \pm 1,3$  мкм для образцов из наноструктурированного титана.

Таким образом получена математическая модель, позволяющая прогнозировать толщину покрытия при различных длительностях обработки, которая может быть в составе АСУ ТП процессом ПЭО. Показано, что процесс ПЭО обладает хорошей воспроизводимостью. Получено, что наноструктурирование влияет на протекание процесса ПЭО, что отражается в большей толщине получаемого покрытия.

*Исследование осуществлялось в рамках работы по программе гранта РФФИ № 20-08-01172 А.*

### Список литературы

1. Парфенов, Е.В. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление: монография/ Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, А. Л. Ерохин. - Москва: Машиностроение, 2014. – 380 с.
2. Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х томах. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Криг, А.М. Борисов. – М.: Техносфера, 2011. – Т.2. – 512 с.

*Материал поступил в редколлегию 09.10.20.*

Г.П. Охоткин, С.В. Угарин, А.А. Дарвин

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА,  
ФОРМИРУЮЩЕГО ДИАГОНАЛЬНЫЙ ЗАКОН КОММУТАЦИИ  
КЛЮЧЕЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ВЕРХНЕГО ТРАНЗИСТОРА  
МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**SIMULATION OF THE OPERATION OF A LOGIC DEVICE THAT FORMS  
A DIAGONAL LAW OF SWITCHING KEYS WITH SWITCHING OF THE UPPER  
TRANSISTOR OF THE BRIDGE CIRCUIT OF A SEMICONDUCTOR CONVERTER**

*Проведено моделирование работы логического устройства, формирующего диагональный закон коммутации ключей с переключением верхнего транзистора мостовой схемы полупроводникового преобразователя.*

*Simulation of the operation of a logic device that forms a diagonal law of switching keys with switching of the upper transistor of the bridge circuit of a semiconductor converter is carried out.*

*Ключевые слова: моделирование, Simulink, диагональный закон коммутации, полупроводниковые преобразователи.*

*Keywords: simulation, simulink, diagonal commutation law, semiconductor converters.*

Транзисторные преобразователи постоянного напряжения, выполненные по мостовой схеме, находят широкое применение в электроприводах постоянного и переменного тока. Существует множество законов коммутации ключей преобразователя. Одним из эффективных законов коммутации является диагональный с переключением верхних или нижних транзисторов моста [1]. Закон коммутации транзисторов моста формируется логическим устройством (ЛУ) преобразователя. Методика синтеза логического устройства, формирующего диагональный закон коммутации с переключением верхних транзисторов моста, приведена в [2,3].

После составления функциональной схемы ЛУ возникает необходимость быстрой проверки на достоверность полученных результатов. Проверка функционирования работы логического устройства вне системы силовой электроники требует разработки специальных программ и значительных затрат времени. Одним из эффективных методов снижения затрат времени является использование среды расширения *Stateflow* программного пакета *Matlab-Simulink*. В имеющейся литературе недостаточно полно отражены вопросы разработки методов быстрой проверки на достоверность функционирования логических устройств на основе пакета расширения *Stateflow*. В связи с этим задача разработки программы моделирования работы ЛУ на *Stateflow* является актуальной.

Целью представленной работы является разработка программы на *Stateflow*, позволяющей моделировать работу ЛУ как дискретного автомата, формировать тестовые управляющие воздействия, визуализировать получаемые результаты.

Для быстрого тестирования ЛУ, разработана программа на основе *Stateflow*, графическая структурная схема которой представлена на рис. 1.

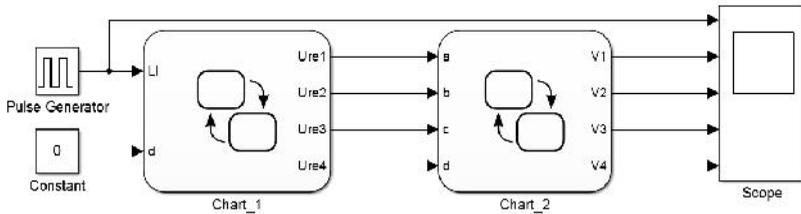


Рис. 1. Структурная схема программы тестирования ЛУ

Схема включает в себя: блок *Chart\_1*, генерирующий тестовые сигналы; блок *Chart\_2* – дискретный автомат, моделирующий работу логического устройства; блок *Scope* – осциллограф, отображающий процессы в ЛУ.

Генератор тестирующих сигналов *Chart\_1*, представлен как дискретный автомат (рис. 2), состоящий согласно работе [2] из 12 состояний входов ЛУ  $\lambda_1 - \lambda_{12}$ .

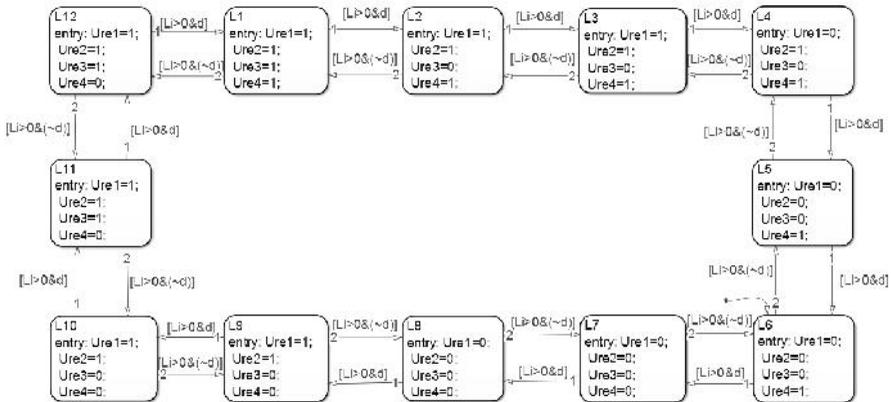


Рис. 2. Структура блока *Chart\_1*

Структурная схема блока *Chart\_2* представлена на рис. 3. Согласно работе [2] логическое устройство состоит из пяти состояний  $x_1 - x_5$ , представленных вершинами на граф-схеме автомата.

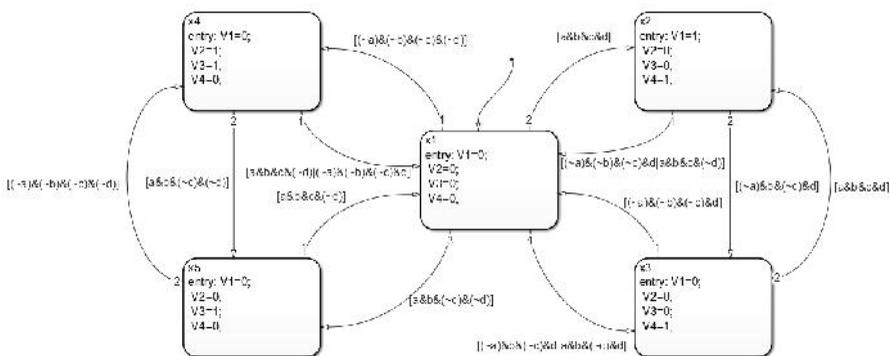


Рис. 3. Структура блока Chart\_2

Работу автомата логического устройства можно оценить по осциллограммам, полученным с помощью блока *Scope*, которые представлены на рис. 4.

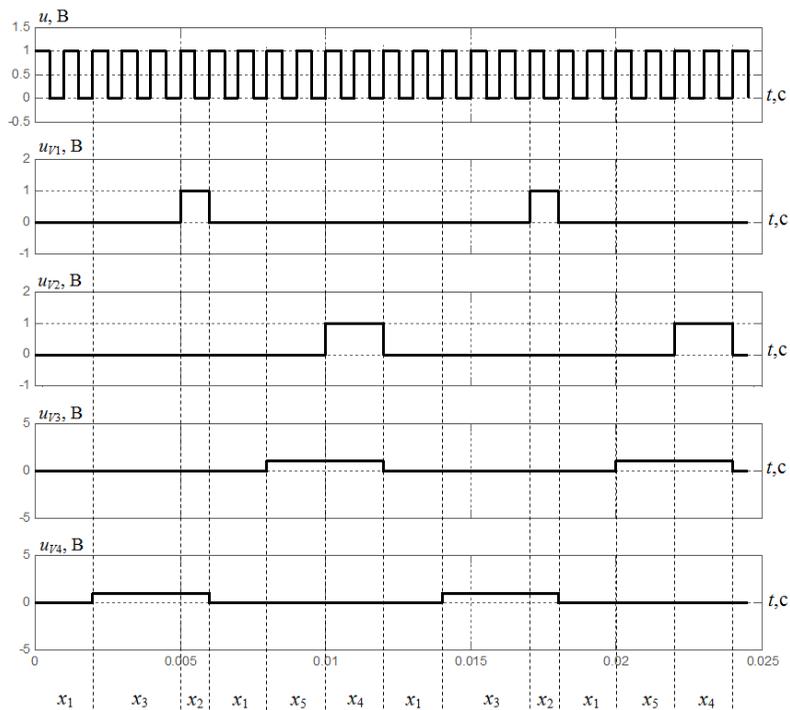


Рис. 4. Осциллограммы выходных сигналов ЛУ

Для большей наглядности поверх осциллограммы нанесены вертикальные пунктирные линии и обозначены интервалы текущих активных

состояний  $x_1 - x_5$  автомата дискретного логического устройства.

В процессе моделирования схемы активные состояния и переходы автомата подсвечиваются синим контуром, что позволяет визуально оценить достоверность функционирования полученной модели.

Разработанная *Simulink*-модель позволяет достаточно быстро оценить достоверность полученных ранее математических моделей законов коммутации ключей вентильных преобразователей и на ранних этапах проектирования выявить ошибки, если таковые имеются.

### Список литературы

1. *Охоткин, Г.П.* Анализ законов коммутаций ключей мостовой схемы импульсного преобразователя / Г.П. Охоткин, Е.С. Романова // Вестник Чувашского университета. 2012. №3. С. 142-149.

2. *Охоткин, Г.П.* Разработка методики синтеза дискретного логического управляющего устройства САР тока / Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2014. – №2. – С. 74-83.

3. *Охоткин, Г.П.* Разработка математической модели диагонального закона коммутации ключей с переключением верхнего транзистора мостовой схемы преобразователя / Г.П. Охоткин, Е.С. Романова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 77–86.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

DOI: 10.51932/9785907271739\_296

УДК 621.3

Г.П. Охоткин, С.В. Угарин, А.А. Дарвин

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ЗАКОНА КОММУТАЦИИ В *SIMULINK* С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА РАСШИРЕНИЯ *STATEFLOW*

### SIMULATION OF A SYMMETRIC COMMUTATION LAW IN *SIMULINK* USING THE *STATEFLOW* PACKAGE

*Показан способ моделирования системы управления полупроводниковым преобразователем в САПР Matlab Simulink с использованием библиотеки Stateflow.*

*A method for modeling the control system of a semiconductor Converter in the Matlab Simulink CAD system using the Stateflow library is shown.*

*Ключевые слова: моделирование, Simulink, симметричный закон коммутации, полупроводниковые преобразователи.*

*Keywords: simulation, simulink, symmetric commutation law, semiconductor converters.*

Моделирование систем силовой электроники, используя современные САПР, позволяет убедиться в достоверности ранее полученных

математических моделей, а также ускорить разработку полупроводниковых преобразователей. Большое распространение получила среда динамического моделирования сложных технических систем *Matlab-Simulink*. Мощный графический инструмент *Simulink* позволил завоевать популярность среди ученых, инженеров и студентов.

Существует несколько подходов к построению *simulink*-моделей систем управления силовыми полупроводниковыми преобразователями, из которых наиболее распространены:

1) с использованием стандартных блоков основной библиотеки *simulink* (компараторы, сумматоры, триггеры, логические функции и т.д.);

2) с использованием кода на языке *C*, описывающего функционирование системы управления.

В данной работе приводится моделирование симметричного закона коммутации ключей мостовой схемы полупроводникового преобразователя, построенной с применением расширения *Stateflow*. Это расширение *Matlab-Simulink* предназначено для разработки конечных автоматов и машин состояний, предоставляет эффективную среду для разработки встраиваемых систем с управляющей логикой. Расширение *Stateflow* позволяет моделировать управляющую логику используя графы переходов (блоки *Chart*), таблицы переходов автомата (*State Transition Table*) и таблицы истинности (*Truth Table*).

В работе [1] разработана математическая модель симметричного закона коммутации полупроводниковых вентилях мостового преобразователя, представляющая собой граф переходов автоматов, которая с минимальными преобразованиями легко переносится в *simulink*-модель, используя расширение *Stateflow*. Для моделирования закона коммутации построена следующая *simulink*-модель, представленная на рис. 1.

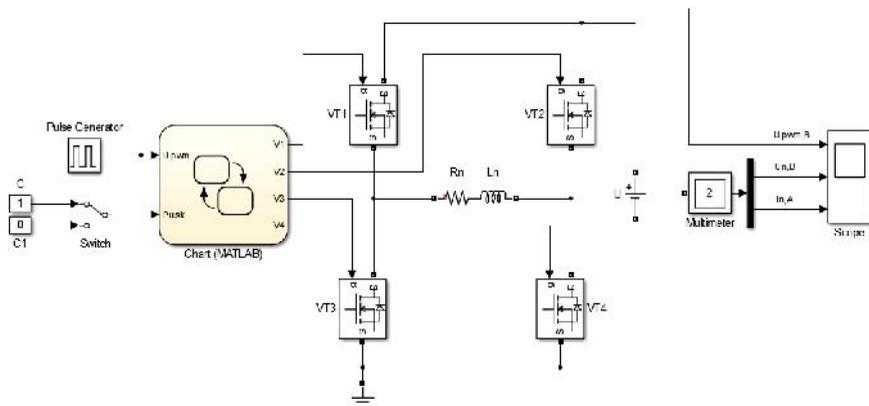


Рис. 1. Simulink-модель мостового преобразователя

Модель состоит из четырех *mosfet*-транзисторов *VT1-VT4* со встроенными диодами, образующих мостовую схему преобразователя, в качестве активно-

индуктивной нагрузки применен блок *RL-branch* с обозначением *Rn* и *Ln*. Напряжение и ток нагрузки определяется блоком мультиметра *Multimeter*. Система управления мостовым преобразователем представлена блоком *Chart*, содержащей в себе управляющую логику. Блок *Chart* имеет 4 выходных сигнала *V1 – V4*, поступающие на соответствующие затворы транзисторов *VT1-VT4*, и два входа *Upwm* и *Pusk*. На вход *Upwm* поступает сигнал с блока генератора прямоугольных импульсов *Pulse Generator*. Входной сигнал *Pusk* определяет запуск и останов работы логического устройства *Chart*. Двойным кликом левой кнопкой мыши по блоку *Switch* выбирается сигнал «0» (останов) или «1» (запуск), разрешающий работу логического устройства.

Двойным кликом левой кнопки мыши по блоку *Chart* входим в режим программирования структуры блока, куда переносим разработанную в работах [1,2] математическая модель симметричного закона коммутации, представленная в виде графа переходов автомата. Структура блока *Chart*, реализующая закон симметричной коммутации, приведена на рис. 2.

Модель состоит из трех состояний *P2B*, *P2H* и *P0*, над дугами указаны условия перехода из одного состояния в другое. В процессе моделирования активные состояния и дуги переходов автомата подсвечиваются синим цветом, что позволяет наглядно проконтролировать функционирование и достоверность полученной ранее математической модели. Двойным кликом мыши по блоку *Switch*, даже в процессе симуляции модели, выбирается режим работы логического устройства.

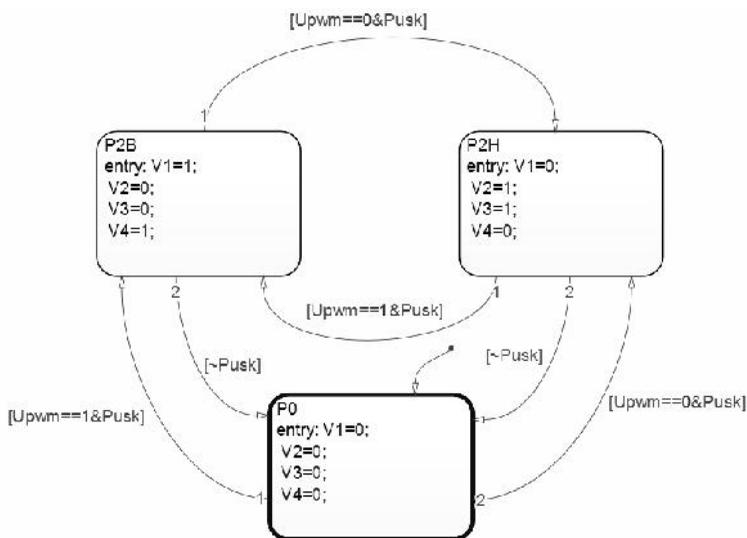


Рис. 2. Структура блока *Chart*

Осциллограммы установившегося режима работы *simulink*-модели представленные на рис. 3 подтверждают выводы, полученные в работе [3].

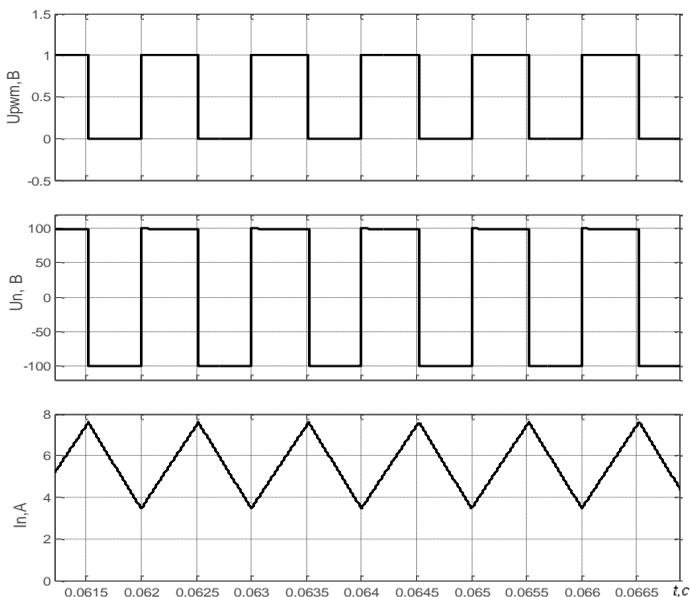


Рис. 3. Осциллограммы моделирования работы преобразователя

Модели систем управления, построенные с использованием расширения *Stateflow*, наиболее наглядны и уменьшают возможность совершения ошибок разработчиков, также они упрощают модернизацию управляющей логики. На основе разработанной *Stateflow*-модели системы управления в последующем возможно в автоматическом режиме сгенерировать тексты программ на языке *C/C++*, *VHDL* и *PLC*, используя соответственно *Simulink Coder*, *HDL Coder* и *PLC Coder*.

### Список литературы

1. Охоткин, Г.П. Разработка математической модели симметричного закона коммутации ключей мостовой схемы вентильного преобразователя / Г.П. Охоткин, Е.С. Романова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 180–186.
2. Охоткин Г.П. Синтез логического устройства и распределителя импульсов САР тока / Г.П. Охоткин, Е.С. Романова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы X Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 194–203.
3. Охоткин, Г.П. Разработка на *Multisim* модели системы автоматического регулирования тока с релейным регулятором тока при симметричном законе коммутации ключей вентильного преобразователя / Г.П. Охоткин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 119–125.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Р.Р. Раупов, В.В. Афанасьев

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ MULTI-SCROLL ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО СХЕМЕ JERK**

MODELLING OF SIGNAL GENERATORS BASED ON A CONTROLLED NONLINEAR MULTI-SCROLL DYNAMIC SYSTEM ON THE JERK CIRCUIT

*Проведено моделирование и исследование генератора псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk для дальнейшего применения в прямохаотических системах цифровой передачи информации. Выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров и частоты дискретизации базовой системы с динамическим хаосом при формировании сигналов с требуемыми статистическими характеристиками.*

*In this work, a simulation and study of a pseudo-random signal generator based on a multi-scroll system with chaotic dynamics according to the Jerk circuit was carried out for further use in straight-chaotic systems of digital information transmission. Engineering recommendations have been developed for the choice of parameters and sampling frequency of a basic system with dynamic chaos when generating signals with the required statistical characteristics.*

*Ключевые слова: динамический хаос, multi-scroll система, статистические характеристики, частота дискретизации.*

*Keywords: dynamic chaos, multi-scroll system, statistical characteristics, sampling frequency.*

Использование в современных системах связи в качестве носителя информации хаотических сигналов имеет преимущества по сравнению с использованием гармонических сигналов: возможность управления режимами путем малых изменений параметров системы, большая информационная емкость, возможность самосинхронизации передатчика и приемника, конфиденциальность при передаче сообщений [1]. Одним из вариантов реализации генераторов хаоса является реализация генератора псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll системы. В отличие от типовых радиоэлектронных систем с динамическим хаосом multi-scroll системы имеют более сложное динамическое поведение, что позволяет использовать их при построении конфиденциальных систем передачи информации. Эффективно построение генераторов псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll систем с хаотической динамикой по схеме Jerk [2].

Цель работы – создание средств моделирования multi-scroll системы по схеме Jerk для дальнейшего исследования влияния вариации параметров и частоты дискретизации на работу моделируемой системы.

Один из широко используемых вариантов реализации схемы Jerk описывается системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = z \\ \dot{z} = -x - y - a \cdot z + f(x), \end{cases}$$

где  $x, y, z$  – переменные системы;  $a$  – параметр системы; функция  $f(x)$  определяет количество спиралей в фазовом пространстве исследуемой динамической системы.

Моделирование multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk в работе проведено на базе средств Mathcad. Численное решение нелинейной дифференциальной системы, описывающей динамику схемы Jerk, проводилось методом Эйлера.

Проведено исследование влияния вариации параметров multi-scroll системы по схеме Jerk на фазовые портреты и статистические характеристики сигналов, формируемых моделируемой системой с динамическим хаосом. Установлено, что для получения хаотического режима в системе при величине относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, равной 0.09, рекомендуется выбирать значение базового параметра  $a$  в диапазоне:  $0,3 \leq a \leq 1,1$  [4].

Полученные в результате моделирования характерные фазовые портреты multi-scroll системы для варианта с 4-мя, 6-ю и 8-ю спиральями при  $a = 0.7$  представлены на рис.1.

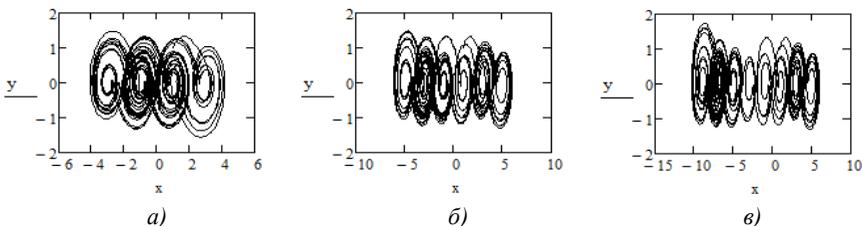


Рис.1. Фазовые портреты multi-scroll системы для случая: а) 4 спирали, б) 6 спиралей, в) 8 спиралей

Исследовано влияние вариации относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, на фазовые портреты multi-scroll системы. Полученные в результате моделирования характерные фазовые портреты multi-scroll системы при значениях относительного шага временной дискретизации равных 0.05, 0.08, 0.15, значении параметра  $a = 0.7$  и количестве шагов  $n = 5000$  для случая с

4-мя спиралями представлены на рис. 2.

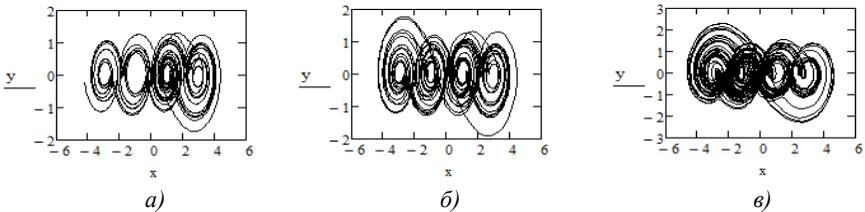


Рис.2. Фазовые портреты multi-scroll системы для случая: а)  $h = 0.05$ , б)  $h = 0.08$ , в)  $h = 0.15$

Установлено, что требуемый хаотический режим в multi-scroll системе обеспечивается при выборе относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, в диапазоне от 0.05 до 0.2 или при выборе частоты дискретизации в диапазоне от 25000 до 100000.

В работе исследованы статистические характеристики сигналов, формируемых на основе multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk. Полученные оценки типовых значений математического ожидания  $m$ , дисперсии  $D$  и СКО  $\sigma$  сигналов multi-scroll системы по схеме Jerk при различных значениях относительного шага временной дискретизации  $h$  приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики сигналов multi-scroll системы по схеме Jerk

	$h = 0.05$	$h = 0.08$	$h = 0.15$
Сигнал X	$m = 0.445$ $D = 4.397$ $\sigma = 2.097$	$m = 0.115$ $D = 4.443$ $\sigma = 2.108$	$m = -0.528$ $D = 4.228$ $\sigma = 2.056$
Сигнал Y	$m = -0.021$ $D = 0.328$ $\sigma = 0.573$	$m = -4.41 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.345$ $\sigma = 0.588$	$m = -6.343 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.474$ $\sigma = 0.688$
Сигнал Z	$m = -4.541 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.316$ $\sigma = 0.562$	$m = -1.101 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.327$ $\sigma = 0.572$	$m = -7.317 \cdot 10^{-4}$ $D = 0.44$ $\sigma = 0.664$

Для обоснования инженерных рекомендаций с оптимальным выбором параметров исследуемой multi-scroll системы в программной среде Multisim разработана и исследована модель схемы Jerk, выполненная на элементной базе ОУ. Схема состоит из 3-х блоков: блок интеграторов, буфер, генератор сигналов треугольной и пилообразной формы. С помощью блока интеграторов имеется возможность управления хаотическими режимами multi-scroll системы. Генератор сигналов треугольной и пилообразной формы регулирует количество спиралей в фазовом портрете исследуемой системы.

Полученный в результате моделирования multi-scroll системы характерный фазовый портрет для случая с 4-мя спиралями при параметре

$a = 0.7$  приведен на рис.3.

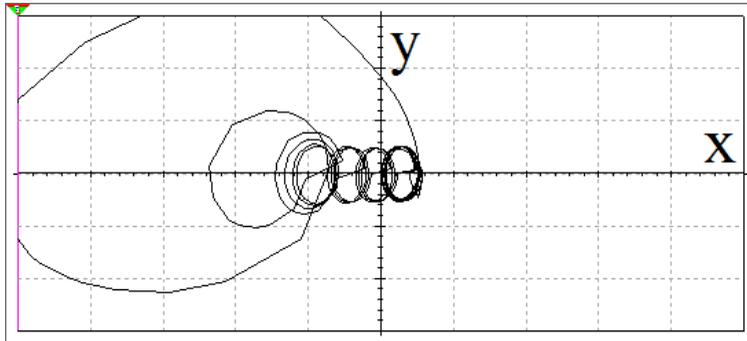


Рис.3. Фазовый портрет multi-scroll системы, полученный в программной среде Multisim

Таким образом, на основе разработанных средств моделирования в программах Mathcad и Multisim были исследованы фазовые портреты multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk и выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров и частоты дискретизации базовой системы с динамическим хаосом. Исследованы статистические характеристики псевдослучайных сигналов, формируемых при моделировании multi-scroll системы, в зависимости от выбора относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний. Полученные результаты исследования можно использовать при оптимизации аппаратуры цифровой передачи информации, построенной на основе эффектов динамического хаоса.

#### Список литературы

1. *Шахтарин, Б.И.* Генераторы хаотических колебаний/ Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондатьяев, С.В. Митин. - М.: Гелиос АРВ, 2007. - 248 с.
2. *Simin Yu.* N-scroll chaotic attractors from a general Jerk circuit/ Simin Yu, Jinhu Lu, Henry Leung, Guanrong Chen. - International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Kobe, Japan, 2015. - p. 1473-1476.
3. *Liu Chunxia.* Research on the multi-scroll chaos generation based on Jerk Mode/ Liu Chunxia, Yi Jie, Xi Xianchun, An Limin, Qian Yan, Fu Youngqing. - Procedia Engineering 29, 2012. - p. 957-961.
4. *Раупов, Р.Р.* Формирователи псевдослучайных сигналов по схеме Jerk для аппаратуры волоконно-оптических линий связи/ Р.Р. Раупов, В.В. Афанасьев. - VII Молодежная международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2020», 2020 – 616 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

О.И. Пугачев, К.Н. Фазилова

(г. Москва, МИРЭА – Российский технологический университет)

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА**

### **STATISTICAL EVALUATION OF THE FAILURE RATE OF THE SOFTWARE PACKAGE**

*Представлен методологический подход к оценке интенсивности отказов программного комплекса на стадии проектирования локальных вычислительных сетей и показан пример его реализации.*

*The article presents a methodological approach to evaluating the reliability of a software package at the design stage of local area networks and shows an example of its implementation.*

*Ключевые слова: канал связи, агрегирование пакетов, имитационное моделирование.*

*Keywords: communication network; packet aggregation; simulation modeling.*

В настоящее время одной из основных проблем при проектировании локальных вычислительных сетей (ЛВС) является проблема обеспечения надежности. Специфика ЛВС требует особого подхода при прогнозировании надежности на этапе проектирования сети. ЛВС являются сложными техническими комплексами и оснащаются разнообразными программными средствами, образующими программное обеспечение (ПО). Оценка надежности программного обеспечения существенно отличается от методов расчета надежности технических систем потому, что отказы ПО имеют иную природу и не зависят от условий эксплуатации, внешнего окружения, физического старения и износа элементов и иных причин, характерных для материальных объектов [1].

Процессы проектирования ПО на всех своих стадиях должны включать процедуры, способствующие выявлению ошибок и оценки надежности программной системы. Общая схема технологической модели проверки программ на надежность представлена на рис. 1 [2].

Существуют три группы методов прогнозирования надежности:

1. Теоретические расчетно-аналитические методы, или методы математического моделирования.
2. Экспериментальные и экспериментально-аналитические методы, или методы физического моделирования.
3. Эвристические методы, или методы эвристического моделирования.

Для прогнозирования надежности ПО проектируемой ЛВС воспользуемся расчетно-аналитическим методом, базирующимся на теории вероятностей.



Рис. 1. Процесс проверки программной системы на надежность

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности относится интенсивность отказов. Для разработанной информационной системы проводилось тестирование 1000 ее копий в течение  $t = 1000$  часов. Полученные данные о количестве отказов, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные о количестве отказов

Интервалы времени $\Delta t_i$ , ч	0 – 200	200 – 300	300 – 500	500 – 700	700 – 800	800 – 1000
Число сбоев $\Delta r_i$	10	20	25	30	20	15

Значения статистической оценки интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  рассчитаны по формуле

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta r_i}{(N - r_{i-1})\Delta t_i}$$

и представлены на графике (рис.2).

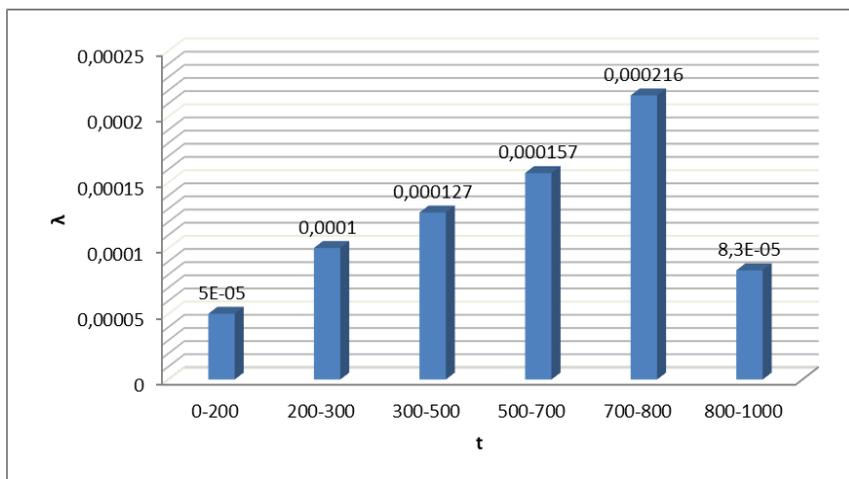


Рис. 2. Статистическая оценка интенсивности отказов

В случае если в каждом интервале времени было несколько сбоев, график статистической оценки интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  никак не изменится, т.к.  $\Delta r_i$  – число отказов на  $\Delta t_i$  и  $t$ , на котором все отказы суммируются на всем его протяжении, очень мало, следовательно, можно не учитывать.

Для данных, приведенных в таблице 1, вычислим по формуле оценки вероятности безотказной работы в течение каждого  $i$ -ого интервала наработки  $t_i$

$$P_i^* = 1 - \frac{r_i}{N}$$

и построим график статистической функции надежности  $P^*(t)$  (рис.3).

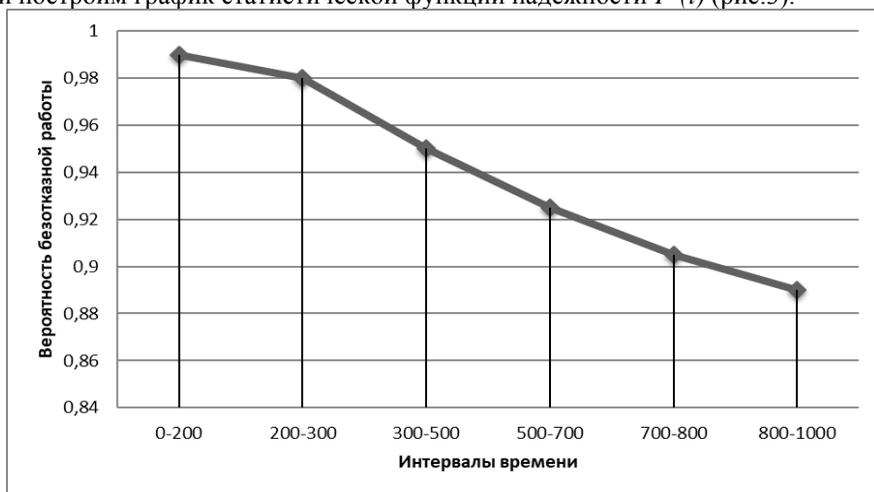


Рис. 3. График статистической функции надежности

**Заключение.** Предложенный подход, на наш взгляд, позволяет прогнозировать показатели надежности программного обеспечения на стадии проектирования ЛВС.

### Список литературы

1. Черкесов, Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов/ Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
2. Белик, А.Г. Качество и надежность программных систем / А.Г. Белик, В. И. Цыганенко. – Омск: Изд. ОмГТУ. 2018. – 80 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

DOI: 10.51932/9785907271739\_307

УДК 681.518.9; 621.384.3

К.Н. Фазилова, С.С. Анцыферов

(г. Москва, МИРЭА – Российский технологический университет)

## МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМ

### COGNITIVE SYSTEMS FUNCTIONING DYNAMICS MODEL

*Предложена модель динамики функционирования, в основу которой положено вероятностное представление об эффективности функционирования структурных элементов и их взаимосвязей. В качестве организованности системы предложено использовать энтропию как непрерывную дифференцируемую функцию, характеризующую состояние системы. В работе отмечено, что в качестве модели динамики функционирования может быть использовано нелинейное дифференциальное уравнение, выражающее зависимость от приращений интенсивностей внешних и внутрисистемных информационных потоков. Решение нелинейного уравнения позволяет определить траектории изменения состояния системы во времени, а также условия и области равновесно-устойчивого и равновесно-неустойчивого функционирования. Предложенная модель позволяет осуществлять не только контроль режимов функционирования, но и прогнозирование ее последующих состояний.*

*The paper proposes a model of the dynamics of functioning, which is based on a probabilistic representation of the effectiveness of structural elements functioning of and their interaction. As the organization of the system, it is proposed to use entropy as a continuous differentiable function that characterizes the state of the system. It is noted that a nonlinear differential equation can be used as a functioning dynamics model, which expresses the dependence on the increments of the intensities of external and internal information flows. The solution of the nonlinear equation allows us to determine the trajectories of changes in the state of the system over time, as well as the conditions and areas of equilibrium-stable and equilibrium-unstable*

*functioning. The proposed model allows not only monitoring the operating modes, but also predicting its subsequent states.*

*Ключевые слова: когнитивная система, структурный элемент, неравновесная устойчивость, трансформация структуры, эффективность структурных элементов.*

*Keywords: cognitive system, structural element, nonequilibrium stability, structure transformation, structural elements efficiency.*

Когнитивные системы (КС) представляют собой сложно организованные системы, обладающие определенной структурой. Важнейшее свойство этой структуры – относительность ее устойчивости, т.е. она существует, но при этом постоянно изменяется. Динамичность структуры обуславливается изменением во времени свойств как отдельных структурных элементов (СЭ), так и их взаимосвязей между собой. Системы, достигшие высокого уровня организации, приобретают способность эффективно использовать информацию, сохранять (или повышать) свой уровень организации и способствовать оптимизации своей энтропии. Конкретная конфигурация структуры существует только в строго определенных условиях и в определенные временные моменты. Приняв в качестве меры организованности КС энтропию, будем в дальнейшем рассматривать ее как функцию состояния системы, зависящую от вероятностей эффективности функционирования СЭ и их попарных взаимосвязей. Положим, что энтропия является непрерывной дифференцируемой функцией, характеризующей состояние системы.

В работе [1] было показано, что если новое состояние системы в момент времени  $t+\Delta t$  является функцией ее состояния в момент времени  $t$  и что изменение энтропии за время  $\Delta t$  пропорционально ее значению в момент времени  $t$ , то в качестве математической модели динамики функционирования КС может быть использовано нелинейное дифференциальное уравнение, выражающее зависимость от таких показателей как приращение интенсивности входного информационного потока ( $\Delta I$ ); приращение интенсивности информационного потока в системе ( $\Delta J$ ).

В процессе функционирования КС испытывает разного рода возмущения, вызванные непрерывным изменением  $\Delta I$  и  $\Delta J$ , что в свою очередь, приводит к флуктуациям энтропии.

Решение нелинейного уравнения позволяет определить траектории изменения состояния системы во времени, а также условия и области равновесно-устойчивого и равновесно-неустойчивого функционирования.

Для отслеживания тенденций изменения состояний системы, т.е. динамики ее функционирования, необходимо знать в каком состоянии она находится в данный момент и в каком направлении меняется при этом ее энтропия. КС функционируют под непрерывным воздействием интенсивного информационного потока, что находит отражение в изменении вероятностных мер СЭ, а соответственно и в изменении организационной структуры системы. Происходящие изменения создают потенциальные возможности для возникновения критических состояний, которые могут заканчиваться по разному: - кратковременный переход в область неустойчивости, возврат в область неравновесной устойчивости с одновременным изменением структуры; - переход в область неустойчивости, возрастание энтропии, достижение состояния значительной неопределенности, «застывание» в ней либо на какое-то время, либо навсегда, т.е. распад системы; - кратковременный переход в область равновесной устойчивости с последующим возвратом в область неравновесной устойчивости; - выход в область равновесной устойчивости, сопровождающийся усилением «консерватизма» системы и возможная последующая ее деградация.

Вероятностные меры эффективности СЭ позволяют судить о месте как отдельного СЭ, так и о уровне организации КС. Значения вероятностных мер под влиянием внешних и внутренних информационных потоков постоянно меняются, причем в значительном диапазоне. Поэтому в пределах КС могут формироваться отдельные группы СЭ, ориентированные на решение конкретной части задачи. Число таких групп и их состав определяют структурное построение КС. Сформировавшиеся на данный момент времени группы не являются окончательно установившимися, т.к. при изменении условий они расформируются и из «освободившихся» СЭ формируются новые группы, изменяя тем самым структуру КС. Энтропия групп, а по аналогии КС, изменяется в зависимости от числа СЭ. Системам большего размера будет соответствовать большее значение энтропии. При этом даже незначительное увеличение размера КС приведет к значительному увеличению энтропии, т.е. неопределенности состояния. Предложенная модель позволяет осуществлять не только контроль режимов функционирования, но и прогнозирование ее последующих состояний.

#### Список литературы

1. *Antsyferov S.S., Fazilova K.N.* Evaluation of cognitive systems structural elements effectiveness // *Problems of Artificial Intelligence.* – 2019. – № 3 (14). – P. 40-46.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОСИСТЕМ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, ПРОИЗВОДСТВЕ, НАУЧНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ И В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ»**

**SIMULATION OF ELECTRONIC ELECTROTECHNICAL, PHYSICAL  
AND RADIO SYSTEMS IN DESIGNING, PRODUCTION, SCIENTIFIC  
RESEARCHES AND IN THE EDUCATIONAL PROCESS**

DOI: 10.51932/9785907271739\_310

УДК 621.311.1

Л.И. Абдуллин<sup>1</sup>, Г.В. Вагапов<sup>2</sup>, Э.Р. Балявина<sup>1</sup>, А.Ф. Абдуллазянов<sup>2</sup>  
(г. Казань, <sup>1</sup>АО «Сетевая компания»,  
<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО  
ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ УМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ**

**DETERMINATION OF THE SINGLE-PHASE GROUND MODE PARAMETERS  
BASED ON SMART METERS**

*Приведена возможность практической реализации применения умных измерителей типа ESM для анализа спектрального состава токов и напряжений. Сопоставление пофидерных значений амплитуд высших гармоник позволяет выявлять режим ОЗЗ на начальной стадии.*

*The possibility of practical implementation of smart meters of the ESM type for analyzing the spectral composition of currents and voltages is shown.*

*The feeder comparison of the amplitudes of higher harmonics allows to identify the mode of SPGF at the initial stage.*

*Ключевые слова: умный измеритель, однофазное замыкание на землю, высшие гармоники тока и напряжения.*

*Keywords: smart meter, single-phase ground fault, higher harmonics of current and voltage.*

Эффективное функционирование системы контроля однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) для воздушных линий 6 – 35 кВ является одним факторов, способствующих повышению надежности функционирования распределительных электрических сетей (РЭС). Одновременно, функционирование системы контроля ОЗЗ позволяет осуществлять дистанционный мониторинг однофазных повреждений без необходимости выезда оперативного персонала для визуального осмотра воздушных линий электропередачи с целью локализации участка с повреждением, что позволит сохранять показатели качества электроэнергии вследствие возникающих перенапряжений на доаварийном уровне и, существенно не снижать ее недоотпуск конечному потребителю.

Существуют несколько различных подходов и технических решений к проблеме ОЗЗ. Среди классических общепризнанных направлений выделяются такие как [1, 2, 3] и др. В качестве примера зарубежных исследований возможно выделить такие работы как, например, [4]. Перспективными направлениями исследований по выше обозначенной проблеме являются работы [5, 6]. В качестве альтернативного метода диагностики ОЗЗ возможно использование проявления высших гармоник (ВГ) тока и напряжения [7]. Основные теоретические положения представлены в [8].

Практическая реализация теоретических положений контроля режимов ОЗЗ была осуществлена на основе умных измерителей типа ESM для первичного спектрального анализа пофазных значений токов и напряжений. Математическим аппаратом для осуществления спектрального анализа является Быстрое Преобразование Фурье (БПФ). Математический метод БПФ-обработки измерений результатов на каждом отходящем фидере с поперiodной синхронизацией измерений позволяет с требуемой точностью выделять ВГ из текущего спектра напряжений и токов и производить их сопоставление. Рис. 1 иллюстрирует в качестве примера шкаф с установленными умными измерителями для монтажа на отходящем фидере.



Рис. 4. Визуализация шкафа с установленными умными измерителями

Пофидерно установленные шкафы позволяют осуществлять раннюю диагностику ОЗЗ на первичных этапах их появления.

### Список литературы

1. *Шуин, В.А.* Защиты от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ [Текст] / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
2. *Шалин А.И.* Резистивное заземление нейтрали в сетях 6-35 кВ с СПЭ-кабелями. Подходы к выбору резисторов и принципам построения защиты от ОЗЗ / А. Шалин и др. // Новости электротехники. – 2008. – №2. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php> (дата обращения: 12.01.17).
3. *Шабад, М.А.* Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
4. Fischer, N. Methods for detecting ground faults in medium-voltage distribution power systems / N. Fischer, D. Hou. – Pullman, WA USA, 2006. – P.15.
5. *Сидоров, С.В.* Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ/ С.В. Сидоров, В.В. Сушков, И.С. Сухачев // Промышленная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 33-40.
6. *Ершов, А.М.* Система защиты воздушных линий напряжением 0,38 И 6 - 10 кВ от обрывов проводов / А.М. Ершов, А.В. Хлопова, А.И. Сидоров // Электрические станции. – 2020. – № 4 (1065). – С. 28-32.
7. *Латипов, А.Г.* Комплекс методик определения места повреждения в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по параметрах установившихся и переходных режимов: дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Латипов. – Казань: КГЭУ, 2012.
8. *Федотов, А.И.* Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю / А.И. Федотов, Л.В. Ахметвалеева, Р.Ш. Басыров, Г.В. Вагапов, Е.А. Федотов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. –Т. 22. – № 1. – С. 58-68.

*Материал поступил в редколлегию 08.10.20.*

С.В. Абрамов, В.Л. Веселов, А.А. Викторов, Н.А. Игнатова, О.О. Никитина  
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С LC- НАГРУЗКОЙ\*

CALCULATION AND SIMULATION OF A PULSE TRANSFORMER WITH LC LOAD

*Рассмотрено проектирование импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике и применен метод оценки параметров LC-фильтра.*

*The paper considers the design of a pulse transformer on a toroidal core and applies a method for estimating the parameters of an LC-filter.*

*Ключевые слова: LC-фильтр, Simulink, моделирование схем, расчет параметров, схемотехника, трансформатор.*

*Keywords: LC filter, Simulink, circuit simulation, parameter calculation, circuitry, transformer.*

Исходные данные для расчета трансформатора: напряжение первичной обмотки трансформатора  $U_1 = 100$  В, напряжение вторичной обмотки  $U_2 = 10$  кВ, ток вторичной обмотки  $I_2 = 5$  мА, частота входных импульсов  $f = 10$  кГц.

Для обеспечения нормального режима работы трансформатора в составе электрической схемы необходимо, чтобы индуктивность намагничивания была как можно больше. Этого можно добиться, выбрав сердечник из материала с высокой относительной магнитной проницаемостью  $\mu \geq 100000$ , что позволит во много раз увеличить индуктивность намагничивания, почти не изменяя индуктивности рассеяния трансформатора [1]. В качестве сердечника был выбран тороидальный сердечник типа ГМ501 ОЛ 155/135-10.

Расчет импульсного тороидального повышающего трансформатора будем проводить, используя методики, описанные в [2-6]. Результаты расчета трансформатора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные параметры импульсного трансформатора

Параметр	Величина	Единица измерения
Число витков первичной / вторичной обмотки	84 / 13164	витков
Индуктивность намагничивания	0,135	Гн
Индуктивность первичной / вторичной обмотки	136 / 3,345	мкГн / Гн

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда молодежных стартапов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (приказ №350 общ. от 07.10.2020).

© Абрамов С.В., Веселов В.Л., Викторов А.А., Игнатова Н.А., Никитина О.О., 2020.  
САПР и моделирование в современной электронике. С. 313 – 316.

На рис. 1 представлена трехмерная модель трансформатора, выполненная на основе расчетных параметров с выбранным типом сердечника.

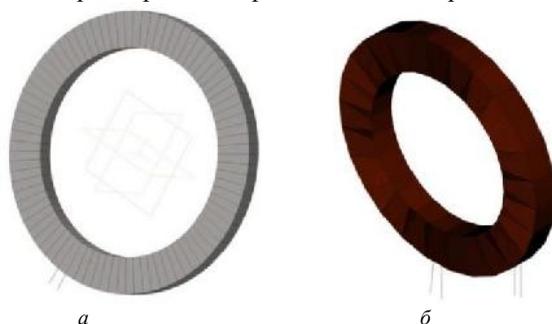


Рис. 1. Трехмерная модель трансформатора: первичная обмотка (а); вторичная обмотка (б)

Для проверки правильности расчета параметров трансформатора в MATLAB/Simulink была собрана схема (рис. 2) для моделирования необходимых режимов работы. Схема состоит из двух идеальных источников питания постоянного напряжения, двух транзисторов, формирующих на первичной обмотке трансформатора прямоугольные импульсы и задающего генератора сигнала управления транзисторами, и включает в себя, исследуемый трансформатор.

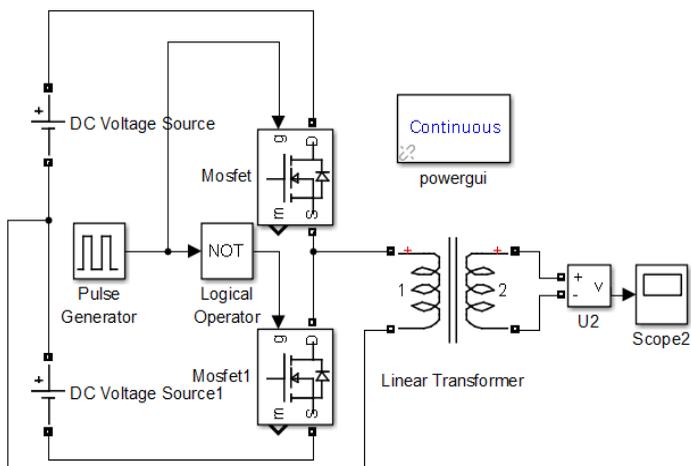


Рис. 2. Тестовая схема для проверки режимов работы трансформатора

В схеме на рис. 2 на вход трансформатора подается переменный импульсный сигнал с частотой 10 кГц и амплитудой  $U_1 = 100$  В, формируемый двумя транзисторными ключами (рис. 3). Напряжение на вторичной обмотке

трансформатора повторяет входное напряжение, а амплитуда  $U_2 = 10$  кВ, соответствует амплитуде заданной в исходных данных.

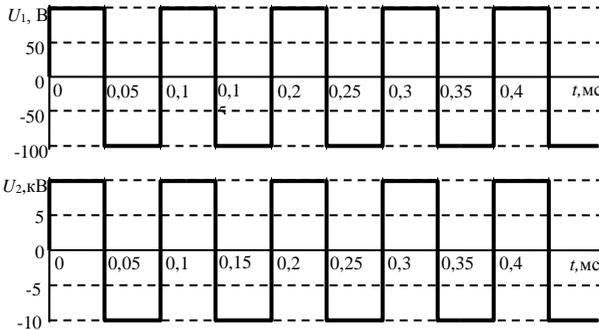


Рис. 3. Результаты моделирования работы трансформатора при импульсном входном сигнале

Формируемые транзисторными ключами импульсы подаются на трансформатор и усиливаются до амплитуды 10 кВ, ко вторичной обмотке которого, подключается низкочастотный LC-фильтр (рис. 4).

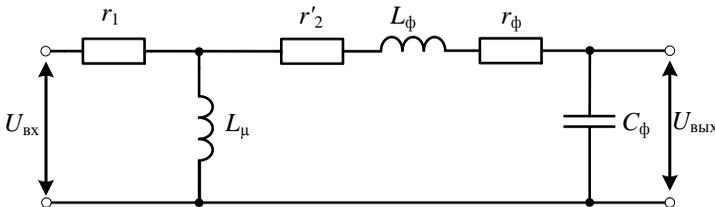


Рис. 4. Упрощенная схема замещения трансформатора и LC-фильтра

Передаточная функция, приведенной на рис. 4 упрощенной схемы замещения, определяется выражением

$$W(p) = \frac{L_\mu p}{(L_\mu p + r_1)(C_\phi L_\phi p^2 + C_\phi (r'_2 + r_\phi) p + 1)}. \quad (1)$$

На рис. 5, а представлена логарифмическая АЧХ, полученная из выражения (1) при известных параметрах трансформатора.

Полученные на основе анализа ЛАЧХ емкость и индуктивность LC-фильтра были выбраны равными  $C_\phi = 1$  нФ,  $L_\phi = 1$  Гн. Количество витков можно рассчитать, используя методики описанные в [3-4, 7]. Используя приближенную формулу, приведенную в [4] для выбранного типа сердечника количество витков будет равно

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot 10^3}{A_L}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^3}{70 \cdot 10^{-6}}} = 4 \text{ витка,}$$

где  $A_L$  – индуктивный фактор (коэффициент индуктивности) Гн. Для выбранного типа сердечника  $A_L = 60\text{-}70$  мкГн.

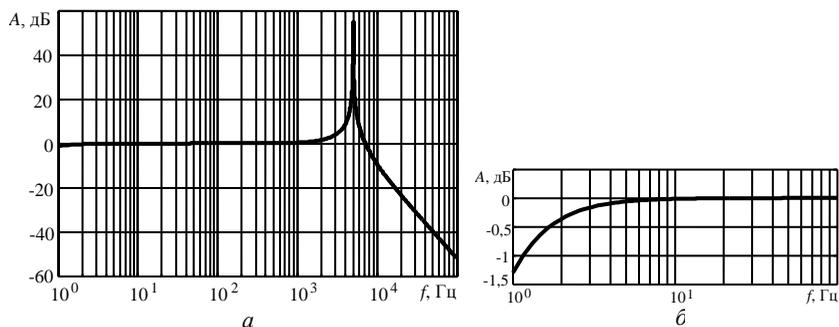


Рис.5. ЛАЧХ, полученная по передаточной функции (1) (а); низкочастотный участок ЛАЧХ (б)

Таким образом, при проектировании импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике были достигнуты требуемые параметры, а результаты расчетов проверены моделированием на тестовой схеме. В результате применения метода оценки параметров  $LC$ -фильтра удалось спроектировать компактный высоковольтный фильтр.

### Список литературы

1. Вдовин, С.С. Проектирование импульсных трансформаторов/ С.С. Вдовин. – Изд. 2-е, перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.
2. Гончарук, А.И. Расчет и конструирование трансформаторов/ А.И. Гончарук. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 256 с.
3. Colonel WM., McLyman T. Transformer and inductor design handbook third edition, revised and expanded [Электронный ресурс] / Kg Magnetics, Inc. Idyllwild, California, U.S.A. – Режим доступа: [https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr\\_design/](https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr_design/) (дата обращения 07.09.2020).
4. Powder core catalog [Электронный ресурс] / Magnetics Inc. – Режим доступа: [https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCore\\_Catalog.pdf](https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCore_Catalog.pdf) (дата обращения 07.09.2020).
5. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности/ Ю.Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт. – 2005. – 320 с.
6. Magnetics design 4 – Power Transformer Design [Электронный ресурс] / Texas Instruments. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf> (дата обращения 07.09.2020).
7. Савин, М. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя/ М. Савин, С. Абрамов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2019. – № 8 (189). – С. 40-44.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

А.А. Анисимов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АКТИВНОГО  
СИЛОВОГО ФИЛЬТРА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ  
БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ**

RESEARCH OF A SEQUENTIAL MULTILEVEL ACTIVE POWER FILTER  
WITH A CONTROL SYSTEM BASED ON THE FAST FOURIER TRANSFORM

*Разработаны компьютерные модели и проведено моделирование работы силового фильтра с использованием быстрого преобразования Фурье для нахождения временных параметров основной гармоники.*

*Computer models have been developed and the power filter operation has been simulated using the fast Fourier transform to find the time parameters of the fundamental harmonic.*

*Ключевые слова: Быстрое преобразование Фурье, активный силовой фильтр, спектральный анализ.*

*Keywords: fast Fourier transform, active power filter, spectral analysis.*

Быстрое преобразование Фурье уже многие годы служит основным методом спектрального анализа сигналов. Для активных силовых фильтров важно нахождение исключительно первой гармоники сигнала. Развитие промышленных микропроцессоров и введение возможности аппаратного умножения чисел с плавающей точкой, позволяет использовать даже столь ресурсоёмкий алгоритм для управления фильтром. Существуют иные алгоритмы управления силовыми фильтрами такие как PQ [1] или разобранный в [2] алгоритм. Преимуществом быстрого преобразования Фурье можно назвать возможность нахождения амплитуды основной гармоники, возможность работы только с одним входным сигналом, возможность наглядного представления исходных искажений. Недостатками являются предопределённость исследуемой частоты и большие вычислительные затраты прямо зависящие от частоты запуска алгоритма.

Для анализа работы системы была разработана модель структурная схема, которой представлена на рис. 1. При работе в стандартном режиме при расчётной частоте, фильтр работает эффективно (рис.2.), но при изменении частоты возникают негативные эффекты, связанные с несовпадением частоты на которой основную гармонику рассчитывает спектральный анализ и реальной частотой основной гармоники. Подробнее можно рассмотреть это явление на рис. 2. где представлено сравнение полученного путём преобразования сигнала первой гармоники и точного её значения. Расчёт параметров производился при частоте 51 Гц, и настройке быстрого

преобразования Фурье на 50 Гц. Преобразование проводилось каждые 0,02 с. В качестве силовой части фильтра использовался многоуровневый инвертор.



Рис. 1. Структурная схема

Параметры моделирования были выбраны исходя из наглядности результатов, при нормальном отклонении частоты в 0,04 Гц графики визуально сливаются, но само отклонение остаётся.

При моделировании точность воспроизведения основной гармоники напрямую зависит от разницы предполагаемой и фактической частот, частоты проведения быстрого преобразования Фурье.

Согласно результатам моделирования быстрое преобразование Фурье, хорошо подходит для реализации активных силовых фильтров, при условии достаточной стабильности частоты. В случае возможного отклонения частот,

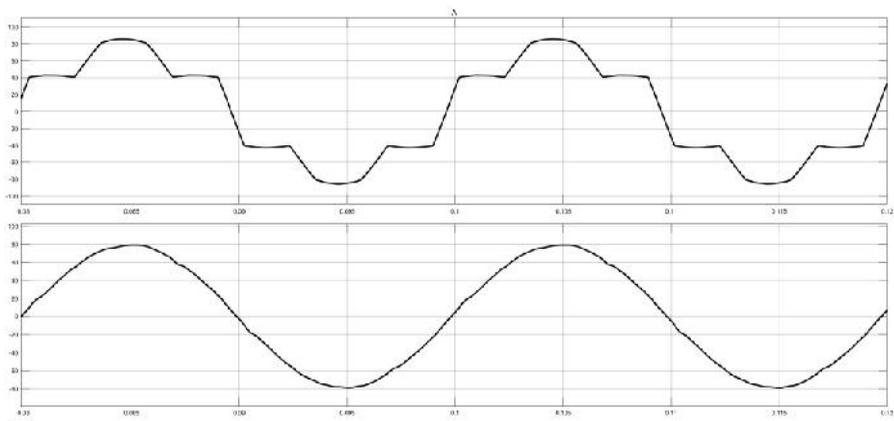


Рис.2. Исходный и скорректированный сигналы

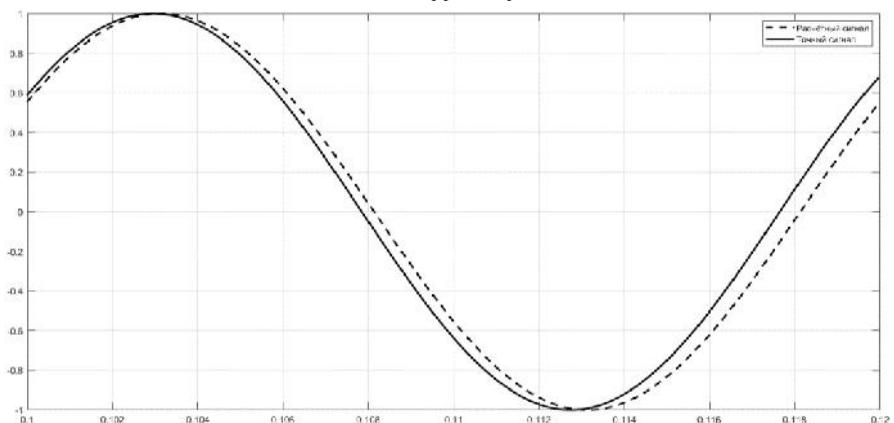


Рис.3. Расчётный и точный сигналы

возможными решениями видятся уменьшение интервалов между анализом или же использование алгоритмов, позволяющих определить период сигнала заранее [2].

### Список литературы

1. *Pinto, J.G.* Transformerless Series Active Power Filter to Compensate Voltage Disturbances / J.G. Pinto, Helder Carneiro, Bruno Exposto, Carlos Couto, João L. Afonso // Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). - Birmingham, United Kingdom, 2011. - P. 1-6.

2. *Андрянов, А.И.* Активный силовой фильтр последовательного типа с усовершенствованной системой управления. / А.И. Андрянов, А.А. Аанисимов. // Вестник Брянского государственного технического университета. Брянский государственный технический университет. – 2017. – №. 6. – С. 39-46.

*Материал поступил в редколлегию 05.10.20.*

А.А. Анисимов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **ПРИМЕНЕНИЕ EasyEDA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ В ДИСТАНЦИОННОМ УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

APPLICATION OF EasyEDA FOR ELECTRONICS SIMULATION  
WITHIN REMOTE LEARNING PROCESS

*Рассмотрены возможности использования онлайн-сервиса easyEDA для моделирования работы мобильных устройств.*

*The possibilities of using the online service easyEDA to simulate the operation of mobile devices are considered.*

*Ключевые слова: онлайн моделирование, моделирование электроники.*

*Keywords: online modeling, electronics modeling.*

В условиях самоизоляции очное проведение занятий со студентами не представляется возможным, даже в обычной ситуации иногда возникают ситуации, когда студент не может присутствовать на занятиях очно. Это может быть связано с болезнью, сложными жизненными обстоятельствами или иными причинами. В такой ситуации, необходимо обеспечить возможность дистанционного выполнения лабораторных работ. При этом возникает ряд задач:

а) Все работы должны выполняться без финансовых затрат со стороны студента. Соответственно использование платных программ или покупка студентами оборудования невозможна. Отсюда следует, что исследовать работу электронных устройств, придётся исключительно с помощью компьютерного моделирования.

б) Ограниченный доступ к сети интернет. Не у всех учащихся есть возможность скачивать специальные программы, зачастую их доступ в интернет лимитирован.

в) Ограниченные возможности компьютера. Среда работы должна работать на подавляющем большинстве устройств с различными операционными системами.

г) Простота реализации проектов. Студент должен тратить время не на изучение программного продукта, а на освоение знаний по электронике. Программа не должна быть перенасыщена возможностями и настройками, а проста и интуитивно понятна.

Очевидно, что компьютерное моделирование не сравнится по наглядности и возможностям с непосредственным исследованием

электронного оборудования, но в некоторой мере может его заменить. Согласно требованиям, озвученным выше, наиболее подходящей средой для работы оказался онлайн-сервис easyEDA.

Данный сервис:

- а) бесплатный;
- б) кроссплатформенный;
- в) не требует установки;
- г) прост в освоении;
- д) имеет низкие технические требования.

Близким к данному комплексу является SystemVision Cloud, но он не имеет перевода на русский язык и более сложен в освоении. SystemVision обладает большими возможностями, чем EasyEDA, но рамках учебной работы с простыми схемами электронных устройств его возможности излишни.

Рассмотрим рабочее поле EasyEDA рис. 1 (режим моделирования sim). Левая панель, изначально открыта вкладка проект, в ней хранится информация структуре проекта. Для работы используется вкладка eelib (1).

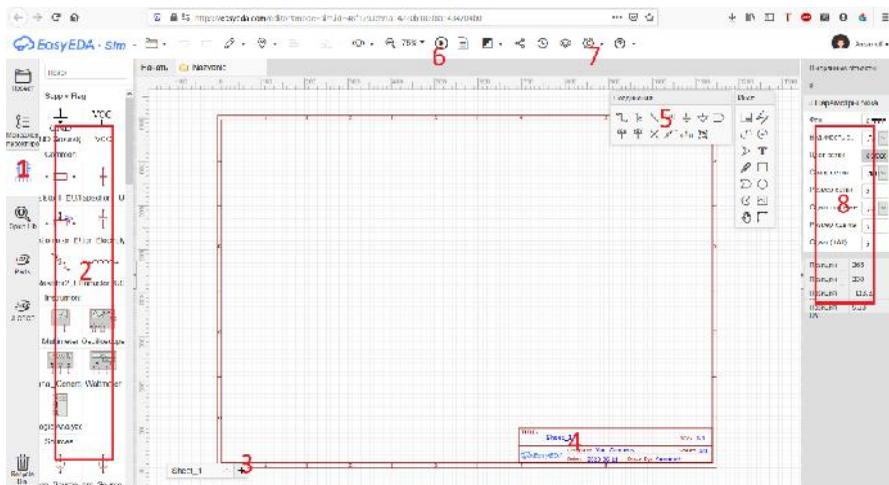


Рис. 1. Рабочее поле проекта

Она даёт доступ к библиотеке моделируемых компонентов (2). В центре расположена область, на которой собираются схемы, она называется лист. Можно создать несколько рабочих областей (3) и подписать каждый лист (4). Что позволяет отслеживать выполнял ли моделирование конкретный студент,

и обеспечивает выполнение любой работы в рамках одного проекта. Для соединения элементов схемы между собой используется панель инструментов (5). Для запуска моделирования необходимо сохранить проект и нажать на значок запуска (6). Возможны настройки внешнего вида и других параметров проекта (7). На правой панели расположено меню выбранного элемента (8). В зависимости от компонента параметры в этой области – изменяются, здесь же можно изменять его внутренние параметры.

Система выполнена весьма стандартно, все необходимые элементы управления собраны в одном месте. Работы по моделированию выполняются студентами без особых сложностей.

К недостаткам EasyEDA можно отнести:

- а) Скудность библиотеки.
- б) Для запуска моделирования необходимо обязательно установить компонент – земля.
- в) Несуразная система работы логических элементов. Для корректной работы необходимо, чтобы хотя бы на один вход, хотя бы одного логического элемента на листе приходил высокий уровень сигнала. Данное упущение разработчики обещали исправить.
- г) На панели вывода сигналов можно создать не более трёх осей.

За использованием виртуальных систем моделирования лежит будущее, уже сейчас ряд работ эффективнее выполняется онлайн. В дальнейшем рост производительности серверов позволит использовать сложнейшие системы моделирования на смартфоне, или даже умном телевизоре. Отказ от необходимости покупки и установки программного обеспечения экономит не только деньги пользователя, но и его время. У нас появляется возможность, всегда использовать, самую свежую версию программ, делиться проектами и работать совместно. Подобные решения стали оптимальным выходом в период самоизоляции и остаются таковым для многих нестандартных ситуаций.

### Список литературы

1. SystemVision Cloud // Обучающий раздел SystemVision Cloud – URL: <https://www.systemvision.com/learn/tutorial> (дата обращения: 15.09.2020).
2. EasyEDA Tutorial // руководство пользователя EasyEDA – URL: <https://docs.easyeda.com/en/FAQ/Editor/index.html#Tutorial> (дата обращения: 15.09.2020).

*Материал поступил в редколлегию 05.10.20.*

Д.А. Архипова, А.Р. Юсупова  
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

**СРАВНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА  
С АЛГОРИТМОМ СЛЕПОГО ПОИСКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ  
РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ**

COMPARISON OF A SEQUENTIAL ALGORITHM WITH A BLIND SEARCH  
ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF PLACING ELEMENTS  
ON A PRINTED CIRCUIT BOARD

*Представлены исследования эффективности работы последовательного и слепого алгоритма в задаче размещения конструктивных элементов. Основной идеей последовательного алгоритма является получение оптимального размещения при расположении максимально связанных конструктивных элементов в соседних позициях. Главной идеей метода слепого поиска является случайный выбор позиции из числа не занятых позиций, на которой закрепляется подлежащий размещению элемент, начиная с первого.*

*The paper presents studies of the effectiveness of sequential and blind algorithms in the problem of placing structural elements. The main idea of the sequential algorithm is to obtain the optimal placement when placing the most connected structural elements in neighboring positions. The main idea of the blind search method is to randomly select a position from among the unoccupied positions, where the element to be placed is fixed, starting from the first one.*

*Ключевые слова: задача размещения, метод слепого поиска, последовательный алгоритм, эффективность.*

*Keywords: placement problem, blind search method, sequential algorithm, efficiency.*

Основная задача размещения формулируется следующим образом: минимизировать суммарную взвешенную длину связей. Поместить каждый элемент графа в единственную позицию таким образом, чтобы оптимизировать целевую функцию.

Дискретные алгоритмы размещения используют дискретные методы оптимизации. Если имеется  $n$  установочных мест, в которых нужно разместить  $k$  элементов, то полный перебор всех возможных вариантов размещения  $k$  элементов в  $n$  установочных местах составит  $C_n^k n!$ . При большом числе  $n$  и  $k$  эта задача практически может оказаться неосуществимой, поэтому в этом методе применяют подходы, которые позволяют сделать направленных перебор возможных вариантов размещения.<sup>[1]</sup>

Целью представленной работы является исследование эффективности применения последовательного алгоритма и метода слепого поиска к задаче размещения элементов на печатной плате. Проведем эксперимент и сравним по скорости решения и значению целевой функции последовательного алгоритм и метод слепого поиска.

Первым рассмотрим последовательный алгоритм размещения.

Основной идеей этого алгоритма является идея упорядочения элементов по определенным признакам. Последовательные алгоритмы основаны на допущении, что для получения оптимального размещения необходимо в соседних позициях располагать элементы, максимально связанные друг с другом. Сущность этих алгоритмов состоит в последовательном закреплении заданного набора конструктивных элементов на коммутационной плате относительно ранее установленных. Выбор очередного элемента для размещения осуществляется путем вычисления следующей характеристики для каждого неразмещенного элемента  $e_i \in \overline{E}_k$ .

$$a_j = \max_{e_i \in \overline{E}_k} \sum c_{ij}$$

Решение задачи размещения с помощью последовательного алгоритма в отличие от метода слепого поиска, где алгоритм из множества случайного перебора находит наиболее оптимальное значение целевой функции, проходит в один этап перебора всех элементов.

Пошаговая инструкция последовательного алгоритма размещения конструктивных элементов:<sup>[2]</sup>

1. Вычислить матрицу смежности  $C = \parallel c_{ij} \parallel$ .
2. Для каждой строки матрицы смежности определить локальную степень каждой вершины  $\rho(x_i) = \sum_{j=1}^n c_{ij}$
3. Выбрать строку в матрице смежности, соответствующую вершине  $x_s$  с наибольшей локальной степенью. Номер выбранной строки соответствует номеру конструктивного элемента.
4. Поместить выбранный конструктивный элемент в первую позицию на монтажной плате. Исключить первую позицию из подмножества  $\overline{S}_k$ , а вершину  $x_s$  из подмножества  $\overline{E}_k$ .
5. Для каждого неразмещенного элемента  $e_j \in \overline{E}_k$  вычислить  $a_j = \max_{e_i \in \overline{E}_k} \sum c_{ij}$
6. Поместить конструктивный элемент с наибольшим значением  $a_j$  в очередную позицию из подмножества  $\overline{S}_k$ . Исключить номер очередной занятой позиции из подмножества  $\overline{S}_k$ , а вершины  $x_s$  из подмножества  $\overline{E}_k$ .
7. Если подмножество  $\overline{S}_k$  не пусто, то переходим к пункту 5.
8. Конец работы алгоритма.

В методе слепого поиска случайным образом выбирается позиция из числа незанятых позиций и на ней закрепляется подлежащий размещению элемент, начиная с первого. Эта же процедура выполняется для следующих элементов до тех пор, пока все элементы не будут размещены. По результатам размещения вычисляется значение целевой функции  $F$ . Указанную процедуру повторяем вновь и получаем новую целевую функцию. Сравнивая полученные значения целевой функции, запоминаем размещение, для которого это значение будет наименьшим. Наша программа проходит 20 итераций.

Разберем метод слепого поиска по шагам.<sup>[2]</sup>

Замечание. Обозначим  $n$  – число размещаемых конструктивных элементов;

1. Пронумеровать все возможные позиции для размещения конструктивных элементов в порядке от 1 до  $m$

2. С использованием датчика случайных чисел с равномерным распределением генерировать  $n$  случайных чисел (по числу размещаемых элементов) в интервале  $(l, m_1)$ .

3. Разместить конструктивные элементы в позициях, номера которых выбраны случайно в п. 2. Вычислить значение целевой функции  $F$ .

4. Если это первая итерация, то полученное значение  $F$  запоминается как  $F_{\text{опт}}$ . При выполнении всех последующих итераций полученное значение  $F$  запоминается как  $F_{\text{опт}}$  только в том случае, если оно оказывается меньше полученного на предыдущей итерации.

5. Запомнить полученное размещение конструктивных элементов.

6. Проверяется условие, все ли элементы размещены. Если оно не выполняется, то осуществляется переход к п. 2, в противном случае – к п. 7

7. Конец алгоритма.

Для исследования эффективности двух алгоритмов в работе были взяты две программные реализации этих алгоритмов на примере решения задач о размещении конструктивных элементов на печатной плате. Для исследования эффективности работы было сгенерировано 10 различных графов размерности от 4 до 70 элементов. Некоторые данные результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты

Количество элементов	Последовательный алгоритм		Алгоритм слепого поиска	
	Время выполнения алгоритма	Значение целевой функции	Время выполнения алгоритма	Значение целевой функции
4	0.04	10	0.13	10
4	0.53	26	0.60	26
9	0.13	28	0.18	32

Количество элементов	Последовательный алгоритм		Алгоритм слепого поиска	
	Время выполнения алгоритма	Значение целевой функции	Время выполнения алгоритма	Значение целевой функции
9	0.18	138	0.34	142
16	0.13	94	0.22	116
16	0.26	376	0.36	388
25	0.14	210	0.31	216
25	0.75	692	0.83	700
36	0.39	480	0.52	484
36	0.61	1214	0.65	1220
49	0.132	746	0.66	762
64	0.190	1032	0.91	1080

### Выводы

В данной работе было проведено исследование эффективности работы двух алгоритмов. В качестве параметров эффективности выбрали значения целевой функции и время работы алгоритма. Мы провели исследование для разных графов с одинаковыми вершинами. Из полученных результатов видно, что целевая функция последовательного алгоритма размещения составляет 10% от величины целевой функции слепого алгоритма размещения, что свидетельствует, что последовательный алгоритм позволяет получить более точные значения. По времени выполнения последовательный алгоритм работает более быстро, но если количество соединения элементов друг с другом увеличивается, то время выполнения алгоритма значительно увеличивается. Метод слепого поиска дает точное значение целевой функции только при маленьком количестве элементов.

### Список литературы

1. *Деньдобренко, Б.Н.* Автоматизация конструирования РЭС/ Б.Н. Деньдобренко, А.С. Малика. – Москва: Высш. школа, 1980. – 366 с.
2. *Криптофидес, Н.* Теория графов. Алгоритмический подход/ Н. Криптофидес. – М.: Мир, 1978. - 432 с.

*Материал поступил в редколлегию 02.10.20.*

В.П. Бабенко, В.К. Битюков, М.С. Костин  
(г. Москва, МИРЭА – Российский технологический университет)

## **БЕЗДРОССЕЛЬНЫЙ DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НАКАЧКОЙ ЗАРЯДА**

### **CHOKELESS DC / DC CHARGE PUMP CONVERTER**

*Представлены результаты исследования коммутационных процессов в устройствах с накачкой заряда, способы повышения эффективности. Схемотехническое моделирование позволило уточнить характеристики процессов, минимизировать потери преобразования, сформулировать рекомендации по выбору параметров элементов преобразователей и формированию сигналов управления.*

*The research results of switching processes in devices with charge pumping as well as methods for increasing their efficiency are presented. Circuit modelling allows to clarify the characteristics of the processes, minimize conversion losses, formulate recommendations for the choice of parameters of the transducer elements, and generate control signals.*

*Ключевые слова: DC/DC преобразователь с накачкой заряда, зарядовый насос, преобразователь на переключаемых конденсаторах.*

*Keywords: DC / DC charge pump converter, charge pump, switched capacitor converter.*

При питании мобильных приборов от общего источника питания – аккумулятора, батареи, а иногда от единственного низковольтного элемента питания, возникает необходимость обеспечить более высокое напряжение, либо напряжение иной полярности или одновременно несколько различных напряжений питания. Традиционно дроссельные DC/DC преобразователи достаточно успешно справляются с подобными задачами. Однако в малопотребляющих и высокоинтегрированных электронных системах все чаще предпочтение отдается микросхемам DC/DC преобразователей без использования индуктивных элементов [1, 2]. Функционально они могут выполнять те же преобразования напряжения, что и дроссельные, т.е. повышать, понижать и инвертировать выходное напряжение без использования дорогих дросселей и трансформаторов, но имеют превосходные массогабаритные характеристики, высокий КПД, а также совместимы с интегральной технологией.

В простейших топологиях преобразователей [3], показанных на рис. 1, единственный «летающий» конденсатор  $C1$  перекачивает заряд из входной цепи в выходную с помощью пары сдвоенных ключей  $S1, S3$  и  $S2, S4$ , управляемых противофазными сигналами  $\Phi1, \Phi2$  с контроллера управления.

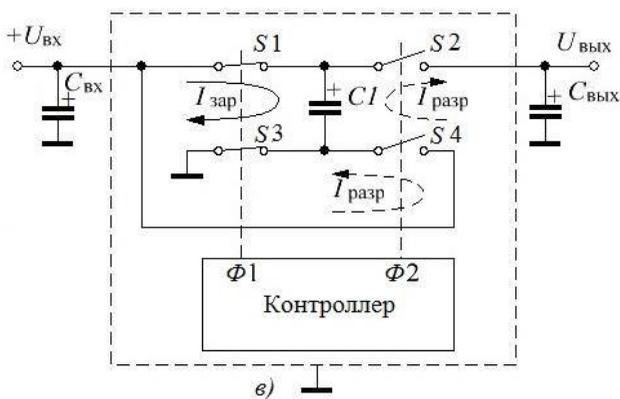
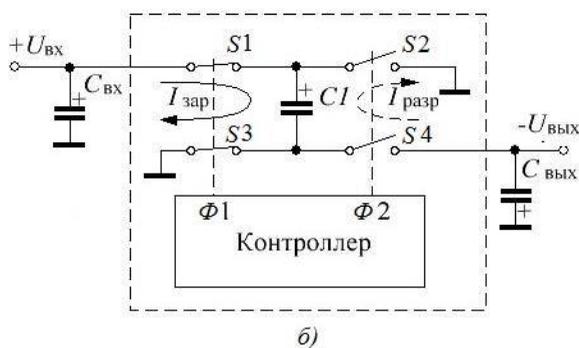
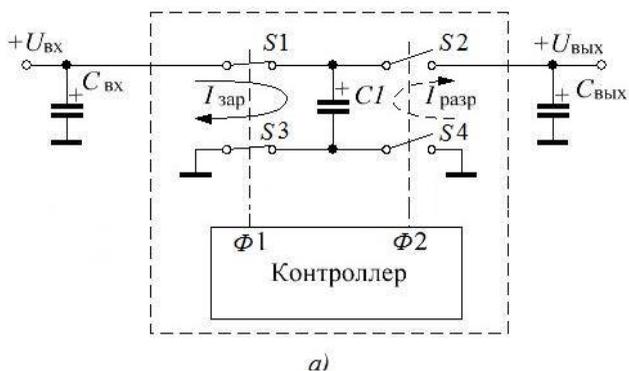


Рис. 1. Базовые топологии зарядового насоса с единственным «летающим» конденсатором:  
 а – неинвертирующий повторитель; б – инвертирующий повторитель;  
 в – удвоитель выходного напряжения

Направление тока заряда  $I_{\text{зар}}$  при замкнутых ключах  $S1, S3$  показано сплошной линией. Конденсатор  $C1$  заряжается от входного источника до напряжения  $U_{\text{вх}}$ . Направление тока заряда  $I_{\text{зар}}$  показано сплошной линией. При разомкнутых ключах  $S1, S3$  и замкнутых  $S2, S4$  заряженный конденсатор  $C1$  передает заряд конденсатору  $C2$ , т.е. происходит перераспределение заряда между конденсаторами  $C1$  и  $C2$ . Направление тока разряда  $I_{\text{разр}}$  показано пунктирной линией. Управляющий контроллер формирует сигналы коммутации  $\Phi1, \Phi2$ , задержанные относительно друг друга, так чтобы избежать возникновения сквозных токов через ключи. Термин «летающий» конденсатор  $C1$  связан с переключением, перелетом конденсатора от входной цепи к выходной. Конденсатор  $C2$  называют накопительным конденсатором или конденсатором фильтра, обеспечивающим сглаживание пульсаций выходного напряжения. При перекачке заряда малыми порциями и с достаточно высокой частотой коммутации выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  практически равно входному напряжению  $U_{\text{вх}}$ , но с гальванической развязкой входной и выходной цепи.

На рис. 1, б приведена топология бездроссельного инвертирующего повторителя (инвертора напряжения), у которого, по сравнению со схемой, показанной на рис. 1, а, поменялись местами потенциальный и общий вывод. При подключении отрицательного вывода повторителя с помощью ключа  $S4$  (рис. 1, в) к плюсу питания  $U_{\text{вх}}$  на выходе зарядового насоса получается сумма напряжений входного источника и выходного напряжения повторителя  $U_{\text{вых}} \approx 2U_{\text{вх}}$ , но уже без гальванической развязки входной и выходной цепей. Бездроссельные преобразователи без регулировки выходного напряжения или с дискретным регулированием принято называть зарядовым насосом или преобразователем с подкачкой (или накачкой) заряда. При наличии в структуре зарядного насоса какого-либо механизма плавной регулировки выходного напряжения подобные DC/DC преобразователи обычно относят к классу преобразователей на переключаемых конденсаторах. На рынке присутствует значительное разнообразие интегральных преобразователей с накачкой заряда с различными функциональными особенностями, имеющие более сложную топологию с несколькими переключаемыми конденсаторами [4, 5].

При проектировании устройств с подобными преобразователями необходимо учитывать не только особенности процессов обмена энергией в коммутируемых конденсаторах, способы, которыми достигается высокая эффективность преобразователя, а также учитывать особенности коммутационных процессов в переходных режимах работы. Схемотехническое моделирование позволяет изучить коммутационные процессы, минимизировать потери преобразования, обеспечить большой КПД, оптимизировать частоту переключения.

В качестве среды моделирования была использована программа Electronics Workbench (EWB), что обусловлено спецификой поставленной

задачи. Программа EWB давно и успешно используется в подготовке специалистов радиоэлектронного профиля в высшей школе при проведении имитационного моделирования, отличается удобным, интуитивно понятным интерфейсом. Кроме традиционного Spice анализа EWB позволяет пользователям подключать к исследуемой схеме виртуальные контрольно-измерительные приборы, приближенные к реальным аналогам. В EWB имеется встроенная обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, большой набор методов анализа различных характеристик электронных схем. Накоплен значительный опыт и существует обширная литература по использованию EWB в разных областях аналоговой и цифровой электроники [2, 6]. Имеется библиотека мощных *n*- и *p*-канальных MOSFET транзисторов фирм International Rectifier и Zetex Semiconductors [7, 8].

Для исследования была использована схема преобразователя с удвоением выходного напряжения (рис. 1, в), в которой условные ключи *S* заменены на традиционные в силовой электронике MOSFET. Схема, приведенная на рис. 2, содержит необходимое электронное обрамление ключей и элементы контроля. Транзисторы *Q1...Q4*, управляемые драйверами *V4...V7*, выполняют коммутацию токов заряда/разряда «летающего» конденсатора *C1*. Источником входного напряжения является *V1* (Battery) с напряжением  $U_{BX}=+10$  В. Выход преобразователя нагружен на резистор нагрузки *R3* и накопительный конденсатор *C2*.

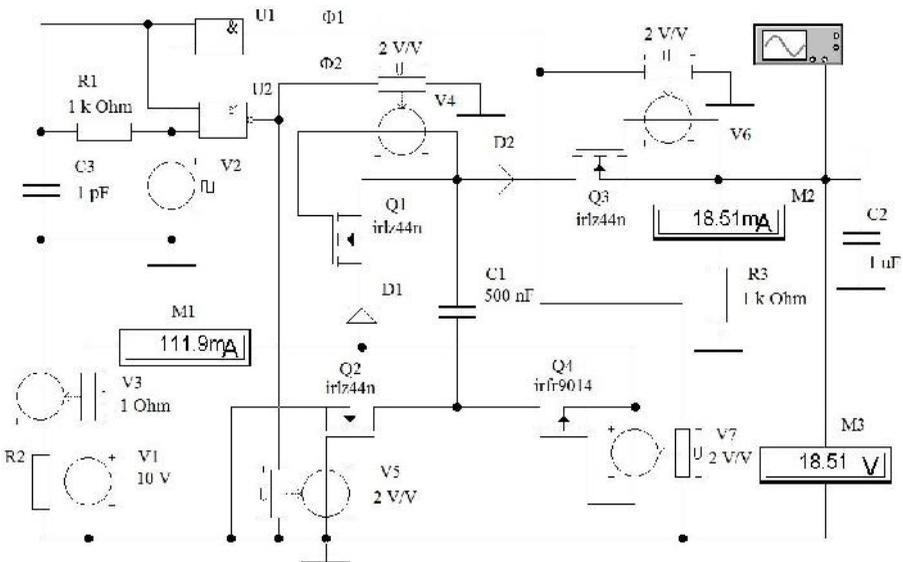


Рис. 2. Схема для исследования преобразователя с накачкой заряда в режиме удвоителя напряжения

Формирователь импульсов управления ключами, выполненный на логических элементах  $U1$ ,  $U2$ , преобразует импульсы синхронизирующего генератора  $V2$  в импульсы управления ключами  $\Phi1$ ,  $\Phi2$ , сдвинутые по фазе на  $180^\circ$ , содержащие блокирующий временной интервал Dead Time (DT) для защиты от сквозных токов на интервал времени, когда один из последовательно включенных ключей открывается, а второй еще не успел закрыться. Время задержки DT обеспечивается регулировкой постоянной времени цепи  $R1C3$ . Драйверы  $V4\dots V6$  преобразуют логический сигнал управления в гальванически независимое напряжение, подаваемое между затвором и истоком MOSFET ключей.

Ключи  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$ , коммутирующие положительное напряжение, выполнены на MOSFET с  $n$ -каналом. Ключ  $Q4$  удобнее выполнить на транзисторе с  $p$ -каналом, так как он коммутирует отрицательное напряжение. Для надежного отпирания транзисторов требуется напряжение  $U_{зи}$  порядка 10 В. При уровнях, обеспечиваемых логическими элементами +5 В, необходимое повышение управляющего напряжения транзисторов обеспечивается выбором соответствующего коэффициента преобразования драйверов  $V4\dots V7$ . Наличие у MOSFET паразитного технологического диода, шунтирующего канал транзистора при смене полярности напряжения между стоком и истоком [8], приводит к необходимости подключения последовательно с ключами  $Q1$ ,  $Q4$  дополнительных диодных ключей  $D1$ ,  $D2$  с малыми потерями (диоды Шоттки), блокирующих MOSFET при смене полярности. Полярность напряжения у ключей  $Q2$ ,  $Q3$  в процессе работы не изменяется. Поэтому им не требуется блокировка диодами.

Постоянная составляющая выходного напряжения  $U_{вых=}$  и тока входного источника  $I_{вх=}$  контролировалась вольтметром  $M3$  и амперметром  $M2$ . Контроль импульсной составляющей входного тока  $I_{вх max}$  выполнялся с помощью осциллографа и преобразователя  $V3$  (Current Controlled Voltage Source), преобразующего ток в соответствующее гальванически развязанное напряжение. Временные диаграммы работы схемы приведены на рис. 3.

Логическое комбинирование на элементах  $U1$ ,  $U2$  входного импульса (диагр. *а*, рис. 3) и импульса, задержанного после  $RC$  цепи (диагр. *б*, рис. 3), позволило получить импульсы управления  $\Phi1$ ,  $\Phi2$  с временной задержкой DT (диагр. *в* и *г*, рис. 3). Время задержки коммутирующих импульсов составляло около  $t_3 = 80$  нс, что достаточно для блокирования сквозных токов через ключи.

Входной ток преобразователя (диагр. *д*, рис. 3) содержит постоянную составляющую малой величины  $I_{вх=}=0,687$  А (контролировалось амперметром  $M1$ ), практически не заметную на фоне мощных коротких импульсов тока, возникающих в момент заряда «летающего» конденсатора.

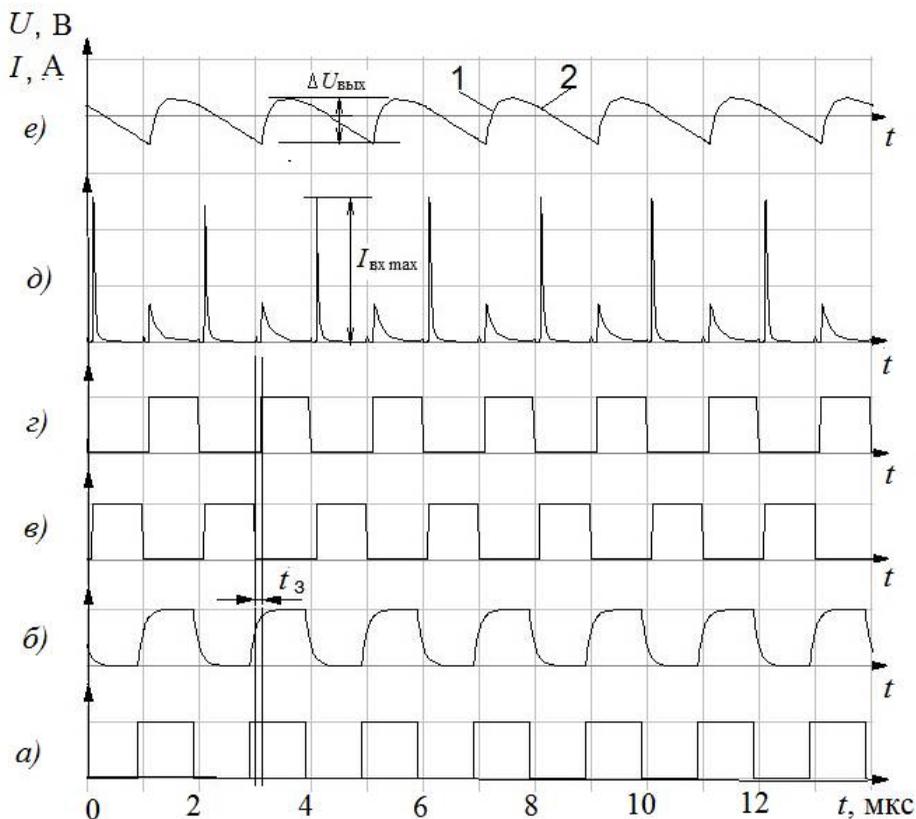


Рис. 3. Временные диаграммы: а – тактовые импульсы генератора V2;  
 б – напряжение на конденсаторе C1;  
 в и г – напряжение задержанного импульса на выходах ЛЭ U1 и U2;  
 д – входной ток преобразователя  $I_{вх}$ ; е – напряжение пульсаций на выходе преобразователя  $\Delta U_{вых}$

Пиковое значение входного тока составляло  $I_{вх\ max} \approx 80$  А при длительности импульсов менее 0,1 мкс контролировалось осциллографом. Форма напряжения пульсаций выходного напряжения  $\Delta U_{вых} \approx 200$  мВ (диагр. е, рис. 3) складывается из участка «1» экспоненциально нарастающего напряжения, связанного с зарядом конденсатора C2 в момент подключения «летающего» конденсатора C1 к источнику входного напряжения V1, и участка «2» - разряда конденсатора C2 на сопротивление нагрузки R3.

Графики зависимости выходного напряжения  $U_{вых=}$  от тока нагрузки  $I_{вых=}$  (нагрузочная характеристика) для двух значений емкости «летающего» конденсатора приведены на рис. 4 (граф. 1 и 2).

В исследуемом диапазоне выходных напряжений графики  $U_{\text{вых}}$  имеют линейно падающий характер, который удобно описывать параметром выходного эквивалентного сопротивления  $R_{\text{эКВ}}$  зависящего от емкости «летающего» конденсатора  $C1$  и частоты преобразования  $f$ . При частоте  $f = 500$  кГц и  $C1=0,5$  мкФ значение  $R_{\text{эКВ}}$  составляло 11,2 Ом, а при увеличении емкости конденсатора  $C1$  до 1 мкФ значение  $R_{\text{эКВ}}$  снижалось 9,0 Ом.

Установлено, что коэффициент передачи напряжения со входа на выход  $k_{\text{пр}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  возрастет с уменьшением тока нагрузки и в режиме холостого хода значение выходного напряжения достигает 19,8 В, то есть практически удвоенного входного напряжения ( $k_{\text{пр}} \approx 2$ ).

Более того, с ростом выходного тока линейно растет выходная мощность  $P_{\text{вых}}$  (рис. 4, граф. 3). Однако КПД достигает максимума (свыше 90 %) при выходном токе  $I_{\text{вых}} = 25 \dots 30$  мА и уменьшается до 80 % при токах 350...400 мА (рис. 4, граф. 4).

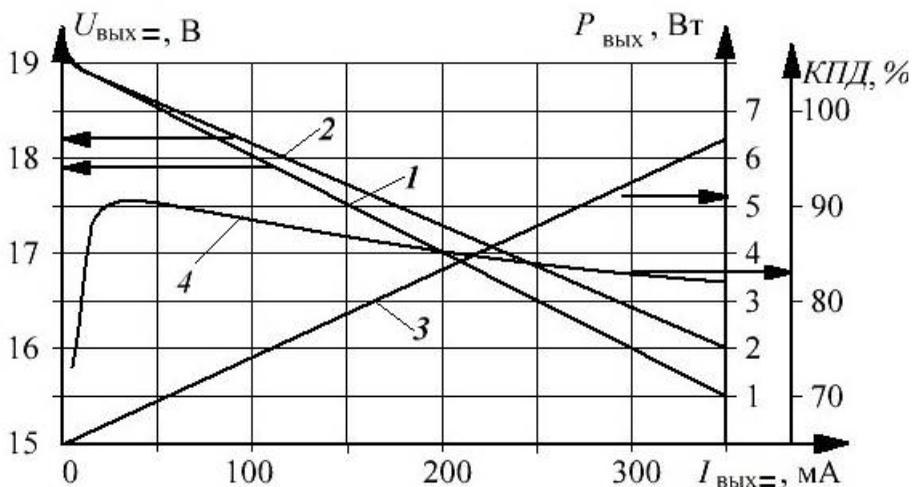


Рис. 4. Зависимость энергетических характеристик преобразователя от выходного тока  $I_{\text{вых}}$ :

1 и 2 - постоянная составляющая выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ ;  
 1 - для  $C1=0,5$  мкФ и 2 - для  $C1=1,0$  мкФ; 3 - выходная мощность  $P_{\text{вых}}$ ; 4 - КПД

Выходное эквивалентное сопротивление  $R_{\text{эКВ}}$  экспоненциально снижается при увеличении емкости «летающего» конденсатора  $C1$  и частоты коммутации  $f$  (рис. 5) и в пределе стремится к величине  $R_{\text{эКВ}}=2 \dots 3$  Ом, обусловленной потерями в ключах.

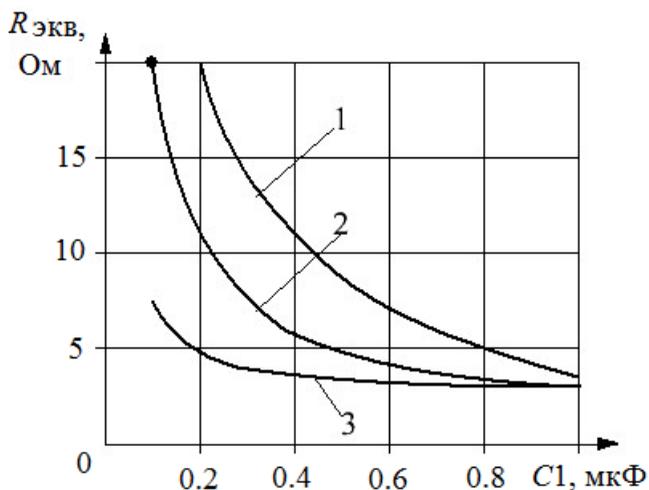


Рис. 5. Зависимость выходного эквивалентного сопротивления  $R_{\text{экв}}$  от емкости конденсатора  $C1$  и частоты  $f$ :  
 1 – 200 кГц; 2 - 500 кГц; 3 -  $f=1000$  кГц

#### Список литературы

1. Яблоков, Д. Современные микропотребляющие DC/DC преобразователи для приборов с батарейным питанием / Д. Яблоков // Компоненты и технологии. – 2005. – №2. – С. 96-99.
2. Битюков, В.К. Источники вторичного электропитания / В.К. Битюков, Д.С. Симачков, В.П. Бабенко. – 3-е изд. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 376 с.
3. Бабенко, В.П. Схемотехническое моделирование DC/DC преобразователей/ В.П. Бабенко, В.К. Битюков, Д.С. Симачков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14. – № 11. – С. 69-82.
4. DC-DC conversion without inductors. Maxim Integrated Product. Appnote 725. 22 July. 2009.
5. The forgotten converter. Charge-pump basics. Operation. Texas Instruments Incorporated. SLPY005. 2 July 2015.
6. Бабенко, В.П. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключах/ В.П. Бабенко, В.К. Битюков, В.В. Кузнецов, Д.С. Симачков // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6. – № 1(21). – С. 20-39.
7. Бабенко, В.П. Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе ELECTRONICS WORKBENCH/ В.П. Бабенко, В.К. Битюков // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 2. – С. 199-205.
8. Бабенко, В.П. Схемотехника формирователей паузы задержки DEAD TIME в силовых ключах/ В.П. Бабенко, В.К. Битюков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 615-620.

Материал поступил в редколлегию 24.09.20.

К.А. Батенков

(г. Орёл, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ  
ПРОДУКТОВ RIVERBED IT GURU И MODELER  
В УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ**

POSSIBILITIES OF USING RIVERBED IT GURU AND MODELER SOFTWARE  
PRODUCTS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

*Описаны возможности использования программных продуктов Riverbed IT Guru и Modeler при исследовании сетей связи.*

*The possibilities of using the software products Riverbed IT Guru and Modeler in the study of communication networks are described.*

*Ключевые слова: Riverbed, сеть связи, моделирование.*

*Keywords: Riverbed, communication network, simulation.*

Riverbed Technologies Inc. является ведущим разработчиком программного обеспечения для моделирования телекоммуникационных сетей и поставщиком решений, касающихся вопросов применения и управления сетью. Программное обеспечение данного производителя широко используется для научных исследований и разработок новых сетевых технологий, а также для оценки качества, тестирования и отладки сетей связи, протоколов и приложений [1, 2, 3]. Кроме того, рассматриваемое программное обеспечение внедрено в программы обучения огромного числа средних и высших учебных заведений. Riverbed в настоящее время поддерживает более десятка программных продуктов и бесчисленное количество специализированных модулей и моделей, которые могут быть полезными при изучении и оценке почти любой из современных сетевых парадигм [4, 5, 6].

Программное обеспечение Riverbed имеет простой в использовании графический пользовательский интерфейс, который может быть использован для построения различных сетевых конфигураций и проверки их производительности путем "перетаскивания" (drag-and-drop) соответствующих объектов [7]. Программное обеспечение Riverbed содержит огромную библиотеку моделей, которые эмулируют большинство существующих устройств и передовых протоколов связи. Такое обилие имитационных моделей делает возможным воссоздание самых сложных компьютерных сетей, а также настройку протоколов, которые реализуют самые современные телекоммуникационные технологии.

Riverbed IT Guru и Modeler являются одними из самых популярных программных пакетов для моделирования сетей [7]. Оба продукта позволяют изучать различные компьютерные сети, используя встроенные модели различных устройств связи, линий, протоколов, и широко используемых сетевых технологий. Однако в отличие от IT Guru Modeler имеет

дополнительную функциональность, которая позволяет создавать новые имитационные модели и модифицировать существующие.

Riverbed имеет университетскую программу, которая поддерживает бесплатные лицензии на программное обеспечение и скидки на техническую поддержку средних и высших учебных заведений по всему миру. В рамках университетской программы Riverbed бесплатно распространяется академическая версия IT Guru, базирующаяся на коммерческой версии IT Guru 9.1.

Университетская программа предоставляет полнофункциональные коммерческие версии IT Guru и Modeler квалифицированным преподавательским составам и студентами [7, 8]. Для их получения, необходимо отправить онлайн заявку. После того как университетская программа Riverbed подтвердит заявку, выдается либо установочный компакт-диск, либо предоставляется доступ для загрузки дистрибутива. Кроме того, предоставляется однодневная лицензия на обслуживание, которая позволяет обращаться непосредственно в службу технической поддержки Riverbed. Эта возможность может быть большим подспорьем для начинающих пользователей в случае возникновения проблем при установке программного обеспечения. В настоящее время, IT Guru и Modeler используют операционные системы Windows и Red Hat Linux.

#### Список литературы

1. *Батенков, К. А.* Анализ статистики голосового трафика сети Ethernet с помощью программы Wireshark / К. А. Батенков, А.В. Королев, А.Е. Миронов, А.Н. Орешин // Телекоммуникации. – 2018. – № 10. – С. 39–48.
2. *Батенков, К. А.* Числовые характеристики структур сетей связи / К. А. Батенков // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53). – С. 5–28.
3. *Батенков, К. А.* Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний / К. А. Батенков // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 1093–1118.
4. *Батенков, К. А.* Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости / К.А. Батенков, А.А. Батенков // Труды СПИИРАН. – 2018. – № 3 (58). – С. 128–159.
5. *Батенков, К. А.* Оценка параметров алгоритмов диспетчеризации на основе имитационного моделирования в программной среде Riverbed / К. А. Батенков, А.В. Королев, А.Е. Миронов, А.Н. Орешин // Телекоммуникации. – 2018. – № 8. – С. 17–23.
6. *Батенков, К. А.* Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости / К. А. Батенков // Труды СПИИРАН. – 2018. – № 3 (58). – С. 128–159.
7. *Sethi, A. S.* The Practical OPNET User Guide for Computer Network Simulation / Adarshpal S. Sethi, Vasil Y. Hnatyshin // CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. – 480 p.
8. *Батенков, К. А.* Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 1093–1118.

*Материал поступил в редколлегию 17.09.20.*

Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, К.Ю. Панькин  
(г. Саранск, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ДИОДАХ ШТЫРЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВНЕШНЕМ НАГРЕВЕ ОТ ИСТОЧНИКА КВАЗИБЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ**

**SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN POWER DIODES OF A PIN DESIGN WITH EXTERNAL HEATING FROM A QUASI-INFINITE POWER SOURCE**

*Приведены результаты моделирования тепловых процессов в силовых диодах штыревой конструкции при внешнем нагреве от источника квазибесконечной мощности. Приведена разработанная модель силового диода штыревой конструкции. Приведены результаты, показывающие то, как прогревается силовой диод при внешнем нагреве.*

*The article presents the results of modeling thermal processes in power diodes of a pin design with external heating from a source of quasi-infinite power. The developed model of a power diode of a pin design is presented. Results are given showing how the power diode warms up when externally heated.*

*Ключевые слова: внешний нагрев, двухмерная цилиндрическая структура, силовой диод, модель, TCAD, термокамера.*

*Keywords: external heating, two-dimensional cylindrical structure, power diode, model, TCAD, heat chamber.*

### **Введение.**

Надёжность современных мощных электрических преобразователей во много определяется тепловым и электрическим режимами силовых полупроводниковых приборов (СПП), которые являются их основой.

В связи с этим на всех стадиях эксплуатации СПП, к которым относятся силовые диоды (СД), тиристоры и транзисторы, подвергаются испытаниям в состоянии низкой и высокой проводимости с целью оценки их качества отбраковки потенциально ненадёжных приборов. Частично электрические испытания СПП проводятся при повышенной до предельного уровня температуры полупроводниковой структуры (ПП)  $T_j$ . При этом для повышения производительности процесса испытания важно обеспечить высокую скорость нагрева ПП до заданной температуры.

СПП выполняются в различных конструктивных исполнениях – в виде штырей и в виде таблеток. Штыревая конструкция является наиболее распространённой для СПП, которые рассчитаны на предельные токи до 500 А [1].

Нами была поставлена задача, теоретически оценить минимально возможное время нагрева СПП штыревой конструкции до заданного значения температуры  $T_j$  при нагреве в камере в которой поддерживается тепловой

режим с постоянной температурой корпуса СПП. Для достижения этой цели нами проведено моделирование тепловых и электрических процессов в СПП штыревой конструкции в лицензионной программной среде TCAD.

Необходимо отметить, что данные исследования важны и необходимы для оценки повышения производительности процесса испытания СПП.

**Разработка модели силового диода штыревой конструкции.** С помощью программного продукта Synopsys TCAD [2] разработана двухмерная цилиндрическая модель силового диода штыревой конструкции. При создании модели за основу была выбрана распространенная конструкция силового диода (СД) штыревой конструкции [1, 3]. Общий вид модели диода показан на рис. 1, а.

При моделировании цилиндрическая модель получается путем вращения двухмерной модели вокруг вертикальной оси, проходящей через центр. Разработанная модель учитывает эффекты высокого уровня инжекции (электронно-дырочное рассеяние и Оже-рекомбинацию), влияние концентрации легирующей примеси на электрофизические параметры полупроводниковой структуры (подвижность, время жизни неравновесных носителей заряда, собственную концентрацию свободных носителей заряда) и эффекты, связанные с тепловым разогревом структуры под действием протекающих токов. Подробное описание этих эффектов приведено в [2].

**Моделирование внешнего нагрева и определение минимального времени нагрева структуры.** В [4] рассмотрен метод нагрева силового диода. Метод заключался в подаче большого количества полусинусоидальных импульсов греющего тока. Дальнейший анализ показал, что, нагрев током не эффективен и что прогрев самого полупроводникового кристалла прибора неравномерен.

Кроме метода нагрева током, силовой диод можно нагреть с помощью внешнего нагрева. Реализовать данный метод в среде TCAD можно путём расположения по всей поверхности модели диода термоконтакта квазипостоянной мощности, задавая на нём необходимое значение постоянной температуры внешнего нагрева, а также изменять её во времени.

Моделирование проводилось в диапазоне температур от  $+45^{\circ}\text{C}$  до  $+190^{\circ}\text{C}$ . При этом для измерения падения напряжения  $U_{FM}$ , по изменению величины которого можно судить об изменении температуры ПП  $T_j$ , через диод моделировалось прохождение через него небольшого постоянного измерительного тока величиной 1 А.

На рис. 1, б приведена картина распределения температуры по структуре диода при внешнем квазипостоянном нагреве в разные моменты времени. Как видно из данного рисунка, уже к 8 секунде структура диода в установленных условиях оказывается полностью прогрета. Данный рисунок не даёт ясного понятия о том, прогрелась ли полупроводниковая структура. Это можно определить с помощью измерения падения напряжения  $U_{FM}$ .

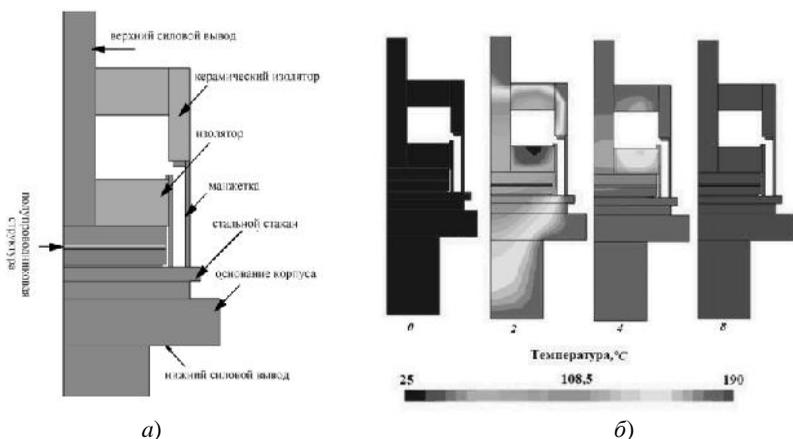


Рис. 1. Общий вид модели силового выпрямительного диода штыревой конструкции (а) и картина распределения температуры по структуре диода при внешнем нагреве в разные моменты времени (б)

По полученным данным построены графики временных зависимостей падения напряжения при различных значениях температуры внешней среды при постоянном измерительном токе 1 А, которые приведены на рис. 2.

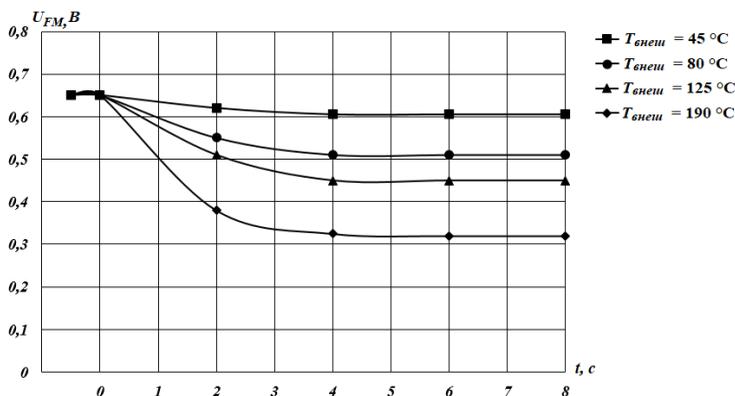


Рис. 2. Графики временных зависимостей падения напряжения  $U_{FM}$  при различных значениях температуры внешней среды при постоянном измерительном токе 1 А

Анализируя графики на рис. 2, можно сделать вывод, что падение напряжения на диоде становится стабильным, начиная с четвертой секунды его нахождения в термокамере, что свидетельствует о полном прогреве как всей структуры силового диода, так и о полном прогреве полупроводниковой структуры. Для уточнения результата этой оценки получен график скорости изменения временной зависимости падения напряжения  $U_{FM}$  для случая, когда  $T_{внеш} = 190^{\circ}\text{C}$ . Полученный график скорости изменения приведен на рис. 3.

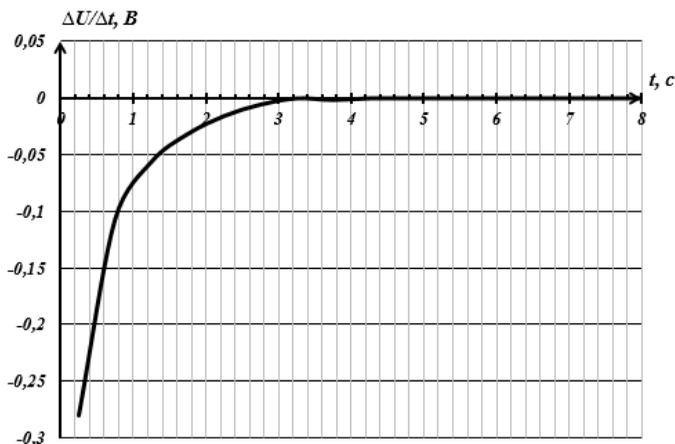


Рис. 3. График изменения скорости изменения  $U_{FM}$  в разные моменты времени

**Заключение.** В результате проведенного моделирования было определено, что в идеальных условиях внешнего нагрева СД штыревой конструкции от теплового источника квазипостоянной мощности, минимальное время полного прогрева всей полупроводниковой структуры до заданной температуры  $T_j$  составило ориентировочно 4 секунды (рис. 3). Это условие с большой вероятностью является недостижимым на практике, однако полученные результаты являются ориентиром для построения оборудования для внешнего нагрева СПП штыревой конструкции исследуемого типа при испытании.

### Список литературы

1. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
2. Горячкин Ю. В. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD / Ю. В. Горячкин, С. А. Нестеров, Б. П. Сурин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
3. Беспалов, Н. Н. Исследование температурного коэффициента напряжения силового диода штыревой конструкции при малых токах/ Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин, И. О. Бектяшкин, Е. С. Безбородов // XLVIII Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2020. – С. 32-36.
4. Беспалов, Н. Н. Исследование стартовых тепловых режимов работы силовых полупроводниковых приборов при различных начальных значениях температуры/ Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, К. Ю. Панькин, П. М. Дёмкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2020. – С. 262 - 265.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров  
(г. Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»,  
Чувашский государственный университет)

## **ТРЕХУРОВНЕВЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПИТАНИЕМ ОТ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ**

THREE-LEVEL TRANSISTOR CONVERTER  
POWERED BY A THREE-PHASE NETWORK

*Рассматривается трехуровневый транзисторный преобразователь с питанием от трехфазного неуправляемого выпрямителя. Обсуждаются схемы повышающего звена на входе инвертора. Приведены результаты расчета и последующего поверочного моделирования в Simulink Matlab одно- и двухтактного повышающих конверторов. Показано преимущество двухтактного конвертора с удвоением напряжения.*

*A three-level transistor converter powered by a three-phase uncontrolled rectifier is considered. Step-up circuits at the inverter input are discussed. The results of the calculation and subsequent verification modeling in Simulink Matlab of one- and two-stroke step-up converters are presented. The advantage of a push-pull converter with voltage doubling is shown.*

*Ключевые слова: трехуровневый транзисторный преобразователь; повышающее звено; квази-z-фильтр; повышающий одноктактный конвертор; двухтактный конвертор с удвоением напряжения; поверочное имитационное моделирование в Simulink.*

*Keywords: three-level transistor converter; raising link; quasi-z-filter; step-up single-cycle converter; push-pull converter with voltage doubling; verification simulation in Simulink*

При питании от трехфазной сети 380 В необходимо применять в инверторе транзисторы с допустимым напряжением  $U_{кз}$  не менее 1200 В, а так как с повышением допустимого напряжения увеличивается падение напряжения на силовых ключах и ухудшаются их динамические характеристики, то частотный диапазон работы преобразователя ограничивается. Решить эту проблему можно применением трехуровневых инверторов [1–3], в которых ток протекает через два последовательно включенных транзистора, что позволяет использовать транзисторы на 600 В, не снижая КПД источника питания.

Напряжение питающей сети может изменяться в пределах, превышающих значения, нормируемые ГОСТом. Если возложить решение задачи стабилизации напряжения на инвертор, то его силовой трансформатор необходимо будет рассчитывать на максимальное входное напряжение, а транзисторы выбирать по току, исходя из минимального значения входного

напряжения инвертора. В связи с этим более рационально стабилизировать входное напряжение инвертора, обеспечивая при необходимости возможность его повышения. Повысить и стабилизировать напряжение на входе инвертора можно, применив повышающий преобразователь (рис. 1).

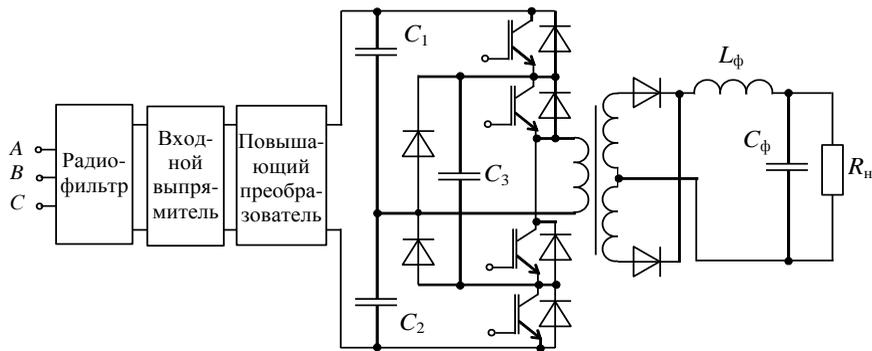


Рис. 1. Преобразователь напряжения с трехуровневым инвертором

В качестве повышающего звена классический z-фильтр нельзя использовать совместно с трехуровневым инвертором, так как на входе последнего установлен емкостной делитель. В [4] для повышения напряжения солнечной батареи применены два квази-z-фильтра (рис. 2, а), но при питании от трехфазного выпрямителя это приводит к большому разбалу напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ . По этой причине рациональнее использовать повышающие одно- или двухтактный конверторы (рис. 2, б-в).

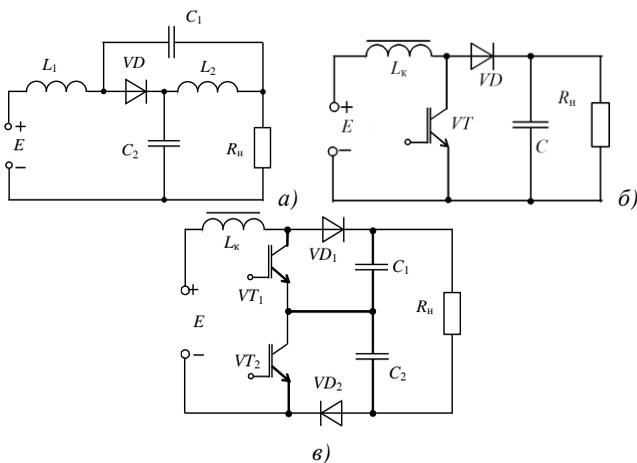


Рис. 2. Повышающие звенья на входе инвертора:  
а – квази-z-фильтр; б – однотактный повышающий конвертор;  
в – двухтактный повышающий конвертор

Расчет параметров однотактного повышающего конвертора (рис. 2, б) выполнен в соответствии с [6] для следующих исходных данных:  $E_{\text{ном}} = 510 \text{ В}$ ,  $U_{\text{н}} = 700 \text{ В}$ ,  $I_{\text{н ном}} = 14 \text{ А}$ , частота переключения транзистора 40 кГц. Для подтверждения достоверности расчетов выполнено поверочное моделирование в Simulink Matlab [8]. Результаты предварительного расчета и имитационного моделирования приведены в таблице 1. Временная диаграмма тока, потребляемого от сети показана на рис. 3, коэффициент гармоник  $THD = 33,36 \%$ .

Таблица 1. Результаты расчета и имитационного моделирования

Параметры		$I_d$ , А	$I_{\text{к. max}}$ , А	$I_{\text{к}}$ , А	$I_c$ , А	$U_{\text{н}}$ , В	$I_{\text{н}}$ , А	$\gamma$	$\Delta U_{\text{н}}$ , В	$\Delta I_{\text{Лк}}$ , В	$\eta$ , %
Одно- такт- ный	Расчет	21,8	19,95	5,97	15,8	700	14,3	0,274	1	0,5	90
	Модели- рование	20,02	21,5	5,87	14,53	694,1	14,17	0,274	0,297	0,56	96,33
Двух- такт- ный	Расчет	21,8	22,3	2,95	11,6	700	14,3	0,271	1	0,5	90
	Модели- рование	19,91	20,07	5,63	9,12	700	14,29	0,276	0,2	0,5	98,51

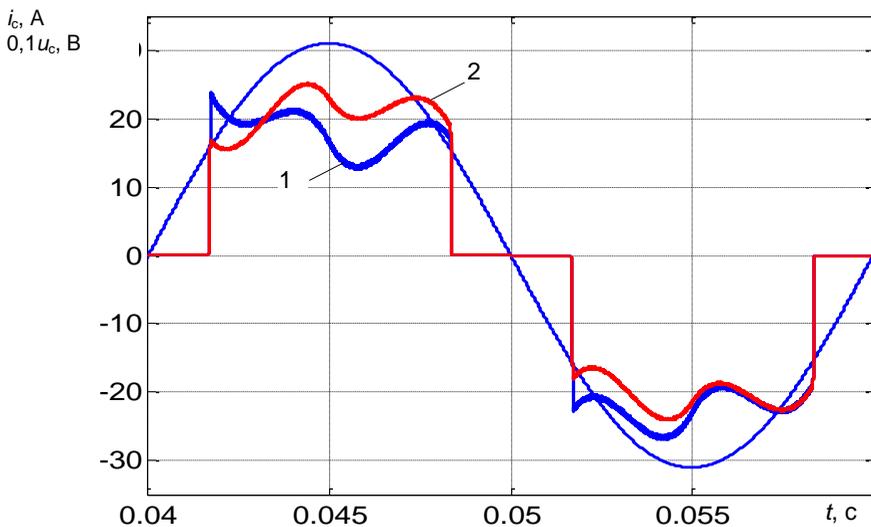


Рис. 3. Временные диаграммы тока, потребляемого от сети:  
1 – однотактный конвертор; 2 – двухтактный

При выключении транзистора возникают перенапряжения, для снижения которых необходима установка демпфирующих цепей. Процесс пуска конвертора имеет колебательный характер с большим выбросом напряжения нагрузки в начальной части (рис. 4), следовательно, необходим предварительный заряд выходного конденсатора.

В двухтактном конверторе (рис. 2, в) энергия накапливается в дросселях и поочередно при отпирании соответствующих транзисторов передается в конденсаторы [7]. В зависимости от длительности включенного состояния транзисторов возможны два режима работы конвертора. В первом длительности включенного состояния транзисторов не перекрываются, а во втором происходит перекрытие токов транзисторов. На рис. 3 показана временная диаграмма тока, потребляемого двухтактным конвертором от сети в режиме без перекрытия токов транзисторов, коэффициент гармоник  $THD = 30,31\%$ , что соответствует европейскому стандарту.

Напряжение на транзисторах равно половине напряжения нагрузки, в то время как в однотактном конверторе оно равно напряжению на нагрузке. Перенапряжения на транзисторах при переключении отсутствуют.

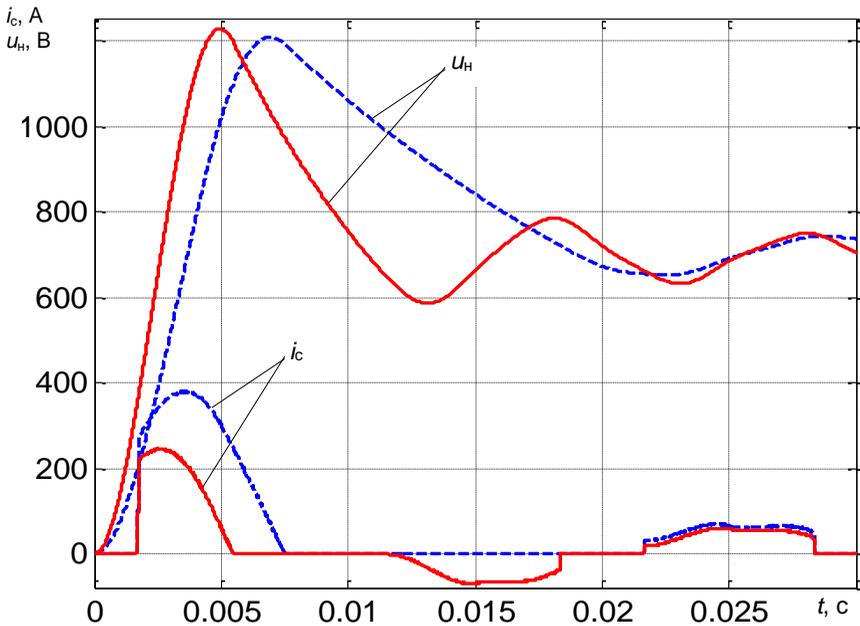


Рис. 4. Временные диаграммы пуска конверторов:  
пунктир – однотактный конвертор; сплошные линии – двухтактный

Включение преобразователя также происходит с выбросом тока, потребляемого от сети, и напряжения нагрузки (см рис. 4), поэтому и в этой схеме необходимо предварительно зарядить конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , но до напряжения  $E/2$ .

### **Заключение**

Показаны преимущества двухтактного конвертора в качестве повышающего звена на входе трехуровневого инвертора: меньшее напряжение и отсутствие перенапряжений на транзисторах, большой КПД.

### **Список литературы**

1. *Исаков, М.С.* Трехуровневый преобразователь, работающий с переключением при нуле напряжения / М.С. Исаков // Практическая силовая электроника, 2007. – № 26. – С. 15–20.
2. *Soelho K.D., Barbi I.* A three level double ended forward converter. IEEE Power Electronics Specialists Conference. Vol. 3, 2003.
3. *J. Renes Pinheiro and Ivo Barbi.* The Three-Level ZVS PWM Converter-a New Concept in High-Voltage DC-to-DC Conversion. IEEE IECON Record 1992, pp. 173–178.
4. *Husev O., Vinnikov D., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Stepenko S.* Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter as a New Solution for Renewable Energy Application. International Colloquium Proceeding – IPCDC 2013. SOVEL, 19–23.
5. *Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Miñambres-Marcos V., Romero-Cadaval E., Vinnikov D.* Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems. DoCEIS 2013: Technological Innovation for the Internet of Things, pp 334–342.
6. *Китаев, В.Е.* Расчет источников электропитания устройств связи / В.Е. Китаев, А.А. Бокуняев, М.Ф. Колканов. – М.: Радио и связь, 1993. – 232 с.
7. *Мелешин, В.И.* Трехуровневый повышающий преобразователь напряжения / В.И. Мелешин, Д.В. Жикленков, А.А. Ганьшин // Силовая электроника. – 2015. – № 2. – С. 59–66.
8. *Лазарева, Н.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

*Материал поступил в редколлегию 14.10.20.*

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров  
(г. Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»,  
Чувашский государственный университет)

## ТРАНЗИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С УМЕНЬШЕННЫМ ВЛИЯНИЕМ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ

### TRANSISTOR VOLTAGE CONVERTER WITH REDUCED EFFECT ON THE SUPPLY MAINS

*Рассматривается транзисторный преобразователь напряжения. Обсуждаются преимущества использования на входе инвертора z-фильтра по сравнению с классическим LC-фильтром. Приведены осциллограммы токов и напряжений, полученные имитационным моделированием режимов работы преобразователя в Simulink Matlab.*

*A transistor voltage converter is considered. The advantages of using a z-filter at the input of the inverter over the classic LC filter are discussed. Oscillograms of currents and voltages obtained by imitating the operating modes of the converter in Simulink Matlab are presented.*

*Ключевые слова: транзисторный преобразователь напряжения; z-фильтр; LC-фильтр; имитационное моделирование в Simulink.*

*Keywords: transistor voltage converter; z-filter; LC-filter; simulation modeling in Simulink.*

В системе распределенного электропитания основной преобразователь преобразует напряжение сети до уровня напряжения на промежуточной шине. В каждом функциональном узле имеется один или несколько DC/DC преобразователей, подключенных к промежуточной шине и обеспечивающих напряжения и токи, необходимые для каждой нагрузки.

Выходной трансформатор основного преобразователя и транзисторы должны быть рассчитаны на минимальное напряжение питающей сети, что увеличивает массу и габариты преобразователя. При провале напряжения сети из-за влияния параллельно включенных потребителей необходимо предпринять меры по обеспечению надежности работы, например, подключением резервного электропитания, вольтодобавочных устройств или в самом источнике следует предусмотреть возможность повышения входного напряжения.

Обеспечение стабилизации напряжения питания может быть реализовано инвертором с измененной структурой звена постоянного тока (рис. 1) [1–3]. При номинальном или повышенном значении входного напряжения инвертор управляется по традиционному методу широтно-импульсного (ШИМ) или фазоимпульсного (ФИМ) управления. При провале входного напряжения или уменьшении его ниже значения, допускаемого ГОСТом, все транзисторы инвертора включаются на заданном интервале времени, что равносильно

короткому замыканию (шунтированию) источника питания. В дросселях  $z$ -фильтра запасается энергия, которая затем передается в инвертор, повышая его входное напряжение.

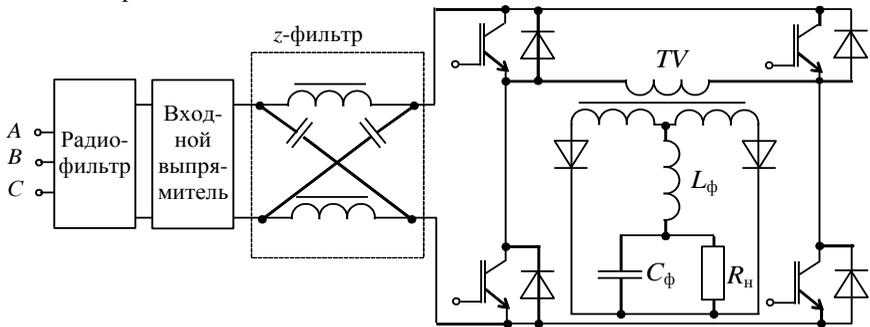


Рис. 1. Источник питания с  $z$ -фильтром

Процессы в преобразователях с  $z$ -фильтром исследованы, например, в [1–4]. Основной акцент в подобных работах делается на расчете параметров  $z$ -фильтра и изучении режимов работы преобразователя, а влиянию источника на питающую сеть уделяется меньшее внимание. В данной публикации продолжено исследование влияния  $z$ -фильтра на сеть, начатое в [5]. Для напряжения сети 380 В и входного напряжения инвертора 510 В на основе рекомендаций [2] были определены параметры  $z$ -фильтра  $L = 760$  мкГн,  $C = 15$  мкФ и выполнено имитационное моделирование работы мостового инвертора с питанием от трехфазной сети в Simulink Matlab [6]. Для сравнения степени влияния  $z$ -инвертора на питающую его сеть выполнено моделирование преобразователя с  $LC$ -фильтром, параметры которого аналогичны параметрам  $z$ -фильтра.

Временные диаграммы тока, потребляемого от сети в установившемся режиме работы источника, для двух видов фильтров представлены на рис. 2.

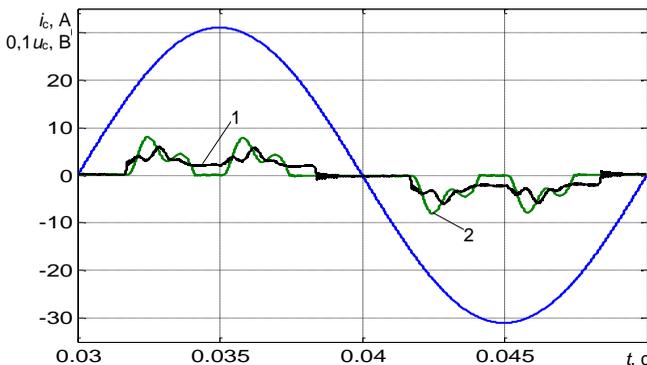


Рис. 2. Временные диаграммы тока и напряжения сети в установившемся режиме работы источника: 1 – с  $z$ -фильтром; 2 – с классическим  $LC$ -фильтром

Коэффициент гармоник  $THD$  для варианта с  $z$ -фильтром без режима короткого замыкания 47,2 %, а при использовании  $LC$ -фильтра – 91,19 %. Изменение тока, потребляемого из сети, при включении преобразователя с различными видами фильтров показано на рис. 3. Для  $z$ -инвертора в переходном режиме бросок сетевого тока достигает 18,85 А, в то время как для инвертора с  $LC$ -фильтром максимальное значение тока сети более 31 А. Для получения коэффициента гармоник, соизмеримого с таковым при использовании  $z$ -фильтра, параметры  $LC$ -фильтра необходимо увеличить до значений  $L = 9000$  мкГн,  $C = 300$  мкФ. При этом  $THD = 52,9$  %, а бросок сетевого тока при включении преобразователя превышает 92 А.

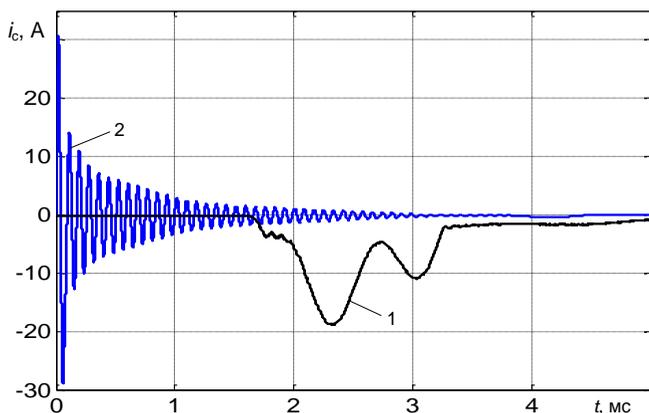


Рис. 3. Временные диаграммы тока сети при пуске преобразователя:  
1 – с  $z$ -фильтром; 2 – с классическим  $LC$ -фильтром

В преобразователе с  $z$ -фильтром при снижении напряжения сети до 300 В и переходе  $z$ -фильтра на режим короткого замыкания напряжение на входе инвертора увеличилось до требуемого значения, а коэффициент гармоник  $THD$  снизился и стал равным 33,7 %. Подобная компенсация провала напряжения сети невозможна при использовании классического  $LC$ -фильтра.

При включении источника питания наблюдаются не только броски сетевого тока, но и броски напряжения на входе инвертора, которые могут вывести из строя транзисторы инвертора. На рис. 4 приведены временные диаграммы изменения напряжения на входе инвертора при пуске источника, из которых видно, что амплитуда напряжения при включении инвертора с классическим  $LC$ -фильтром на много больше, чем в случае  $z$ -фильтра как без использования режима короткого замыкания, так и с ним. Как следствие при установке в преобразователь  $LC$ -фильтра обязательно выполняют предварительный заряд конденсатора фильтра.

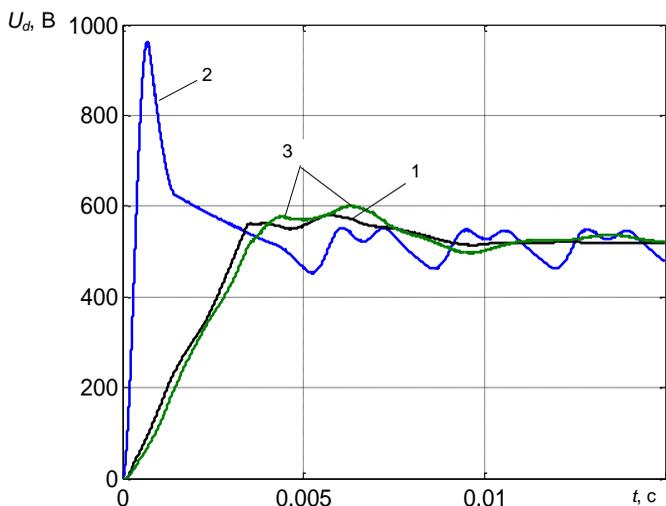


Рис. 4. Переходные процессы напряжения на входе инвертора:  
 1 – с  $z$ -фильтром; 2 – с классическим  $LC$ -фильтром;  
 3 – с  $z$ -фильтром в режиме короткого замыкания

Сравнение результатов исследований показывает достоинство  $z$ -фильтра по сравнению с классическим  $LC$ -фильтром.

#### Список литературы

1. Fang Zheng Peng, Senior Member. Z-Source Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 39, № 2. 2003.
2. Husev Oleksandr. Three-Level Neutral-Point Clamped Quasi-Z-Source Inverter as a New Solution for Renewable Energy Application / O. Husev, D. Vinnikov, C. Roncero-Clemente and all.
3. Zakis Janis. Design Guidelines of New Step-up DC/DC Converter for Fuel Cell Powered Distributed Generation Systems / Zakis Janis, Dmitri Vinnikov, Indrek Roasto, Ryszard Strzelecki // 8<sup>th</sup> International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering», Pärnu, Estonia, January 11-16, 2010.
4. Быков, К.В. Преобразователь постоянного напряжения в переменное с  $z$ -фильтром на входе / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, А.В. Лях, В.М. Яров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 161–164.
5. Быков, К.В. Источник питания с входным  $z$ -фильтром / К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Д.Г. Малышев, Ю.В. Павлов, В.М. Яров // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 380–383.
6. Лазарева, Н.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

Материал поступил в редколлегию 14.10.20.

Н.С. Васильев

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. Ульянова)

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ «УМНЫЙ ДОМ» В СРЕДЕ CISCO PACKET TRACER**

DESIGNING THE «SMART HOUSE» NETWORK  
IN THE CISCO PACKET TRACER

*Рассмотрена проблема информационной и физической безопасности системы «Умный дом». Проанализированы типичные угрозы, разобраны основные пути обеспечения защиты сетей. В симуляторе Cisco Packet Tracer смоделирована и настроена безопасная сеть «Умный дом».*

*The article is devoted to the problem of information and physical security of the "Smart Home" program. Typical threats are analyzed, the main ways of ensuring network protection are considered. The Cisco Packet Tracer simulator has modeled and configured a secure Smart Home network.*

*Ключевые слова: Умный дом, IP-сеть, информационная безопасность, CiscoPacketTracer.*

*Keywords: Smart home, IP network, information security, Cisco Packet Tracer.*

В мире XXI века тематика IP-технологий имеет огромную актуальность. Большинство современных промышленных предприятий, а также бытовых комплексов имеют в своем составе ряд аналоговых и цифровых технологий, которые в процессе взаимодействия друг с другом используют интернет, а также интернет протоколы.

Одним из таких бытовых комплексов является программа «Умный дом». Умный дом – это система с интеллектуальным управлением помещения, которая настроена на жизнеобеспечение и безопасность всех систем при помощи автоматической и согласованной работы. Иными словами «Умный Дом» - это комплекс умных устройств в доме, который сам выполняет и отвечает за некоторые обязанности и потребности человека по дому.

Программу «Умный Дом» Microsoft представила еще в 1999 году. В системе уже были включены такие функции, как: сканер сетчатки глаза, управление системой освещения, управление системой физической и информационной безопасности и даже умная мусорная корзина, которая анализировала выброшенные упаковки и включала закончившиеся продукты в список покупок. Спустя 20 лет технологии шагнули далеко вперед. Если в далекие нулевые годы мало кто мог иметь представление о работе данной программы, то в наше время любой желающий имеет возможность вникнуть в данную тематику и построить аналог данной системы.

Приведем пример проектирования системы «Умный дом» в среде CiscoPacketTracer (рис 1).

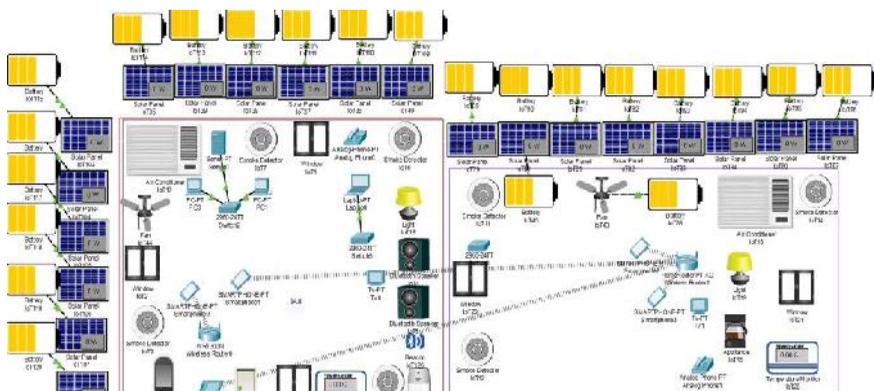


Рис 1. «Общий вид локаций зал и кухня»

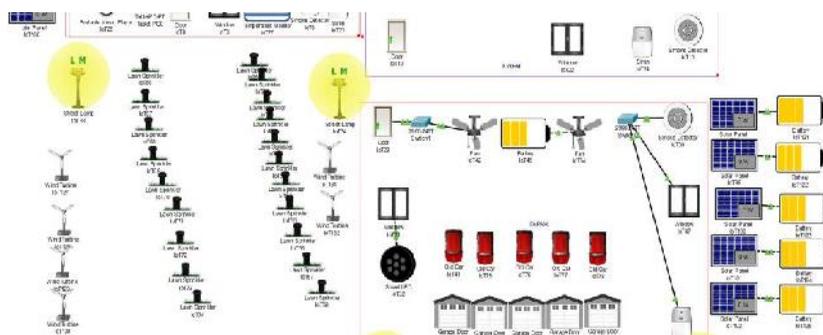


Рис 2. «Общий вид локаций гараж и улицы»

Схема имеет 3 блока: зал, кухня и гараж (рис 2). Каждый блок имеет общие и отдельные элементы [1].

Солнечные панели и батареи, ветровые станции - это, наверное, первое, что бросается в глаза. Они выполняют роль добычи электроэнергии для всех устройств и приборов внутри системы. Солнечные панели не достаточно эффективно работают в сумерках и ночью, поэтому решено было дополнить схему «ветровиками».

Двери, окна, мониторы внешнего наблюдения и видекамеры, расположенные в каждой комнате, отвечают за безопасность клиента от посторонних лиц в помещении, а также за переход между локациями.

Сирены и детекторы дыма передают тревожное извещение о пожаре и информацию, о местоположении источника пожара (или возгорания) на главное цифровое устройство клиента.

Кондиционеры и вентиляторы отвечают за климатические условия в помещении.

Свитчи внутри каждой комнаты несут ответственность за безопасность от сбоев и защиту сети в случае потери дистанционного управления. Они имеют связь с каждым элементом сети [2].

Такие элементы, как колонки, Bluetooth модуль, плеер, кофе-машинка, смарт LED - лента и т.д. не являются основными элементами, не несут за собой цель жизнеобеспечения, а поэтому и встречаются далеко не в каждой комнате.

Не малую роль в системе играет и информационная безопасность. За всю историю существования программы было множество случаев, когда владельцы домов оказывались заложниками ситуации. В своем большинстве, это происходило по причине того, что злоумышленники, взломав систему безопасности, получали доступ к управлению автоматизированных систем посредством собственной дистанционной панели. Иными словами, правонарушители могут регулировать и контролировать температуру, климат, вентиляцию и остальные системы по своему усмотрению. Также хакеры могут использовать взлом программы для сбора личной информации клиента, что является преступлением [3].

Вопросами информационной безопасности уже давно занимаются такие программы, как Cisco, D-Link, AddPacки т.д. Для защиты от кибератак Cisco Packet Tracer предлагает использование надежных паролей и двухфакторную аутентификацию (2FA) [5] (рис. 3).

```
Switch(config)#Hostname KUHNYA
KUHNYA(config)#line console 0
KUHNYA(config-line)#password chgu
KUHNYA(config-line)#login
KUHNYA(config-line)#exit
KUHNYA(config)#
KUHNYA(config)#
KUHNYA#
KUHNYA#
%SYS-5-CONFIG_I: Configured from console by console
exit

KUHNYA con0 is now available

Press RETURN to get started.

User Access Verification

Password:
KUHNYA>
```

Рис.3. «Установка пароля и логина в CiscoPacketTracer»

Действительно, установка пароля на девайсах или на всей системе снижает вероятность взлома системы.

Настройка приборов вручную, а также установка на компьютерах или смартфонах, с которых выполняется управление системой, антивирусов также очень важно при защите от хакеров [4].

«Умный дом» является прорывом в мире современных технологий. Данная программа обновляется с увеличивающейся частотой: множество различных нововведений в данной программе растет с каждым днем. Инженеры стараются облегчить жизнь человека по максимуму. Однако, не стоит забывать, что и уровень киберпреступлений тоже не стоит на месте. Злоумышленники придумывают как можно больше способов обойти систему информационного контроля. Из всего этого можно сделать вывод, что «Умный дом» - это программа, которой есть место в современном мире. Но не стоит экономить на данной системе или же легкомысленно относиться к ней. Это может очень дорого обойтись.

#### Список литературы

1. *Васильева, Л.Н.* Моделирование инфокоммуникационных сетей на основе платформы CiscoPacketTracer/ Л.Н. Васильева, И.И. Ильина // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. 24-25 октября 2019 г. –Брянск: БГТУ, 2019. – С. 258-259.

2. *Чернов, В.К.* Применение протоколов синхронизации NTP и RTP для интеллектуальных электронных устройств в энергетике/ В.К. Чернов, С.Г. Чумаров // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: мат. III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2019. – С. 228-231.

3. *Чумаров, С.Г.* Проблемы информационной безопасности IP-телефонии/ С.Г. Чумаров, Г.В. Сидоров // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. – Стерлитамак: АМИ, 2017. – С. 177-180.

4. *Ремнев, П.Ю.* Проектирование защищенной сети предприятия/ П.Ю. Ремнев, Л.Н. Васильева // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XI всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – С. 494-496.

5. *Васильев, Н.С.* Угрозы безопасности сетей IP-телефонии/ Н.С. Васильев, Л.Н. Васильева // Материалы XV международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 2 ч.; редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар - Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – Ч. 2. – 88 с.

*Материал поступил в редколлегию 01.10.20.*

С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев

(г. Москва ООО «НПП «Мелитта»)

В.М. Градов (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ РАЗРЯДОВ С ШИРОКОДИАПАЗОННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

**SIMULATION OF POWERFUL PULSE XENON DISCHARGES  
WITH A WIDE-RANGE SPECTRAL COMPOSITION OF THE RADIATION**

*Разработана математическая модель стабилизированного стенкой импульсного ксенонового разряда в составе внешней электрической цепи. В результате реализации математической модели получены данные по распределению энергии излучения импульсной ксеноновой лампы в различных спектральных интервалах. Выполнено сопоставление полученных расчетных данных с результатами экспериментальных спектрометрических исследований.*

*A mathematical model of a wall-stabilized pulsed xenon discharge as part of an external electrical circuit has been developed. As a result of the implementation of the mathematical model, data were obtained on the distribution of the radiation energy of a pulsed xenon lamp in different spectral intervals. Comparison of the calculated data obtained with the results of experimental spectrometric studies has been performed.*

*Ключевые слова: математическая модель, импульсный разряд, ксеноновая плазма, спектральное распределение излучения.*

*Keywords: mathematical model, pulsed discharge, xenon plasma, spectral distribution of radiation.*

При создании оптико – электронных систем, построенных на использовании излучения импульсного газового разряда в инертных газах, возникает проблема оптимизации параметров газоразрядной лампы. В результате перед плазменной электроникой встает многофакторная задача поиска компромисса между конструктивными параметрами источника излучения, режимами работы в электрической цепи и условиями его эксплуатации. Экспериментально реализовать такую цель, возможно только сузив область поиска оптимального решения посредством использования математического моделирования.

Целью настоящей работы является разработка нестационарной математической модели и расчет параметров импульсного ксенонового разряда совместно с теплонапряженным состоянием ограничивающей плазменный канал кварцевой оболочки.

В результате действия ряда факторов в пристеночной зоне разряда

наблюдается отрыв температур электронов и тяжелых частиц, и как следствие, отклонение ионизационного равновесия от равновесия по Саха. Выполненная нами оценка потока энергии, выносимого диффузией заряженных частиц к стенке, не превышает 5% от общего теплового потока на стенку. Это свидетельствует о слабом влиянии эффектов неравновесности в пристеночной зоне на энергетический баланс импульсного ксенонового разряда. Поэтому физические процессы в таком разряде протекают в условиях, близких к локальному термодинамическому равновесию (ЛТР), что значительно упрощает построение математической модели.

Предложенная нами система математических выражений включает в себя уравнения энергии плазменного столба, переноса излучения, закон Ома, сохранения массы в разрядном объеме, уравнение электрической цепи и теплопроводности поглощающей – излучающей стенки кварцевой оболочки. В предлагаемой модели перенос излучения в плазмообразующей среде учитывается в диффузном приближении [1].

Для реализации математической модели нами была сформирована база материальных функций плазмообразующей ксеноновой среды. Коэффициент поглощения плазмы рассчитывался с учетом процессов, определяющих непрерывный и дискретный спектр. В качестве примера на рис. 1 представлен расчетный коэффициент поглощения при давлении ксенона 15атм. и цветовой температуре 8000К.

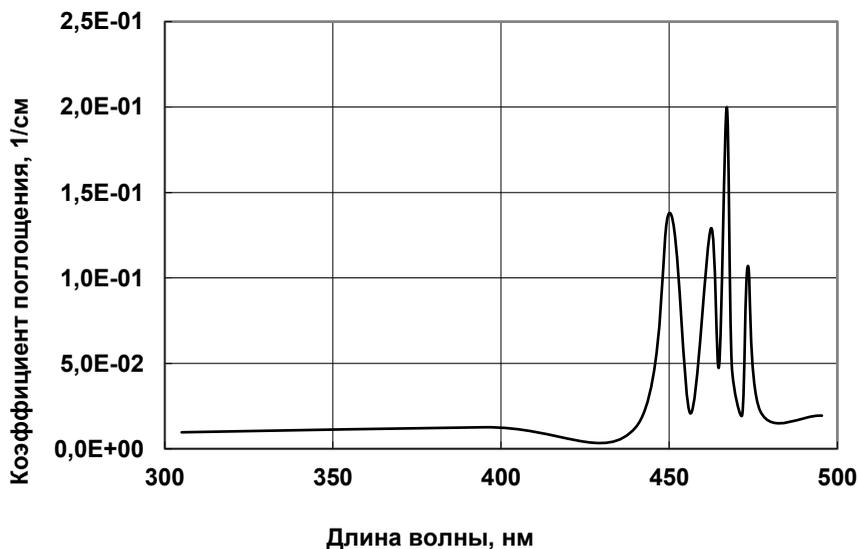


Рис.1. Расчетный коэффициент поглощения ксеноновой плазмы в ультрафиолетовой области спектра

Коэффициент электропроводности нами вычислялся в зависимости от электрон - атомного и электрон – ионного взаимодействия. Расчетные данные по электропроводности сопоставлялись с имеющимися экспериментальными результатами. Коэффициент теплопроводности определялся с учетом атомной, электронной и химической составляющих.

В результате реализации математической модели нами проведено изучение влияния геометрических параметров разрядного столба, давления ксенона и параметров разрядного контура на выход излучения в диапазоне длин волн от 0,24 до 1,5 мкм.

На рис. 2 в качестве примера приведен расчетный спектр излучения разряда в ксеноновой плазмообразующей среде.

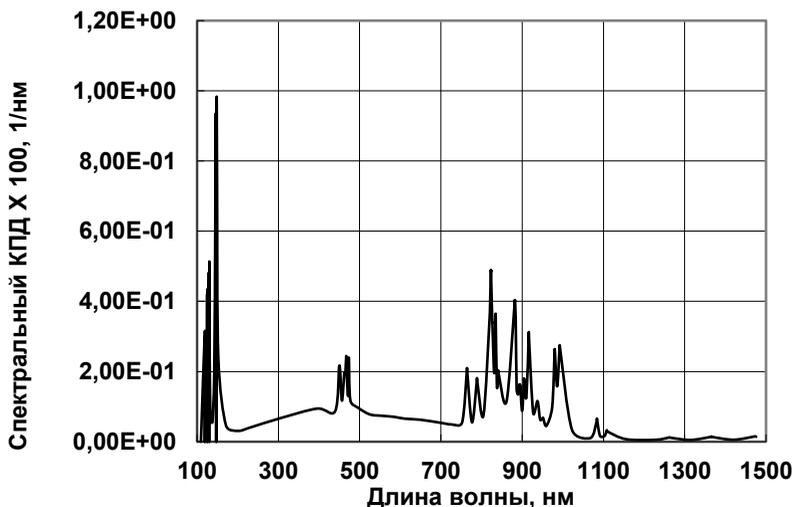


Рис. 2. Спектральное распределение КПД излучения импульсного разряда в ксеноновой плазме

Приведенные на рис. 2 и 3 расчетные данные нами получены для импульсного ксенонового разряда с диаметром плазменного канала 5 мм, при давлении ксенона в холодном состоянии  $P_0=108$  мм рт. ст. Предполагалось, что лампа работала в разрядном контуре с продольным градиентом потенциала  $E=30$  В/см и удельной мощности разряда  $\langle w \rangle = 0,3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>3</sup>. В таких условиях эксплуатации расчеты показали, что средний ток разряда достигает  $I=200$  А, осевая температура разряда (рис. 3) примерно равна 11500К, а пиковая сила излучения, например, в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 250-450$  нм составляет 617 Вт/см<sup>2</sup>.

Из анализа рис. 2 следует, что полученные нами расчетные данные подтверждают перспективность использования импульсного ксенонового разряда в качестве источника мощного УФ излучения в диапазоне длин волн

200-300 нм [2] и источника накачки лазеров на АИГ: $\text{Nd}^{+3}$  в спектральном диапазоне 700-950 нм [3].

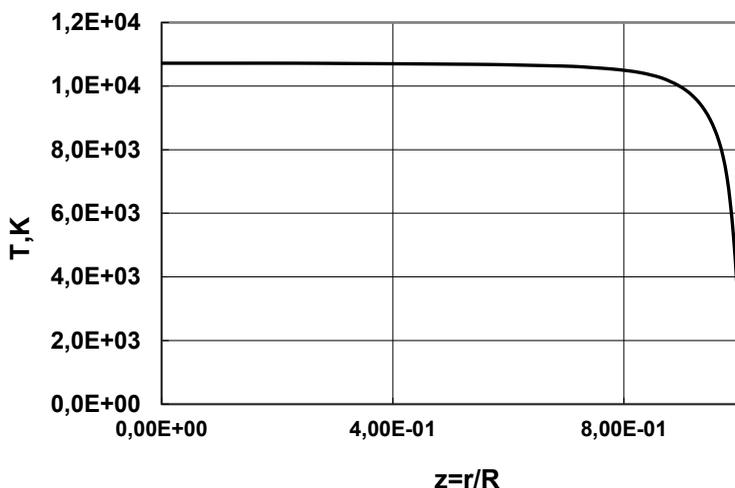


Рис. 3. Температурное поле в разряде в максимуме тока.  
 $r$ - текущий радиус,  $R$ - радиус разрядной трубки

В данной работе рассмотрены первые результаты исследования импульсного ксенонового разряда короткой длительности. Для полного понимания радиационных и теплофизических процессов требуется решить комплекс задач по экспериментальному определению заселенностей возбужденных состояний, концентрации атомов, электронов и ионов и др. Одновременно, можно сделать вывод, что предложенная математическая модель с достаточной точностью позволяет определить основные электрические характеристики и параметры излучения импульсного ксенонового разряда, ограниченного кварцевой оболочкой.

#### Список литературы

1. Градов, В.М. Разработка методов расчета и исследования радиационных процессов в системах с разрядными источниками селективного излучения: специальность 01. 04. 14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук / Градов Владимир Михайлович; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2002. – 32 с.
2. Гавриш, С.В. Ультрафиолетовое излучение импульсно – периодических разрядов в инертных газах / С.В. Гавриш, В.М. Градов, С.С. Коробков, Д.Ю. Пугачев // Прикладная физика. – 2017. –№6.- С. 18 – 23.
3. Маршак, И.С. Импульсные источники света./ И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. –Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.– 472 с.

Материал поступил в редколлегию 07.10.20.

В.Я. Горин, Е.В. Куть, Г.М. Беркович  
(г. Донецк, Донецкий национальный технический университет)

**РАЗРАБОТКА СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНОЙ ПОДСИСТЕМЫ  
САПР ДЛЯ РЕШЕНИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ  
ПРИ ПРОКЛАДКЕ СОВРЕМЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ  
ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION AND INSTALLATION SUBSYSTEM CAD  
FOR SOLVING EDUCATIONAL AND RESEARCH PROBLEMS WHEN LAYING  
MODERN HIGH AND EXTRA HIGH VOLTAGE CABLE LINES

*Рассматриваются результаты разработок по созданию учебно-исследовательского варианта системы автоматизированного проектирования кабельных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. Для строительно-монтажной подсистемы разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать допустимые усилия тяжения силового кабеля на напряжение 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.*

*Discusses the results of the development of teaching and research version of the computer aided design of cable lines of high and extra-high voltage. Within the construction and installation subsystem, software has been developed for calculating the permissible tensile forces of a power cable for a voltage of 110 kV with XLPE insulation.*

*Ключевые слова: создание системы автоматизированного проектирования кабельных линий, учебно-исследовательский вариант, кабель напряжением 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, расчет допустимых усилий тяжения, алгоритм и компьютерная программа на языке JavaScript.*

*Keywords: development of the computer aided design of cable lines, teaching and research version, cable for a voltage of 110 kV with XLPE insulation, calculating the permissible tensile forces, algorithm and the computer program in the programming language JavaScript.*

Строительство новых воздушных линий (ВЛ), вызванное увеличением потребления электрической энергии, сопряжено с трудностями в условиях плотной городской застройки. Технологические нормы запрещают возведение новых ВЛ на селитебных землях, коридоры существующих же ВЛ, несмотря на регламентированную зону отчуждения, часто оказываются застроенными. Частным решением проблемы является замена ВЛ на кабельные линии (КЛ), что успешно реализовано в ОАО «Промик». Разработан и внедрен переход ВЛ 35 кВ в кабельную линию на решетчатой стальной опоре типа У35-2т.

Массовое внедрение КЛ электропередачи высокого (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН) требует автоматизации для эффективной работы организаций,

занимающимися проектированием и сооружением кабельных ЛЭП подобно воздушным ЛЭП. Автоматизация предусматривает рациональное использование времени специалиста, который отвечает за уникальность проектируемого объекта, а компьютер обеспечивает скорость и точность расчетов.

Разработанная на кафедре электрических систем ДонНТУ структурная схема учебно-исследовательского варианта системы автоматизированного проектирования кабельных линий электропередачи (УИ САПР КЛ) полностью отвечает рекомендациям [1]. Как показал опыт её использования в учебном процессе, систему автоматизированного проектирования кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения (САПР КЛ ВН и СВН), созданную на кафедре электрических систем ДонНТУ в учебно-исследовательском (УИ) варианте, следует считать достаточно удобным и эффективным средством при проектировании современных кабельных ЛЭП. Разработанное программное обеспечение первой очереди УИ САПР КЛ ВН и СВН для проектных расчетов конструктивных элементов и электрических параметров кабеля позволяет качественно и эффективно выполнять необходимые проектные компьютерные расчеты в линейной подсистеме УИ САПР КЛ ВН и СВН. Объем и порядок этих расчетов наглядно отражаются [2] в соответствующей структурной схеме, которой присваивается условный индекс базовой версии 01.КЛ. Разработанное в рамках второй очереди программное обеспечение позволяет также выполнять [3] необходимые тепловые расчеты проектируемого кабеля в линейной подсистеме в рамках структурной схемы (версия 0.3.КЛ), которая приведена на рис. 1.

Однако структура УИ САПР КЛ ВН и СВН не может считаться завершенной, поскольку в технической и документальной системах не проведены соответствующие разработки. Этот фактор и определил цель и содержание нашей работы, результаты которой выносятся на обсуждение.

Техническая система структурной схемы состоит (рис.1) из линейной и строительно-монтажной подсистем. В свою очередь, линейная подсистема включает в себя модули проектирования КЛ с расчетами конструктивных элементов кабеля, электрическим и тепловым расчетами. В состав программного обеспечения строительно-монтажной подсистемы входят расчеты, связанные с выбором трассы и дальнейшей укладкой кабеля.

Документальная система включает девять основных единиц документов (Д), в которые поэтапно заносятся данные в процессе проектирования.

Разработанная УИ САПР КЛ ВН и СВН выглядит как web-страница – для проведения расчета достаточно перейти по соответствующей ссылке. В качестве языка программирования используется язык JavaScript.

При проектировании кабельной линии трасса и строительные длины кабеля выбираются таким образом, чтобы при протяжке кабеля не было превышено допустимое усилие тяжения. Усилия, возникающие во время тяжения кабеля с многопроволочной жилой, не должны превышать величины, установленные техническими характеристиками – не более 50 Н/мм<sup>2</sup> номинального сечения медной жилы (30 Н/мм<sup>2</sup> – алюминиевой) [4].

Для монтажа используются тяговые лебедки, оборудованные устройствами для контроля усилий тяжения прокладываемого кабеля. Значения регистрируются на протяжении всего процесса, и тяговая лебедка автоматически отключается в случае превышения допустимых значений.

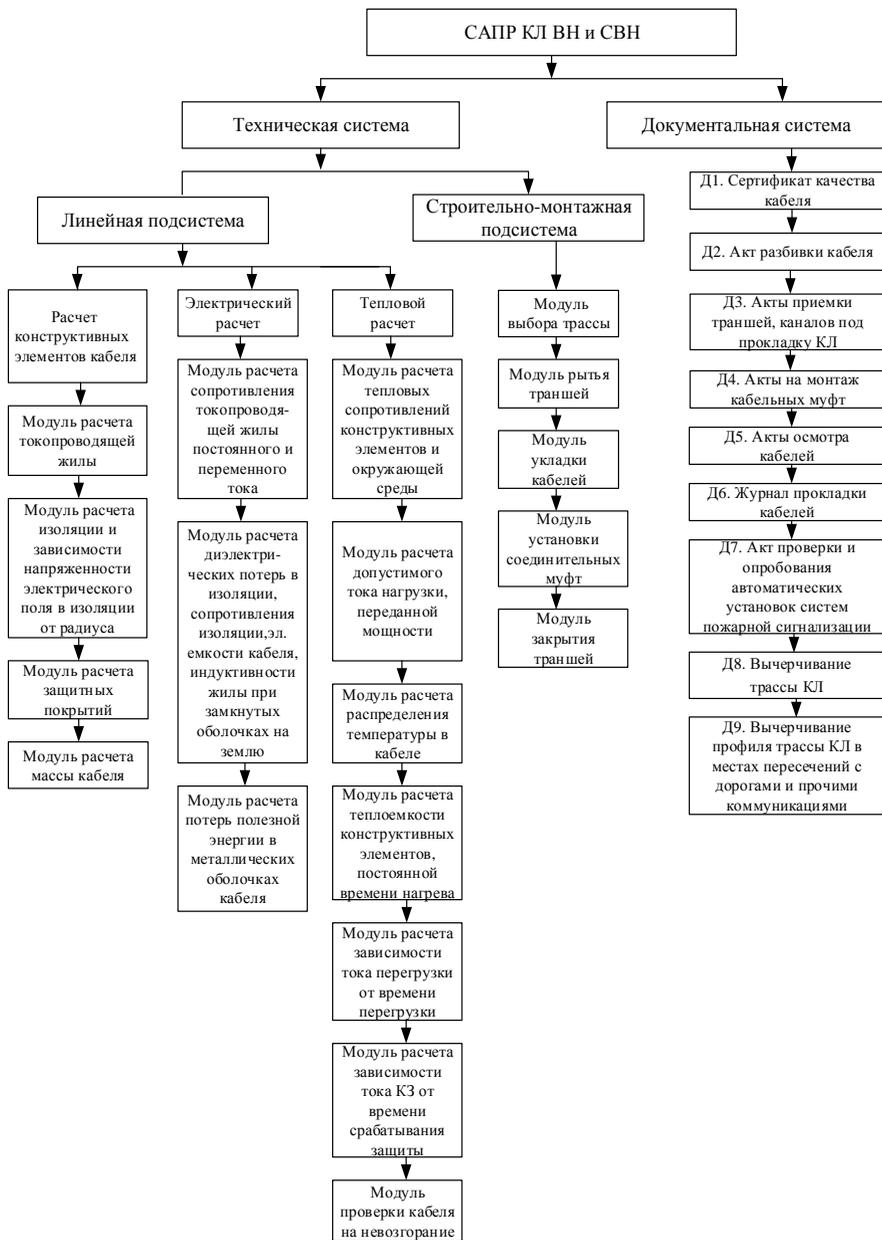


Рис. 1. Структурная схема УИ САПР КЛ ВН и СВН

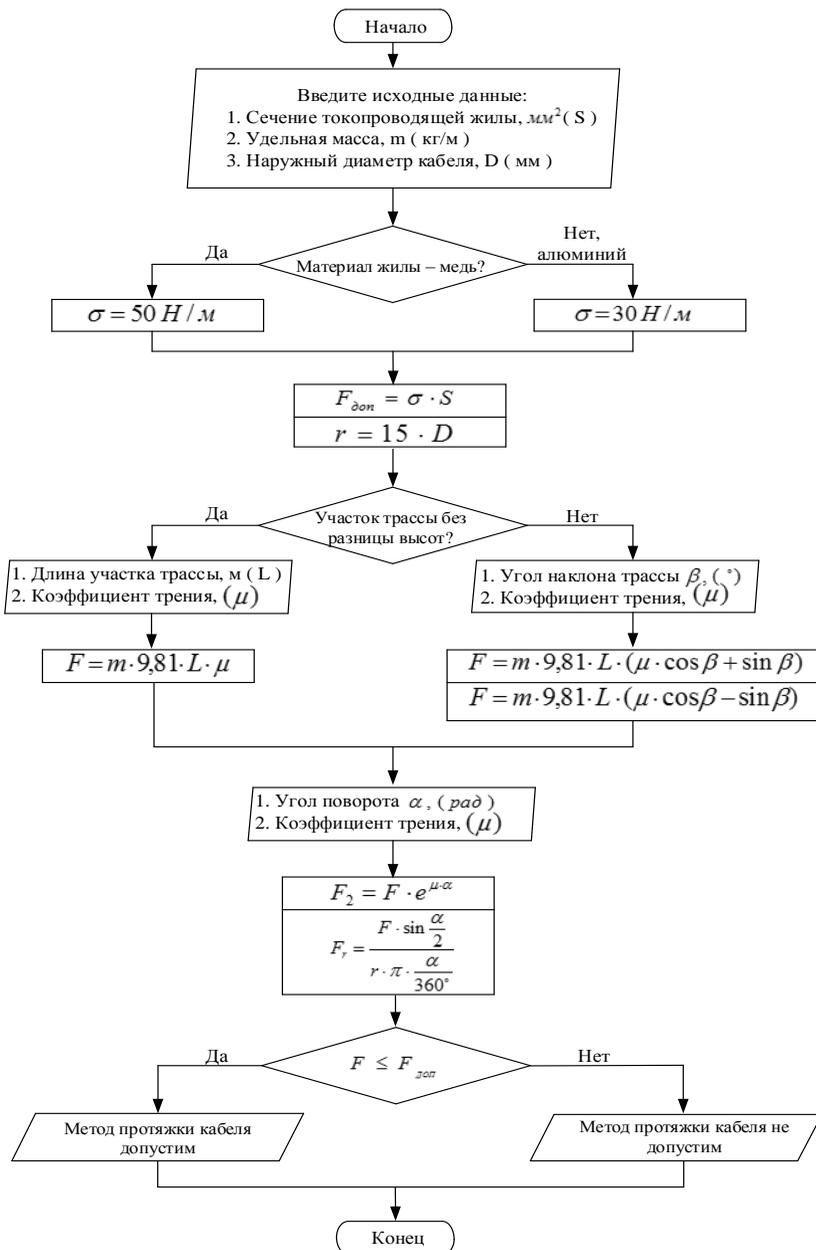


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компьютерной программы расчета усилий тяжения кабелей

В рамках автоматизации строительного-монтажной подсистемы УИ САПР КЛ рассчитаны допустимые усилия тяжения для однофазного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Алгоритмом программного обеспечения учтен выбор условий прокладки: прямой участок трассы без разницы высот, прямой участок трассы с разницей высот, изгибы и повороты. Также на экран устройства выводится радиальное давление на единицу длины.

В качестве объекта для контрольного проектного расчета выбран силовой кабель на напряжение 110 кВ с медной токопроводящей жилой сечением 300 мм<sup>2</sup>, изоляцией из сшитого полиэтилена и наружной оболочкой из ПВХ пластиката, не распространяющих горение — марки ПвЭВнг. Согласно техническим условиям [5] кабели данной марки применяются для прокладки в помещениях, туннелях, каналах, шахтах, сухом грунте и на открытом воздухе под навесом; в пучках.

Блок-схема алгоритма компьютерной программы расчета усилий тяжения кабеля приведена на рис. 2. Исходными данными являются площадь сечения токопроводящей жилы, материал жилы, удельная масса кабеля и его наружный диаметр. Для каждого участка трассы вводится коэффициент трения, определяемый согласно условиям прокладки. Также пользователь выбирает тип трассы, ее характеристики и протяженность.

По формулам, приведенным на блок-схеме, рассчитываются максимально допустимое усилие тяжения, минимальный допустимый радиус изгиба, усилия тяжения на каждом участке. Результат расчета автоматически проверяется на соответствие допустимым значениям для конкретного кабеля.

#### Список литературы

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. «Передавання електроенергії». Гл. 2.3 «Кабельні лінії напругою до 330 кВ». – Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2009. - 78 с.

2. Горин, В.Я. Розробка програмного забезпечення лінійної підсистеми навчально-дослідницької системи автоматизованого проектування кабельних ЛЕП високої та надвисокої напруги/ В.Я. Горин, Т.В. Широкоярдова. – Наук. праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика», вип. 1(16). - Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 45-50.

3. Горин, В.Я. Использование САПР для решения учебно-исследовательских задач при проектировании современных кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения/ В.Я. Горин, Е.В. Куть, Д.С. Христенко // САПР и моделирование в современной электронике [Текст] + [Электронный ресурс]: сб. науч. трудов I Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 49-53.

4. Рекомендации по прокладке и монтажу кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ (ОАО «Электрокабель») – ОАО «Электрокабель Кольчугинский завод», 2007.

5. Справочник продукции «Южкابل», 2019. – URL: <http://www.yuzhcable.info/edata.php?MRR=11040111000000300>.

*Матеріал посту́пил в редакцію 14.10.20.*

Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов  
(г. Москва, Минэнерго России)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ  
К ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ  
КРИТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

MODELING OF MULTI-PARAMETRIC BEHAVIOR OF POWER PLANTS  
WITH INCREASED REQUIREMENTS FOR FAILURE RESISTANCE  
UNDER CRITICAL IMPACT CONDITIONS

*Рассматриваются проблемы обеспечения прогнозирования многопараметрического поведения объектов электро- и теплоэнергетики при проектировании с целью учета возможных вариантов выхода работы объектов за пределы штатных режимов, что требует соответствующего моделирования.*

*Problems of predicting the multiparameter behavior of electrical and heat power engineering objects during design are considered in order to take into account possible options for the operation of objects outside the normal modes, which requires appropriate modeling.*

*Ключевые слова: энергетика, объекты, проектирование, моделирование, отказоустойчивость.*

*Keywords: energy, objects, design, modeling, fault tolerance.*

Внедрение «цифровых двойников» позволяет сформировать базу для моделирования идентифицируемых состояний технологических объектов с повышенными требованиями к отказоустойчивости (АЭС, ТЭС и пр.).

Для раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций необходимо обеспечение прогнозирования многопараметрического поведения объектов электро- и теплоэнергетики, в первую очередь, динамики технического состояния (штатные, критические и аварийные режимы), что требует соответствующего моделирования [1].

Расширение количества технологических элементов кибер-физических систем с большим количеством интеллектуальных устройств с расширенной компонентой автономного поведения в рамках систем электро- и теплоснабжения создает новые возможности для применения моделирования при проектировании технологических объектов с повышенными требованиями к отказоустойчивости [2-4]. Управление в сложных ситуациях с существенной компонентой неопределенности требует повышения предсказуемости работы технологических объектов, что, в свою очередь, опирается на моделирование многопараметрического поведения объектов электро- и теплоэнергетики как элементов суперсистемы [5].

Функционирование объектов электро- и теплоэнергетики (распределенного комплекса систем с дву- и многосторонними связями в цифровом управленческом пространстве сегментов отрасли), содержит специфический для него набор атрибутов. Описания идентифицируемых состояний технологических объектов базируются на мониторинге динамики технического состояния и зависят от форм воздействий через выделенные кластеры факторов, влияющих на отказоустойчивость сегментов суперсистемы, которые необходимо учесть при моделировании работы объектов электро- и теплоэнергетики. Эти описания могут группироваться в информационные блоки, которые представляют интерес для анализа и моделирования с целью учета возможных вариантов выхода работы объектов за пределы штатных режимов при проектировании объектов электро- и теплоэнергетики.

Инструментальная поддержка набора данных для моделирования работы объектов электро- и теплоэнергетики в условиях проявления типичных и атипичных природных и технических факторов, учитываемых в процессах проектирования технологических объектов с повышенными требованиями к отказоустойчивости, может быть эффективно реализована с использованием вычислительных сервисов - аналитических математических зависимостей для описания сложных процессов протекающих внутри систем энерго- и теплоснабжения в контексте старения, износа, выбытия, ремонта и замены функциональных узлов [6-8]. «Цифровые двойники» физических объектов или процессов позволяют повысить эффективность моделирования работы сложных кибер-физических систем с большим количеством интеллектуальных устройств с расширенной компонентой автономного поведения с возможностью неограниченного наращивания числа анализируемых функциональных узлов и получаемых данных от интеллектуальных датчиков.

Создается возможность прогнозирования функционального поведения систем электро- и теплоснабжения в сложных условиях с наращиванием объемов анализируемых данных и выявлением ранее недоступных характеристик как технологических операций и процессов, так и действий производственного и управленческого персонала [9].

Расширение количества анализируемых параметров агрегированных групп функциональных узлов оборудования при моделировании позволяет повысить надежность и безопасность функционирования объектов электро- и теплоэнергетики на основе сервисов цифровой топологии [10].

Интеграция информационных систем различных групп распределенных кибер-физических систем с повышенными требованиями к отказоустойчивости (АЭС, ТЭС и пр.) в интересах раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций обеспечивает стандартизацию описаний для моделирования идентифицируемых состояний технологических объектов и сравнения показателей для выявления недостоверных данных по косвенным

признакам и построения достоверных прогнозных оценок различных категорий данных [11-14].

С учетом значительной вероятности критических воздействий на суперсистему, приводящих к каскадным отключениям, при проектировании объектов электро- и теплоэнергетики предлагается опираться на управляемую фрагментацию (полицентрическое временное дезагрегирование групп оборудования с последующей агрегацией) систем управления магистральных или распределительных сетей, выполняющих функциональные задачи в условиях поступления больших и сверхбольших объемов технологических данных [от датчиков с интеллектуальными сервисами для расчета режимов, токов короткого замыкания, координации установок релейной защиты и других] передаваемых по сетям данных. Такая фрагментация должна реализовываться в рамках сетевых агрегированных программно-аппаратных кластеров с учетом структуры передачи данных, их режимной обработки и формирования управляющих сигналов с использованием интеллектуального адаптора (конвергентного интерфейса) способного обрабатывать сверхбольшие объемы данных (на основе технологии Big Data), полученных из различных источников, детерминированных особенностями отдельных объектов магистральных или распределительных сетей, выполняющих функциональные задачи в системах управления объектов электро- и теплоэнергетики.

Для создания консолидирующей «свертки» объектов электро- и теплоэнергетики в кластерообразующие структуры различного уровня (в т.ч. устойчиво наблюдаемые группы объектов магистральных или распределительных сетей в рамках «цифрового двойника» систем передачи электроэнергии) необходимо разбиение сетевых объектов - систем управления магистральных или распределительных сетей, выполняющих функциональные задачи таким образом, чтобы каждый сетевых объектов агрегированный «цифровой двойник» - на основе математической модели электрической сети - использовал цифровые сервисы обработки и верификации цифровых командных сигналов на основе интеллектуального адаптора получаемых данных

### Список литературы

1. *Воропай, Н. И.* Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н.И. Воропай // *Электричество*. – 2020. – № 7. – С. 12-21.
2. *Грабчак, Е.П.* Поддержание режимов работы тепло- и электроэнергетической суперсистемы в условиях технологических воздействий, которые не учитывались при построении ее сегментов / Е.П. Грабчак, В.В. Григорьев, Е.Л. Логинов // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. – 2020. – № 3. – С. 5-12.
3. *Грабчак, Е. П.* Цифровые подходы к управлению объектами электро- и теплоэнергетики с применением интеллектуальных киберфизических систем / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 172-176.

4. *Грабчак, Е.П.* Цифровая трансформация электроэнергетики/ Е.П. Грабчак. – М.: Кнорус, 2018. – 340 с.

5. *Аюев, Б.И.* Разработка программно-технического комплекса противоаварийной автоматики Калининградской энергосистемы / Б.И. Аюев, Е.П. Грабчак, А.А. Лисицын, Е.И. Сацук, С.В. Чаплук, А.В. Черезов, Ю.В. Шаров // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. - № 2. - С 14-22.

6. *Тюгашев, А.А.* Технология и инструментальный программный комплекс проектирования и верификации алгоритмов управления реального времени / А.А. Тюгашев, Д.В. Железнов, С.А. Никищенко // Электротехника. –2017. – № 3. –С. 59-64.

7. *Грабчак, Е.П.* Определение возможности энергетического объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах в условиях нелинейности и дискретности потоков поступающих технологических данных / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Интеллектуальные информационные системы: Теория и практика: сб. науч. тр. I Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные информационные системы: теория и практика».– Курск: Курский государственный университет, 2020. – Ч. 1. – С.23-26.

8. *Грабчак, Е.П.* Цифровые подходы к управлению оборудованием тепловых электростанций с расширенной компонентой интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств/ Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Современные технологии, экономика и образование: сб. матер. Всероссийской научно-методической конференции. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С.36-38.

9. *Voropaï, N.* Generalized technology of hierarchical modeling of complex energy systems // Energy Systems Research. – 2019. – Т. 2. – № 4 (8). – С. 22-25.

10. *Рахматуллин, Р.Р.* Ранжирование оборудования электросетевого комплекса по степени необходимости (критичности) технического воздействия на единицу оборудования/ Р.Р. Рахматуллин // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 10. – С. 29-38.

11. *Корниенко, А.А.* Моделирование компьютерных атак на распределенную информационную систему / А.А. Корниенко, Р.Р. Рахматуллин, И.И. Валиев, И.Н. Хамидуллин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 613-628.

12. *Михайлов, А.С.* Пространственно-сетевые взаимодействия: моделирование системы локальных связей/ А.С. Михайлов // Балтийский экономический журнал. – 2017. – № 4 (20). – С. 60-71.

13. *Петров, М.Ю.* Модель синтеза распределенных атакующих элементов в компьютерной сети / М.Ю. Петров, Р.Р. Фаткиева // Труды учебных заведений связи. 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 113-120.

14. *Игнатенко, В.А.* Агентоцентрическое моделирование организационно-технологических систем / В.А. Игнатенко, А.Г. Бажанов, Д.А. Юдин, А.В. Чуев, С.А. Юдицкий // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 249-294.

*Материал поступил в редколлегию 31.08.20.*

А.В. Григорьев

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЁМО-ПЕРЕДАТЧИКА LVDS ИНТЕРФЕЙСА**

### **LVDS INTERFACE RECEIVER-TRANSMITTER SIMULATION**

*Рассмотрены возможности моделирования приёмо-передатчиков LVDS интерфейса в САПП Cadence.*

*The possibilities of modeling LVDS interface receivers and transmitters in Cadence are considered.*

*Ключевые слова: LVDS, IBIS-модель, SPICE-модель, передатчики и приёмники LVDS, анализ целостности сигнала*

*Keywords: LVDS, IBIS model, SPICE model, LVDS transmitters and receivers, signal integrity analysis.*

Современные высокоскоростные последовательные интерфейсы обеспечивают более высокую скорость передачи информации, низкую стоимость, малые габариты, высокую помехоустойчивость, низкое потребление энергии, возможность резервирования, лёгкость встраивания в аппаратуру. В связи с чем интерфейсы на основе технологии LVDS (Low-Voltage Differential Signaling, или дифференциальный метод передачи с использованием сигналов низкого уровня) и M-LVDS (Multipoint-LVDS, или многоточечный двунаправленный способ обмена информацией) в современной радиоэлектронной аппаратуре получили наибольшее распространение [1, 2]. Технология LVDS отражена в двух стандартах ТИА/EIA-644А и ТИА/EIA-899 [2].

Сокращение сроков и затрат на проектирование радиоэлектронной аппаратуры обеспечивается моделированием на различных уровнях проектирования [3, 4]. Наибольшее распространение получило моделирование на схемотехническом уровне, в основе которого заложено использование SPICE моделей компонентов. Однако использование этих моделей затрагивает некоторые моменты, ограничивающие их применение в случае интегральных схем. Возникают аспекты, связанные с коммерческой тайной и сложностью моделирования больших интегральных схем, в связи с этим в настоящее время наибольшее распространение получило макро моделирование, основанное на использовании IBIS-моделей электронных компонентов(ANSI/EIA-656) [5, 6]. Моделирование с использованием IBIS-моделей позволяет проводить анализ целостности сигналов, изменения потенциала земли, возникновения паразитных колебаний, перекрёстных помех и т.д.

IBIS-модель формируется в виде специального файла со строго структурированным описанием. Каждая последующая версия описания

поддерживает новые возможности модели, которые включаются в файл в виде дополнений. Все версии совместимы друг с другом. Параметры IBIS-моделей формируются на основе знания ВАХ различных логических состояний выводов по постоянному току и передаточных характеристик на нормированной активной нагрузке.

Файл IBIS-модели не является исполняемым файлом и включает в себя: 1) заголовок с общей информацией; 2) информацию о выводах; 3) вольт-амперные и переходные характеристики.

Описание IBIS-модели соответствует структуре, состоящей из входной и выходной части (рис. 1) [5].

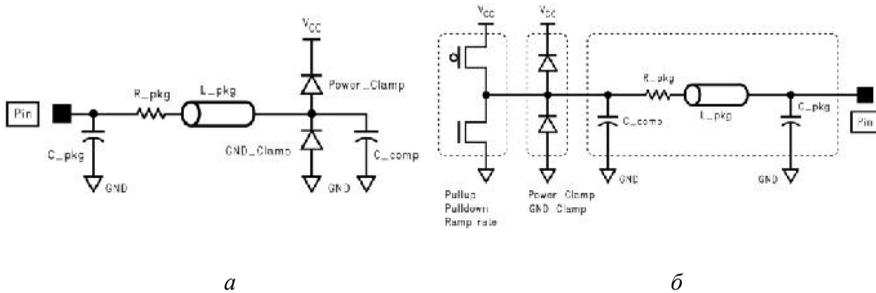


Рис. 1. Структура IBIS-модели: а – входная часть; б – выходная часть

Компоненты GND Clamp и Power Clamp описываются вольт-амперными характеристиками входных и выходных защитных диодов, Pulldown и Pullup представляют соответственно характеристики выходной части схемы между выводом и землёй с нулевым логическим состоянием на выходе, и выводом и питанием с единичным логическим состоянием на выходе. Временные характеристики отражены в компоненте Ramp, они характеризуют скорость переключения между логическими уровнями.

Подключение модели к системам автоматизированного проектирования производится с помощью специальных пакетов, в Cadence используется ModelEditor. Приложение конвертирует файл с описанием модели компонента формата IBIS в библиотечный файл формата SPICE. Для случая передатчика LVDS ds90lv011a библиотечный файл содержит три SPICE модели: входной вывод (DS90LV011A\_DIN) и две модели выходных выводов, образующих дифференциальную пару (DS90LV011A\_OUTP, DS90LV011A\_OUTM) [6].

В качестве примера приводится процедура временного анализа интерфейса, состоящего из передатчика DS90LV011A, приёмника DS90LT012A фирмы Texas Instruments и линии передачи в виде печатных дорожек, которые образуют полосковую линию. Упрощённо дифференциальную линию передач можно представить в виде двух SPICE-моделей линии задержки с условно выбранным волновым сопротивлением каждой линии 50 Ом и величиной задержки 0,2 нс. Результаты моделирования в программе аналогового и смешанного аналогово-цифрового моделирования PSpice пакета Cadence приведены на рис. 2 [7].

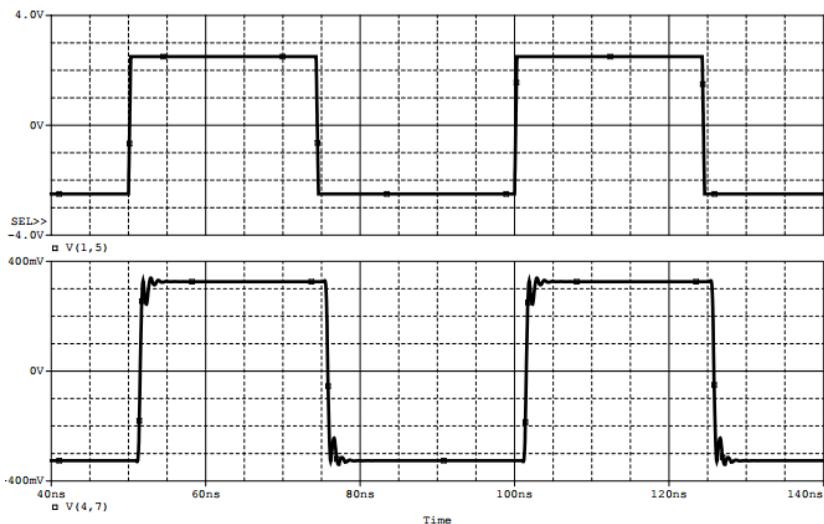


Рис. 2. Сигналы на выходе передатчика и входе приёмника LVDS интерфейса

### Список литературы

1. LVDS Owner's Manual. Including High-Speed CML and Signal Conditioning, Fourth Edition: Texas Instruments Incorporated. – 2008. – 111 с. – URL: <https://www.ti.com/lit/ug/snla187/snla187.pdf> (дата обращения 16.03.2020 г.).
2. Electrical characteristics of low voltage differential signaling (lvds) interface circuits. TIA PN-4584 Revision 1.2 – May, 2000.
3. Чумаров, С.Г. Исследование мостового усилителя тока с ПИ регулированием / С.Г. Чумаров, В.К. Чернов // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 321-324.
4. Чумаров, С.Г. Особенности реализации и применения программно-определяемых радиосистем/ С.Г. Чумаров, Ю.С. Милкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 442-443.
5. Bonnie Baker. The IBIS model: A conduit into signal-integrity analysis, Part 1 // Analog Applications Journal – Texas Instruments, 4Q. – 2010. – С. 11-16. – URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt388/slyt388.pdf> (дата обращения 16.03.2020 г.).
6. DS90LV011A IBIS Model. – URL: <http://www.ti.com/lit/zip/sn1m047> (дата обращения 16.03.2020 г.).
7. Григорьев, А.В. Интерфейс последовательной передачи информации по технологии LVDS/ А.В. Григорьев, А.А. Арсентьева // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – С. 236-237.

*Материал поступил в редколлегию 09.10.20.*

А.В. Жгун, Д.А. Жгун, Д.Д. Кликно, А.Б. Гладышев  
(г. Красноярск, Сибирский федеральный университет)

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМНОЙ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ\***

DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLE FOR MODELING  
MUTUAL HIGH-PRECISION NAVIGATION

*Рассматривается программно-аппаратный комплекс, который позволяет производить лабораторные и полевые испытания методов взаимной высокоточной навигации, используемых в навигации. Приведены три варианта использования программно-аппаратного комплекса для вычисления навигационных параметров.*

*The article considers a hardware and software complex that allows performing laboratory and field tests of high-precision navigation methods which are used in navigation. Three variants of using the software and hardware complex for calculating navigation parameters are shown.*

*Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, радионавигационный сигнал, ГНСС-приемник, программно-аппаратный комплекс.*

*Keywords: GLONASS, GPS, radio navigation signal, GNSS receiver, hardware and software complex.*

На сегодняшний день при разработке систем навигации для космических аппаратов, работающих на низких околоземных орбитах, существует множество технических проблем. Одна из них – это проблема создания, развертывания и управления многоспутниковыми группировками малых космических аппаратов (далее – МКА) дистанционного зондирования земли. В статье рассматривается программно-аппаратный комплекс (далее – ПАК) моделирования взаимной высокоточной навигации, задача которого заключается в проведении экспериментальных исследований разработанных методов взаимной высокоточной навигации МКА с использованием реальных или имитированных сигналов ГЛОНАСС/GPS.

Ключевой особенностью разрабатываемого комплекса является наличие двух угломерных ГНСС-приемников, двух антенных постов, аппаратуры

---

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020» (Соглашение № 05.608.21.0274, unique ID project RFMEFI60819X0274)

© Жгун А.В., Жгун Д.А., Кликно Д.Д., Гладышев А.Б., 2020.  
САПР и моделирование в современной электронике. С. 370 – 373.

измерения и управляющего компьютера. Для организации правильной работы оборудования необходимо разработать программное обеспечение, которое бы имитировало компьютерную модель бортовой навигационной системы космического аппарата.

Предполагается, что разрабатываемый ПАК позволит производить автоматический и независимый прием сигналов не менее чем от 24 навигационных космических аппаратов двумя макетами ГНСС-приемников. Также данный комплекс позволит измерить текущие координаты и углы пространственной ориентации каждого из антенных постов с высокой точностью и выдать измеренные параметры на управляющий компьютер для дальнейшей их обработки [1].

Для проведения предварительных испытаний решено использовать имитатор радионавигационных сигналов ГЛОНАСС и GPS, выполненный на базе модульных приборов фирмы National Instruments [2]. Макет многоканальных ГНСС-приемников планируется разрабатывать на базе имеющихся в наличии навигационных приемников, позволяющих производить фазовые измерения (как в целях увеличения точности измерения псевдодальности, так и в целях измерения пространственной ориентации) [3-5].

Предполагается три варианта использования ПАК:

1. Сигналы имитатора подаются на вход макетов многоканального ГНСС-приемника, минуя антенные системы (рис. 1). В данном варианте производятся проверки работоспособности разработанных методов высокоточной навигации, соответствие достижимой точности навигационных определений КА требованиям технического задания. При таком варианте схемы ПАК моделирования исключаются погрешности, обусловленные средой распространения сигнала, неравномерностями ДН передающей и приемных антенн.

2. Сигналы имитатора излучаются в пространство при помощи калиброванных антенн (рис. 2). Навигационный сигнал принимается антенной системой макетов многоканальных ГНСС-приемников. В данном варианте схемы включения ПАК моделирования проверяются достижимые точности навигационных определений с учетом ДН передающей и приемных антенн.

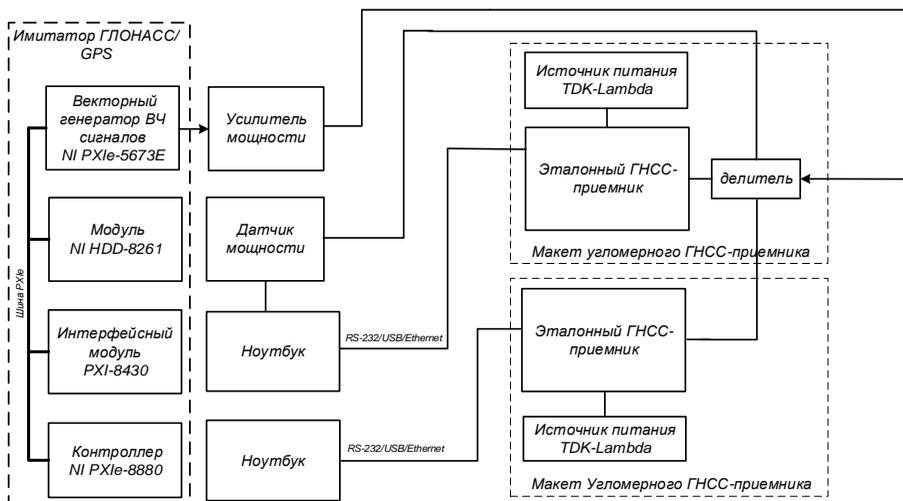


Рис. 1. Схема ПАК моделирования (вариант 1)

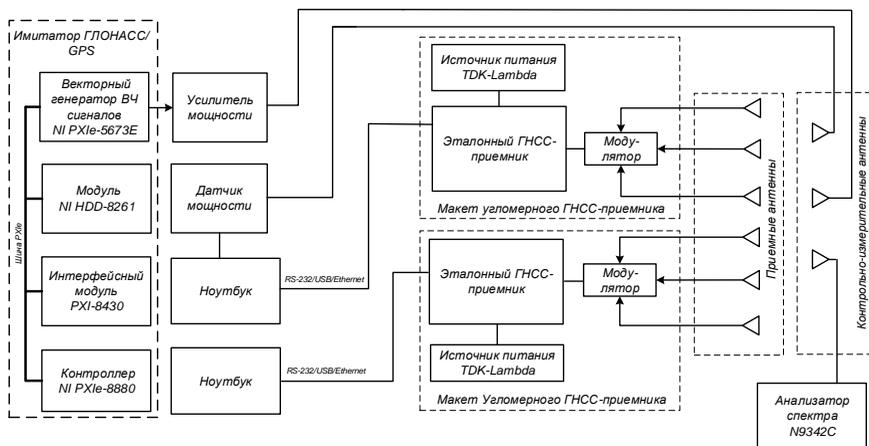


Рис.2. Схема ПАК моделирования при испытаниях (вариант 2)

3. Антенные системы макетов многоканальных ГНСС-приемников размещаются на открытой местности с максимально возможным возвышением над почвой и местными предметами с целью исключения многолучевого приема (рис. 3). Макеты многоканальных ГНСС-приемников осуществляют прием реальных сигналов НКА ГЛОНАСС и GPS. В данном варианте производится полевая проверка работоспособности ПАК моделирования.[2]

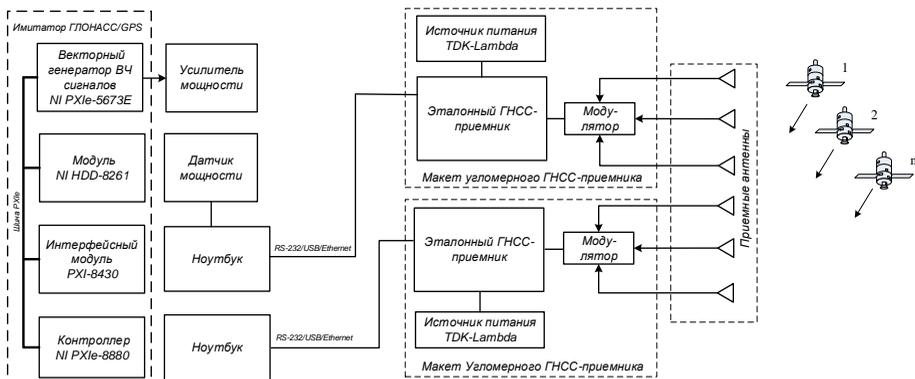


Рис. 3. Схема ПАК моделирования при испытаниях (вариант 3)

Представленный ПАК будет способен обеспечить условия для отладки и тестирования методов взаимной высокоточной навигации, используемых для задачи навигационно-баллистического и частотно-временного обеспечения многоспутниковой группировки. Комплекс позволит моделировать и давать оценку точностным характеристикам навигационной аппаратуры, применяемой для навигационного обеспечения МКА на низких орбитах. Три представленных варианта использования ПАК позволят проводить испытания малых космических аппаратов как на стадии их разработки, так и на стадии их непосредственного ввода в эксплуатацию.

### Список литературы

1. Перов, А.И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / А.И. Перов // Радиотехника – 2010. – №4. – С. 65-116.
2. Гладышев А.Б. Имитатор сигналов для угломерных ГНСС-приемников на основе современных модульных радиоизмерительных приборов / А.Б. Гладышев, Д.Д. Дмитриев, Н.С. Кремез, Е.Е. Гарин // Решетневские чтения. – 2016. – Т. 1. – С. 260-262.
3. Дмитриев, Д.Д. Программно-аппаратный комплекс моделирования процессов позиционирования и измерения пространственной ориентации космических аппаратов на геостационарной орбите / Д.Д. Дмитриев, В.Н. Ратушняк, А.Б. Гладышев, Н.С. Кремез // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 141-144.
4. Sokolovskiy A.V. Hardware diagram computing devices navigation equipment consumers SRNS / A.V. Sokolovskiy, A.B. Gladyshev, D.D. Dmitriev, V.N. Ratushniak // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Dynamics. – 2017. – С. 1-4.
5. Тяпкин, В.Н. Способ угловой ориентации объекта по радионавигационным сигналам космических аппаратов / В.Н. Тяпкин, В.Н. Ратушняк, Д.Д. Дмитриев, А.Б. Гладышев, Н.С. Кремез // Патент на изобретение RU 2618520 С, 04.05.2017. Заявка № 2016114995 от 18.04.2016.

Материал поступил в редколлегию 06.10.20.

И.В. Зачиняев, М.И. Кавалер, М.В. Ярославцев  
(г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПРИГОРОДНОГО ПОЕЗДА НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

### **MODELLING OF ENERGY CONSUMPTION OF A HYBRID DIESEL-ELECTRIC LOCOMOTIVE**

*Предложена конструкция аккумуляторного электропоезда с зарядкой батареи на конечных станциях маршрута. По результатам тягового расчета определены основные характеристики структурных элементов тягового привода, найден экономический эффект, достигаемый за счет повторного использования энергии.*

*In the article has been proposed a battery-electric commuter multiple unit train which can be charged at the end stations of the route. The traction energy calculation has been performed to find the main properties of traction drive. The economic effect of changing diesel multiple units with battery electric units has been estimated.*

*Ключевые слова: аккумуляторный электропоезд, накопитель энергии, расход энергии на тягу.*

*Keywords: battery-electric multiple unit train, energy storage, traction energy consumption.*

В ряде регионов России осуществляется движение местных и пригородных поездов по неэлектрифицированным линиям железных дорог, для которых характерны низкие размеры движения и малые ускорения. Как правило, пассажирские перевозки на таких линиях осуществляются дизель-поездами либо прицепными вагонами локомотивной тяги. Поскольку для пригородного движения характерны частые остановки для посадки пассажиров, значительная экономия топлива может быть достигнута повторным использованием кинетической энергии поезда.

Кроме того, для более эффективного использования мощности моторного подвижного состава целесообразна замена локомотивов специализированными поездами малой составности с моторными вагонами. Применение накопителей энергии в составе тягового электропривода позволит как использовать энергию торможений на остановках и затяжных спусках, так и выровнять нагрузку на двигатель, что также позволит снизить удельный расход топлива.

В работе предложено использовать пригородные поезда на

аккумуляторной тяге, заряжаемые на конечных станциях от контактной сети, поскольку значительное количество обслуживаемых дизель-поездами линий примыкает к электрифицированным участкам. Использование электрической энергии для тяги позволит существенно снизить стоимость эксплуатации электропоезда. Экономия может быть достигнута за счет снижения стоимости единицы энергии, возможности возврата энергии торможения в накопитель, а также сокращения стоимости технического обслуживания и ремонта при отказе от применения дизельного двигателя и унификации части оборудования с существующими электропоездами [1, 2].

Очевидным недостатком решения являются значительные потери времени на заряд аккумуляторных батарей. В то же время для неэлектрифицированных линий характерен более низкий коэффициент использования подвижного состава. Кроме того, применение тягового электропривода позволит эффективно эксплуатировать поезд и на электрифицированных плечах.

Для подтверждения технической возможности и экономической целесообразности применения аккумуляторных электропоездов необходимо исследовать зависимость потребляемой тяговым приводом мощности от времени. Эта задача была решена при помощи имитационной модели, описывающей движение поезда по участку железной дороги [3, 4]. Модель разработана в среде Simulink. В качестве базового транспортного средства для расчета были приняты характеристики секции электропоезда серии ЭР2, как наиболее распространенного на сети железных дорог России и близкого по своим тягово-энергетическим характеристикам к другим сериям эксплуатируемых электропоездов [5].

Разработанная модель реализует уравнения движения поезда на основе заранее построенных тяговых и тормозных характеристик. Её особенностями является табличное задание профиля пути и режимов движения поезда при помощи блоков Lookup table. При моделировании процесса движения поезда по перегону принимается, что для сокращения расхода энергии машинист реализует максимально возможные ускорение и замедление, что позволяет снизить установившуюся скорость движения по перегону при сохранении времени хода и тем самым снизить потери на преодоление сопротивления движению поезда.

Согласно результатам выполненного на модели тягово-энергетического расчета для участка протяженностью 67 км необходимая энергоёмкость аккумуляторной батареи составляет 650 МДж (180 кВт·ч) при движении в

четном и 1130 МДж (310 кВт·ч) в нечетном направлениях. Полученные значения соответствуют удельному расходу энергии на тягу 26...44 вт·ч/т·км. Разность результатов объясняется особенностями профиля расчетного участка. Сравнительно низкая величина расчетного удельного расхода объясняется возвратом энергии при торможении на остановках и спусках.

Полученные результаты позволяют сделать оценку параметров накопителя энергии. Для обеспечения движения поезда по участку достаточно литиевой аккумуляторной батареи массой около 2 т, что позволяет разместить её под кузовом выпускаемых секций электропоездов [6]. Проведенный технико-экономический анализ показал, что при условии эксплуатации аккумуляторного электропоезда на сравнительно коротких автономных участках срок окупаемости предложенного решения составляет 5 лет при сравнении вариантов эксплуатации аккумуляторного и дизель-поездов равной вместимости, совершающих 2 пары рейсов в сутки.

#### Список литературы

1. *Spiridonov, E. A.* Evaluation of energy recuperation efficiency for operating conditions of city electric transport / E. A. Spiridonov, M. V. Yaroslavtsev // Proceedings of IFOST-2016 : 11th International Forum on Strategic Technology.– Novosibirsk, 2016.– P. 61-64.
2. *Ярославцев, М. В.* Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Ярославцев Михаил Викторович; Новосиб. гос. техн. ун-т.– Новосибирск, 2016.– 16 с.
3. *Yaroslavtsev, M. V.* Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain / M. V. Yaroslavtsev, N. I. Schurov, E. A. Belova // Applied Mechanics and Materials.– 2014.– Vol. 698.– P. 7-11.
4. *Ярославцев, М. В.* Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I Международной научной конференции молодых ученых.– Новосибирск, 2014.– С. 290-293.
5. *Цукало, П. В.* Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин– М.: Транспорт, 1986.– 359 с.
6. *Goldie-Scot, L. A* Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices [Электронный ресурс] // Bloomberg NEF.– Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.– дата обращения: 01.10.2020.– загл. с экрана.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

С.М. Зейналова

(Азербайджан, г. Сумгаит, Сумгаитский государственный университет)

**АЛГОРИТМ АССОЦИАТИВНОГО ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ  
В БАЗАХ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ ИНСТРУМЕНТА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ**

**ALGORITHM FOR ASSOCIATIVE SEARCHING FOR INFORMATION  
IN DATABASES AND KNOWLEDGE OF THE COMPUTER-AIDED DESIGN TOOL  
FOR SPECIALIZED ELECTRONIC INTERFACES**

*Приведены основные требования к разработке специализированных электронных интерфейсов на примере гибких производственных систем (ГПС) при их испытании и внедрении. Разработан алгоритм ассоциативного поиска в базах данных и знаний системы проектирования электронных устройств (Or CAD) для обеспечения функционирования инструмента автоматизированного проектирования (ИАП) в средах САПР (CAD framework).*

*The basic requirements for the development of specialized electronic interfaces on the example of flexible manufacturing systems (FPS) during their testing and implementation are given. An algorithm for associative search in databases and knowledge of the electronic design system (Or CAD) to ensure the functioning of the computer-aided design (CAD) tool in the CAD framework has been developed.*

*Ключевые слова: САПР, ГПС, среда САПР, CAD framework, ИАП, электронный интерфейс.*

*Keywords: CAD, FMS, CAD area, CAD framework, tool of computing design.*

Как показано в [1] опыт проектирования и внедрения ГПС в различных производствах показал, что все компоненты ГПС - стандартные мехатронные и вспомогательные устройства, обычно снабжаются соответствующими устройствами управления. При создании ГПС с использованием перечисленных компонентов и других нестандартных элементов требуется их физическая и программная привязка для обеспечения функционирования ГПС во взаимодействии «коллектива» мехатронных устройств (МУ). Кроме того, для идентификации текущих состояний в различных ситуациях функционирования ГПС, также требуется сбор и обработка информации из сенсоров, установленных в различных узлах мехатронных и других устройств.

Анализ [1] обобщенной структурной схемы ГПС показал, что в ГПС обычно применяются три основных типов интерфейсов: стандартные электронные интерфейсы между стандартными мехатронными устройствами

(проектируются специалистами специализированных конструкторских и проектных организаций ); специализированные электронные интерфейсы между нестандартными и стандартными мехатронными устройствами ( такие интерфейсы проектируются и изготавливаются в зависимости от требований объекта автоматизации, при испытании и внедрении, специалистами по автоматизации конкретной ГПС ); специализированные электронные интерфейсы между системой управления (СУ) ГПС со стандартными и нестандартными МУ( такие интерфейсы обеспечивают связь СУ между сенсорами, установленными в различных позициях МУ и исполнительными механизмами и проектируются в зависимости от требований объекта, при испытании и внедрении, специалистами по автоматизации конкретной ГПС).

В соответствии с определением САПР [2], САПР ГПС определяется как инструментарий проектировщиков: разработчика, конструктора, технолога, специалиста по автоматизации и испытателя. Кроме того, анализ [3] показал, что в конце 90-ые и двухтысячные годы разработаны множества версии САПР радиоэлектронных элементов и устройств, расширенными функциональными возможностями. Следовательно, специалисты по автоматизации с использованием ресурсов (пакеты разработанных прикладных программ, библиотеки радиоэлектронных элементов, базы данных и знаний и др.) различных версий САПР радиоэлектронных элементов и устройств, также предложенного ИАП [1], функционирующего в среде САПР (CAD framework), могут проектировать специализированные электронные интерфейсы непосредственно в производственных условиях. При этом одним из основных задач является оперативный поиск нужной информации в базах данных и знаний, библиотеках и др. запоминающих устройствах среде САПР электронных элементов и устройств.

В тезисе доклада рассматривается один из подходов решения данного вопроса. Суть данного подхода заключается в использовании в алгоритме поиска нужных электронных компонентов метода, ассоциативного поиска.

Как известно [4] ассоциативный поиск нужной информации в запоминающем массиве (ЗМ) осуществляется не по адресу, а по ее содержанию (ассоциативному признаку, т.е. по наиболее важным признакам). Например, при поиске нужного электронного элемента необходимо поиск не по всем справочным характеристикам, а именно с учетом наиболее важным, которые определяются экспертами. При этом не важные справочные характеристики в каждой конкретной ситуации замаскируются и не участвуют в процесса ассоциативного поиска.

Структура поиск нужной информации в базах данных и знаний по ассоциативному признаку показана на рис. 1.

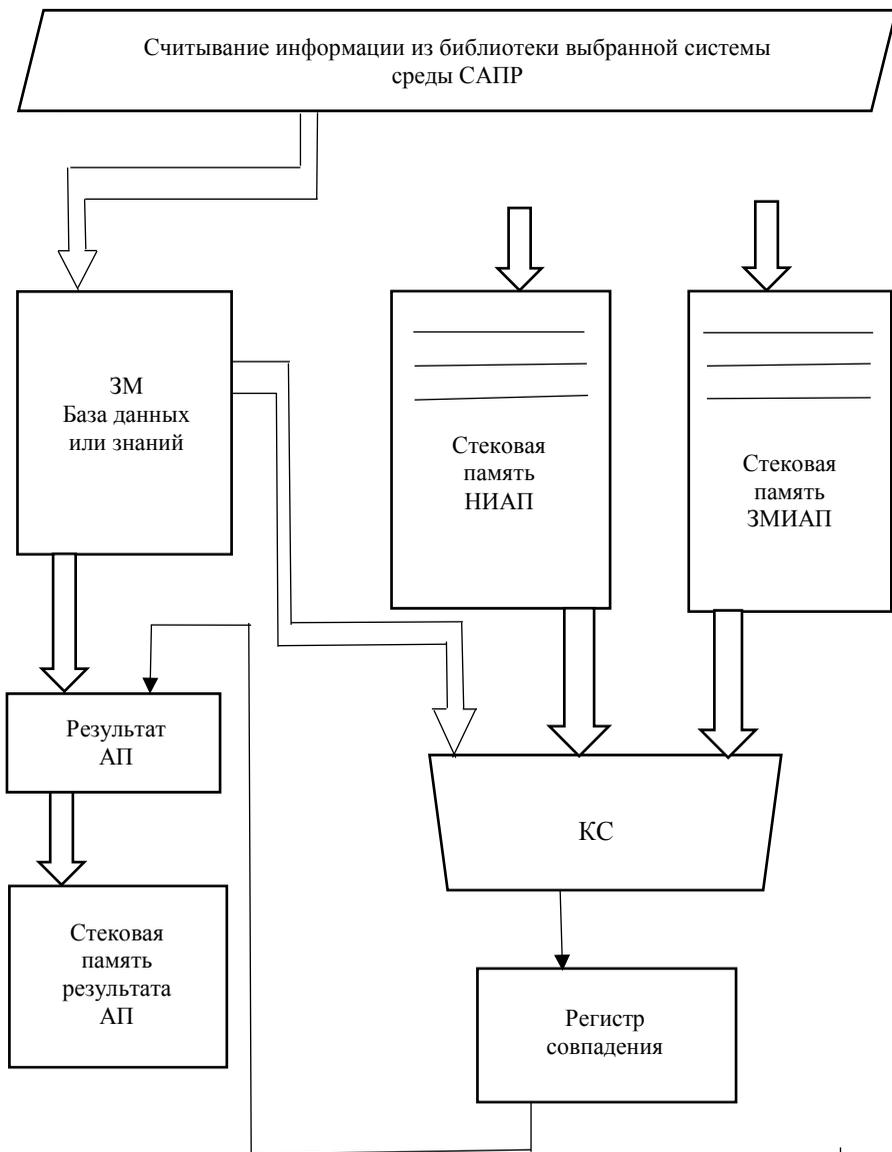


Рис. 1. Структура поиск нужной информации в базах данных и знаний по ассоциативному признаку

Алгоритм:

1. Считывается информация из библиотеки выбранной системы среды САПР и записываются в рабочую базу данных или знаний ИАП электронных интерфейсов ГПС.

2. Незасекреченная информация об ассоциативном поиске (НИАП) и засекреченная маской информация АП (ЗМИАП) соответствующих электронных элементов последовательно заполняются в память НИАП и ЗМИАП, соответственно, стекового типа, функционирующего по принципу первым поступил, первым обслуживается.

3. Комбинационной схеме (КС) последовательно выполняются следующие логические операции:

$$Рез СВ(i) = \bigwedge_{i=0}^{i=n-1} \{ \overline{НИАП[i]} \oplus \overline{ЗМ[i, j]} \vee \overline{ЗМИАП[i]} \}.$$

При этом ассоциативный поиск производится лишь для совокупности разрядов ИАП, которым соответствуют 1 в ЗМИАП.

4. При совпадении НИАП и информации запоминающего массива в базе данных с выхода регистра совпадения разрешается запись результата АП в выходную стековую память.

5. Ассоциативный поиск продолжают до тех пор, пока не проверяются все НИАП в стековой памяти.

Преимущество ассоциативного поиска заключается в том, что при этом поиск происходит параллельно во времени для всех ячеек запоминающего массива базы данных.

### Список литературы

1. *Магомедли, Х.М.* Разработка инструмента автоматизированного проектирования специализированных электронных устройств гибкой производственной системы/ Х.М. Магомедли, С.М. Зейналова // Труды научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы-2019». Москва :РУДН, 2019. – 536 с.

2. *Сольницев, Р.И.* Система автоматизации проектирования-инструментарий проектировщика/ Р.И. Сольницев // ЭВМ в проектировании и производстве. – Л: Машиностроение, 1983. – С.60-71.

3. *Магомедли, Х.М.* Сравнительный анализ систем автоматизированного проектирования электронных устройств и определение перспективы их развития/ Х.М. Магомедли, Р.З. Расулов // Научные известия Сумгаитского государственного университета. – 2016. – Т.16. – №3. – С.59-64.

4. *Каган, Б.М.* Электронные вычислительные машины и системы/ Б.М. Каган. – Изд. 3-е перераб. и доп.-М: Энергоатомиздат, 1991. –592 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

С.Н. Кихтенко

(г. Таганрог, Таганрогский институт имени А.П. Чехова  
(филиал) «РГЭУ (РИНХ)»)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

MODELING STATIONARY THERMAL PROBLEMS  
IN THE EDUCATIONAL PROCESS

*Представлен опыт формирования навыков компьютерного моделирования в учебном процессе на примере решения стационарных тепловых задач.*

*The article presents the experience of developing computer modeling skills in the educational process on the example of solving stationary thermal problems.*

*Ключевые слова: тепловые задачи, стационарный, компьютерное моделирование.*

*Keywords: thermal problems, stationary, computer modeling.*

При изучении цикла технологических дисциплин, курсов по выбору, некоторых разделов физики студенты направления подготовки «Педагогическое образование» (сдвоенный профиль) профилями «Физика» и «Технология» сталкиваются с необходимостью рассмотрения тепловых явлений, которые являются важными составляющими целого ряда технологических процессов и играют заметную роль в работе различных тепловых машин и устройств. При этом приходится овладевать техникой решения тепловых задач, как стационарных, так и нестационарных. Ввиду того, что нестационарные уравнения математической физики (теплопроводности, диффузии и др.) начинают изучать с третьего курса, а технологические дисциплины и курсы по выбору – со второго, то логичнее и проще начинать с решения стационарных задач, так как для их решения достаточно закона Фурье, понятия градиента, простейших навыков интегрирования и некоторых других соотношений, вполне очевидных для восприятия.

Вначале мы рассматриваем задачи теплопроводности с граничными условиями I рода с постоянным коэффициентом теплопроводности. Это – простейшие задачи. Затем – с коэффициентом теплопроводности, линейно зависящим от температуры, и многослойные конструкции. Далее изучаются задачи с граничными условиями III рода строительной теплофизики, энергетики, металлургии и т.д., иными словами – различные ограждающие конструкции. После этого моделируются задачи с внутренними источниками тепла различного происхождения. В последнюю очередь моделируются задачи теплопередачи через однослойные и многослойные стенки. Кроме того, студенты постоянно работают со справочной литературой по теплофизическим характеристикам материалов, проводят их сравнительный анализ. По мере изучения и углубления в курс, будущие учителя физики и технологии могут оценить многообразие и роль тепловых явлений, как в

окружающей жизни, так и в организации различных технологических процессов. В качестве геометрических моделей используются пластины, цилиндры, плоские и цилиндрические стенки [2],[3].

Для более быстрого получения расчетного результата, его наглядного графического представления, развития навыков компьютерного моделирования нами используется математический пакет Mathcad, а именно – его версия Mathcad15 [1].

Ниже, на рис. 1, показана одна из иллюстраций к таким расчетам – распределение температуры в стальном трубопроводе, покрытом двумя слоями изоляции. По горизонтальной оси показаны линейные размеры, в метрах, по вертикальной – температура в Кельвинах. Рядом, справа, показано поперечное сечение этой трехслойной системы.

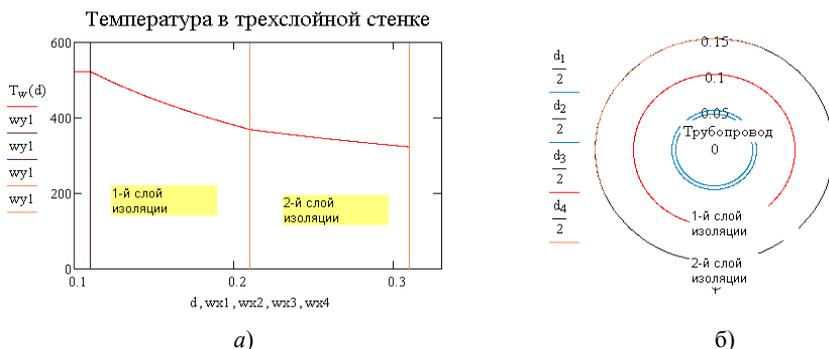


Рис. 1. а) График распределения температуры в трехслойной стенке, как функция диаметра  $d$ ; б) поперечное сечение системы трубопровод – два слоя изоляции.

Решение нестационарных тепловых задач как аналитическими, так и численными методами возможно на старших курсах и в магистратуре по программе «Технология».

Конечно же мы знаем, что существуют специализированные математические пакеты для численного решения уравнений в частных производных параболического типа и других, с эффективными алгоритмами вычисления, мощным графическим интерфейсом и т.д. Работа с ними требует определенной подготовки и, как правило, они являются коммерческими продуктами [4]. Наша задача состоит в другом – сформировать навыки компьютерного моделирования тепловых задач на примере более простых, какими являются стационарные, а затем переходить к более сложным. Как показывает опыт преподавания последних лет, этот подход вполне себя оправдывает.

### Список литературы

1. Кирьянов, Д.В. Mathcad 15/ Mathcad Prime 1.0. / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
2. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов/ В.П. Исаченко и др. – М.: Энергия, 1975. – 488с.
3. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче: учебное пособие для вузов/ Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
4. Солодов, А.П. Mathcad. Дифференциальные модели. / А.П. Солодов, В.Ф. Очков. – М.: МЭИ, 2002. –239 с.

Материал поступил в редколлегию 13.10.20.

А.Г. Коркин, А.Б. Фокин, К.Л. Цвилов  
(г. Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

## МОДЕЛЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РАДИОКАНАЛЕ

### MODEL FOR REGULATING THE DATA TRANSMISSION RATE IN THE RADIO CHANNEL

*Оборудование сети радиодоступа осуществляет регулирование скорости передачи в зависимости от состояния канала. Автоматическое регулирование скорости осуществляется реализацией различных схем гибридной решающей обратной связи и выбора схемы модуляции и кодирования, изменением размера блока данных. Предлагается математическая модель регулирования скорости передачи данных с учетом задержек управления.*

*Radio access equipment regulates the transmission rate depending on the channel state. Automatic rate control is carried out by implementing various hybrid decision feedback schemes and choosing a modulation and coding scheme, adjusting the size of the data block. A mathematical model is proposed for regulating the data transmission rate taking into account tcontrol delays.*

*Ключевые слова: радиоканал, скорость передачи данных.*

*Keywords: radio channel, data rate.*

Регулирование скорости передачи в радиоканале между базовой и абонентской станциями осуществляется циклически  $\tau = \tau_{cqi} + \tau_{per}$ , где  $\tau_{cqi}$  – время задержки передачи информации о состоянии радиоканала по каналу обратной связи, и  $\tau_{per}$  – время обработки информации о состоянии радиоканала и передачи блока данных с выбранной скоростью передачи. В свою очередь,  $\tau_{cqi} = nT_{бд}$ , где  $T_{бд}$  – длительность блока данных,  $n \geq 2$  – задержка передачи сигналов обратной связи, определяемая планировщиком базовой станции.

В современных технологиях мобильного беспроводного доступа задержки в регулировании скорости передачи могут быть больше времени когерентности радиоканала. В данной ситуации планировщик базовой станции при принятии решения о скорости передачи может осуществить выбор более высокой скорости передачи, несоответствующей текущему состоянию радиоканала, что приведет к увеличению ошибочной передачи блоков данных и существенному снижению вероятности связи.

Автоматическое регулирование скорости передачи данных осуществляется за счет адаптивного выбор схем модуляции и кодирования на основе результатов измерений значения отношения сигнал-шум. При этом

определяются пороговые значения отношения сигнал-шум, определяющие интервалы значений данного показателя состояния радиоканала, в которых выполняется требование по достоверности передачи. Выбор определенной схемы гибридной решающей обратной связи, включающей процедуры автоматического запроса повторной передачи и помехоустойчивого кодирования осуществляется на основе оценки вычисляемого значения вероятности ошибки на блок данных.

В предлагаемой модели регулирование скорости передачи данных осуществляется с учетом задержки управления. На каждом временном интервале  $\tau$  устанавливается максимально допустимое значение скорости передачи  $V_{\text{бит } i}$ , неизменяющееся на данном временном интервале, при котором обеспечивается требуемое качество связи, определяемое отношением энергии сигнала к мощности помехи  $\gamma_{\text{тр}}$ , с заданной вероятностью связи  $P\{\gamma(t, t + \tau) \geq \gamma_{\text{тр}}\}$  [1]. Значение максимально допустимой скорости передачи данных определяется на основе измерения статистических свойств канала и учитывает автокорреляционную функцию коэффициента передачи радиоканала.

Расчет максимально допустимого значения скорости передачи на временной интервале регулирования осуществляется в соответствии с выражением 1:

$$V(t, t + \tau)_{\text{расч}} = \frac{\beta_m}{h_{\text{тр}}} \cdot \exp\{\sigma \cdot [x \cdot R(\tau) - x_p \sqrt{1 - R^2(\tau)}]\}, \quad (1)$$

где  $\beta_m$  – медианное значение параметра канала  $\beta$ ,  $\sigma = \sigma_{\ln \beta}$ ,  $R(\tau)$  – нормированная автокорреляционная функция передачи канала,  $x_p$  – расчетный параметр.

Выбор скорости передачи из допустимых значений скорости передачи  $V_{\text{бит } i}$ , определяемых схемами модуляции и кодирования, осуществляется в соответствии с условиями выражений 2-3

$$\left| V_{\text{бит}}(t, t + \tau)_{\text{расч}} - V_{\text{бит } i} \right| \Rightarrow \min. \quad (2)$$

$$V_{\text{бит } i} \leq V_{\text{бит}}(t, t + \tau)_{\text{расч}}. \quad (3)$$

Учет задержек обеспечивает регулирование скорости передачи данных в радиоканале без потерь по вероятности связи.

### Список литературы

1. Коркин, А.Г. Оценка скорости передачи в сети радиодоступа. Современные технологии в науке и образовании / А.Г. Коркин, А.Б. Фокин // СТНО-2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; под общ. ред. О.В. Милвзорова. – Рязань, 2019. – Т.1. – С. 122–126.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

А.В. Королев, А.Г. Коркин, С.А. Корнилов  
(г. Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫЗОВОВ В СИМУЛЯТОРЕ ТЕЛЕФОННОЙ СТАНЦИИ**

### **MODELING THE CALL SERVICE PROCESS IN THE TELEPHONE STATION SIMULATOR**

*Для повышения качества подготовки специалистов по эксплуатации коммутационного оборудования важной задачей является разработка программных симуляторов. Представлен процесс моделирования модуля подсистемы обработки информации и управления вызовами и соединениями программного симулятора автоматической телефонной станции.*

*To improve the quality of training specialists in the operation of switching equipment, an important task is the development of software simulator. The process of modeling the module of the subsystem of information processing and control of calls and connections of the software simulator of an automatic telephone station is presented.*

*Ключевые слова: телефонная станция, программный симулятор.*

*Keywords: telephone station, software simulator.*

В настоящее время осуществляется модернизация сетей связи специального назначения с внедрением разнотипного коммутационного оборудования. Для администрирования АМТС и обеспечения установления соединений в полуавтоматическом и ручном режимах используются программно-аппаратные комплексы рабочих мест операторов (РМО) станции и ручного междугороднего коммутатора со специализированным программным обеспечением (ПО). В практике инженерной подготовки все чаще используют тренажерные средства обучения, программы-симуляторы. Высокая стоимость оборудования АМТС, невозможность использования для обучения действующих на сети станций и дефицит учебных РМО привели к необходимости создания программно-аппаратных комплексов, симулирующих процессы администрирования АМТС.

Анализ архитектуры ПО РМО позволяет в составе рабочего места оператора по выполняемым функциям выделить модуль пользовательского интерфейса, модуль авторизации, модуль подсистемы обработки информации, управления вызовами и соединениями, модуль взаимодействия с АМТС.

Для формирования практических навыков оператора по администрированию станции и установлению соединений в симуляторе необходимо воссоздание программных модулей пользовательского интерфейса и авторизации, обработки информации и управления вызовами и соединениями. Разработка программного модуля подсистемы обработки

информации и управления вызовами и соединениями, адекватно воссоздающего реальный процесс обслуживания при установлении соединений, требует моделирование процесса обслуживания вызовов, производимых в станции и контролируемых ручным коммутатором.

Для моделирования процессов обслуживания при установлении соединений целесообразно использовать имитационное моделирование, рассматривая работу по установлению соединений как систему массового обслуживания. С учетом проведенного рассмотрения особенностей моделируемого объекта и целей моделирования процесс обслуживания вызовов может быть формально представлен в виде многоканальной системы распределения информации с ожиданием в очереди. Поток поступающей нагрузки в зависимости от количества источников ( $N$ ) описывается моделью примитивного ( $N < 15 \cdot V$ ) или простейшего потока ( $N \geq 15 \cdot V$ ). В соответствии с символикой Кендалла–Башарина используемые типы моделей систем распределения информации (СМО) могут быть обозначены как  $M / M / V / W, r \rightarrow \infty / FF / R$  и  $M_i / M / V / W, r / FF / R$  [1]. На входы системы  $M / M / V / W, r \rightarrow \infty / FF / R$  поступает простейший поток вызовов с параметром  $\lambda = const$ . На входы системы  $M_i / M / V / W, r / FF / R$  поступает примитивный поток вызовов с параметром  $\lambda_i = \alpha \cdot (N - i)$ . Длительность обслуживания вызова – величина случайная, распределенная по экспоненциальному закону. Коммутационное поле исследуемых систем – неблокируемое. Способ обслуживания – с ожиданием. Порядок обслуживания «первый пришел – первый обслужился». Занятие каналов равновероятное.

Процесс взаимодействия входного потока вызовов с системой распределения информации характеризуется следующими показателями качества обслуживания: вероятность наличия очереди; вероятность того, что время ожидания превысит требуемую величину, среднее время ожидания вызовов; средняя длина очереди. Оценка данных показателей может выполняться на основе применения программ имитационного и аналитического моделирования.

Аналитическое моделирование системы  $M / M / V / W, r \rightarrow \infty / FF / R$  осуществляется на основе метода Эрланга для систем с ожиданием (вторая формула Эрланга). Имитационная модель, написанная в среде C++ построена на основе алгоритма истинного процесса обслуживания, предполагающего использование двух подпрограмм реализации экспоненциально распределенных случайных величин: длительностей промежутков между вызовами и длительностей обслуживания вызовов.

### Список литературы

1. Корнышев, Ю. Н. Теория телетрафика / Ю. Н. Корнышев, А. П. Пшеничников, А. Д. Харкевич. – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

А.Г. Малаханова

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ SCILAB**

### **SOLUTION OF A LINEAR PROGRAMMING PROBLEM IN SCILAB**

*Представлены результаты применения метода линейного программирования в Scilab для оптимизации условий функционирования технических систем.*

*The results of applying the linear programming method in Scilab to optimize the conditions for the functioning of technical systems are presented.*

*Ключевые слова: линейное программирование, оптимизация.*

*Keywords: linear programming, optimization.*

Очень часто основной целью исследований является нахождение оптимальных условий. Значительно облегчает решение задач оптимизации использование компьютерной техники.

В настоящее время имеется много программных продуктов для математического расчета, программирования и визуализации. Однако преимуществом Scilab является то, что он предназначен для выполнения инженерных и научных вычислений и является бесплатным программным обеспечением с открытым исходным кодом для инженеров и ученых. А по синтаксису схож с Matlab.

Scilab применяется для решения нелинейных уравнений и систем, решения задач линейной алгебры, решения задач оптимизации, дифференцирования и интегрирования, обработки экспериментальных данных, решения обыкновенных дифференциальных уравнений и систем. Также Scilab предоставляет возможности по созданию и редактированию различных видов графиков и поверхностей.

Рассмотрим применение линейного программирования средствами Scilab для определения оптимальных режимов резания при обработке детали.

Оптимальным режимом резания называется такая совокупность всех его элементов (глубины, подачи и скорости резания), которая обеспечивает наибольшую производительность или наименьшую стоимость обработки.

Оптимизация режимов резания позволяет значительно повысить производительность используемого оборудования и улучшить качество выпускаемой продукции. Для определения оптимальных условий режимов резания эффективно использовать линейное программирование. Для этого необходимо определить ограничения, препятствующие увеличению режимов резания; получить математическую модель процесса резания. И далее,

используя метод линейного программирования, определить режим резания, позволяющий достичь минимального машинного времени обработки детали резанием при обеспечении технических требований к обработанной детали.

Прежде чем выполнить соответствующие расчеты устанавливаются ограничения по инструменту, по станку и технологические, препятствующие увеличению режимов резания. Эти ограничения следующие.

1. По режущим свойствам инструмента;
2. По мощности главного привода станка;
3. По наименьшей частоте вращения шпинделя станка;
4. По наибольшей частоте вращения шпинделя станка;
5. По наименьшей подаче станка;
6. По наибольшей подаче станка;
7. По прочности державки резца;
8. По жесткости державки резца;
9. По жесткости системы станок-приспособление-инструмент-деталь;
10. По прочности механизма подач станка;
11. По допустимой шероховатости;
12. По прочности пластинки твердого сплава;
13. По допустимой глубине резания.

Для построения математической модели процесса резания металлов и использования линейного программирования необходимо все неравенства ограничений и целевой функции преобразовать в линейные неравенства.

Далее находят такие значения переменных  $X_1, X_2, X_3$ , при которых функция цели  $F = X_1 + X_2 + X_3 \rightarrow \max$  и удовлетворяются ограничения:

$$\begin{aligned}
 X_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_1; \\
 (1 + n)X_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_2; \\
 X_1 &\geq b_3; \\
 X_1 &\leq b_4; \\
 X_1 + X_2 &\geq b_5; \\
 X_1 + X_2 &\leq b_6; \\
 nX_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_7; \\
 nX_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_8; \\
 nX_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_9; \\
 nX_1 + yX_2 + xX_3 &\leq b_{10}; \\
 X_2 + xX_3 &\leq b_{11}; \\
 nX_1 + yX_2 + (x - 0,77)X_3 &\leq b_{12}; \\
 X_3 &\leq b_{13};
 \end{aligned}$$

Для решения задач линейного программирования в Scilab используется функция `linpro`. Для нахождения  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  создадим `sce`-файл и запишем в нем программу:

```
// Определение коэффициентов целевой функции
c=[1;1;1];
// Задание матрицы и вектора правой части системы неравенств
A=[1 0.85 0.15; 0.85 0.75 1; -1 0 0; 1 0 0; -1 -1 0; 1 1 0; -0.15 0.75 1; -0.15 0.75 1;
-0.3 0.6 0.9; -0.4 0.5 1; 0 1 0.3; -0.15 0.75 0.23; 0 0 1];
b=[7.584;9.84;-2.526;7.601;-5.704;11.695;3.982;5.481;12.298;2.44;4.923;3.457;
1.504];
Задание ограничений снизу на переменные
ci=[0;0;0];
// Решение и вывод результата в командное окно
[x,kl,f]=linpro(-c,A,b,ci,[])
```

Запустив этот файл на исполнение, получим следующий результат:

$X_1 = 3,8889$ ;  $X_2 = 4,0818$ ;  $X_3 = 1,5040$ .

Поясним используемую функцию `linpro` вида: `[x,kl,f]=linpro(-c,A,b,ci,[])`.

Так как по условию задачи необходимо найти максимум целевой функции, то параметр  $c$  берем со знаком «-», где  $c$  – массив коэффициентов при неизвестных целевой функции, длина вектора совпадает с количеством неизвестных.

$A$  – матрица при неизвестных из левой части системы ограничений, количество строк матрицы равно количеству ограничений, а количество столбцов совпадает с количеством неизвестных.

$b$  – массив, содержащий свободные члены системы ограничений.

$ci$  – массив, содержащий нижнюю границу переменных.

Таким образом, можно определить режим резания, позволяющий достичь минимального машинного времени обработки детали резанием при обеспечении технических требований к обработанной детали.

### Список литературы

1. *Алексеев, Е.Р.* Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова, Е.А. Рудченко. – М.: ALT Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 269 с.
2. *Рыжов, Э.В.* Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Scilab. Домашняя страница. – URL: <https://www.scilab.org> (дата обращения 22.09.2020).
4. *Васильев, А.С.* Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – Т. 2 – 756 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

Д.М. Медведев, А.А. Малаханов

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК LDD MOS ТРАНЗИСТОРА ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

**MODELING OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS  
OF LDD MOS TRANSISTOR AT CRYOGENIC TEMPERATURE**

*Представлены результаты моделирования вольт-амперных характеристик LDD MOS транзистора при криогенной температуре в приборно-технологической САПР Synopsys Sentaurus TCAD.*

*The results of modeling of the current-voltage characteristics of LDD MOS transistor at cryogenic temperature in the device-technological design system Synopsys Sentaurus TCAD was presented.*

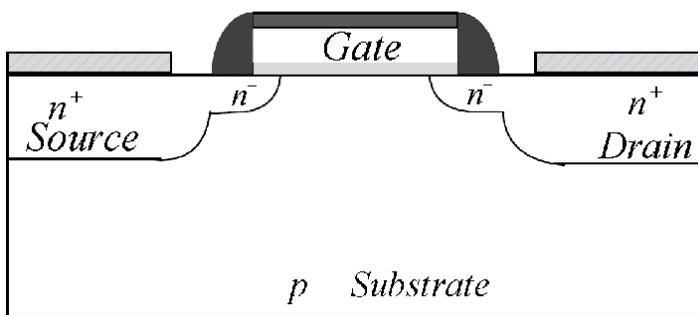
*Ключевые слова: LDD MOS транзистор, моделирование, вольт-амперная характеристика, криогенная температура.*

*Keywords: LDD MOS transistor, modeling, the current-voltage characteristic, cryogenic temperature.*

Рабочий температурный диапазон силовой электронной компонентной базы составляет от  $-60$  до  $+125$  °С. Это не позволяет использовать уже существующие изделия в устройствах с криогенным охлаждением. Криогенные электронные компоненты должны корректно работать при сниженном пороге отрицательных температур окружающей среды, соответствующем температуре кипения сжиженного азота  $-196$  °С (77 К).

Ключевыми потребителями криогенных транзисторов являются компании и организации, разрабатывающие, исследующие устройства силовой электроники и преобразовательной техники для транспортных систем с магнитной левитацией, гражданских и специальных электромобилей, летательных аппаратов с электрической тягой, речных и морских судов и др.

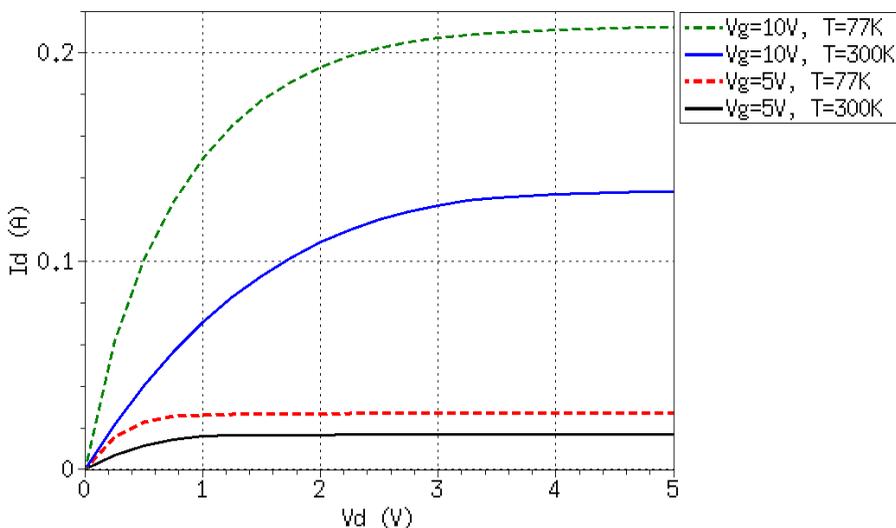
Компьютерное моделирование вольт-амперных характеристик МОП-транзистора со слаболегированным стоком (lightly-doped drain MOS) выполнялось в приборно-технологической САПР Synopsys Sentaurus TCAD. Размеры поперечного сечения транзистора (рис. 1) –  $6 \times 3$  мкм, фактор, учитывающий толщину, – 1000.



*Gate – затвор, Source – исток, Drain – сток, Substrate – подложка*

*Рис. 1. Схема поперечного сечения LDD MOS транзистора*

При вычислении токов в узлах сетки конечных элементов применялась диффузионно-дрейфовая модель, основанная на решении уравнений непрерывности для электронов и дырок, при вычислении потенциалов – решалось уравнение Пуассона. Выполнялось изотермическое моделирование – задавалась постоянная температура кристаллической решетки транзистора. Полученные кривые приведены на рис. 2–4.



*Рис. 2. Зависимость тока стока Id (A) от напряжения сток-исток Vd (B) при различных напряжениях на затворе Vg (B) и температуре T (K)*

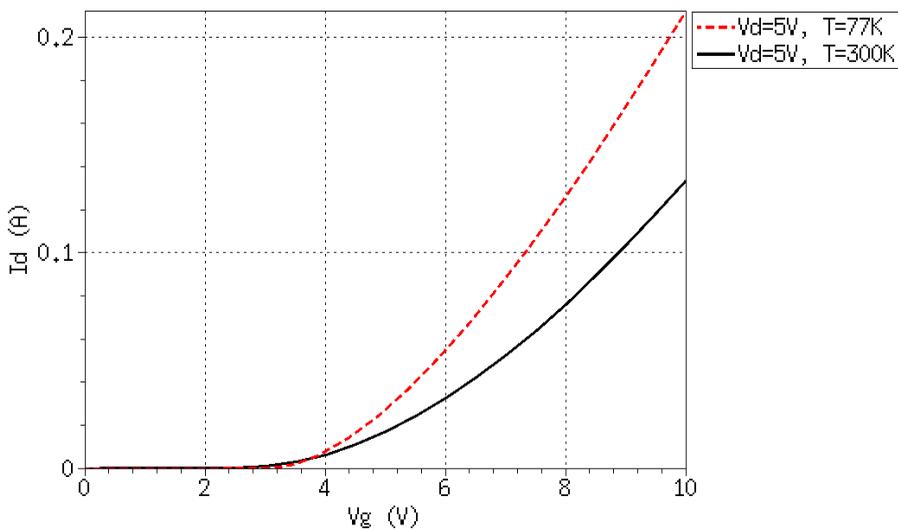


Рис. 3. Зависимость тока стока  $I_d$  (A) от напряжения на затворе  $V_g$  (B) при напряжении сток-исток  $V_d = 5$  В и различной температуре  $T$  (K)

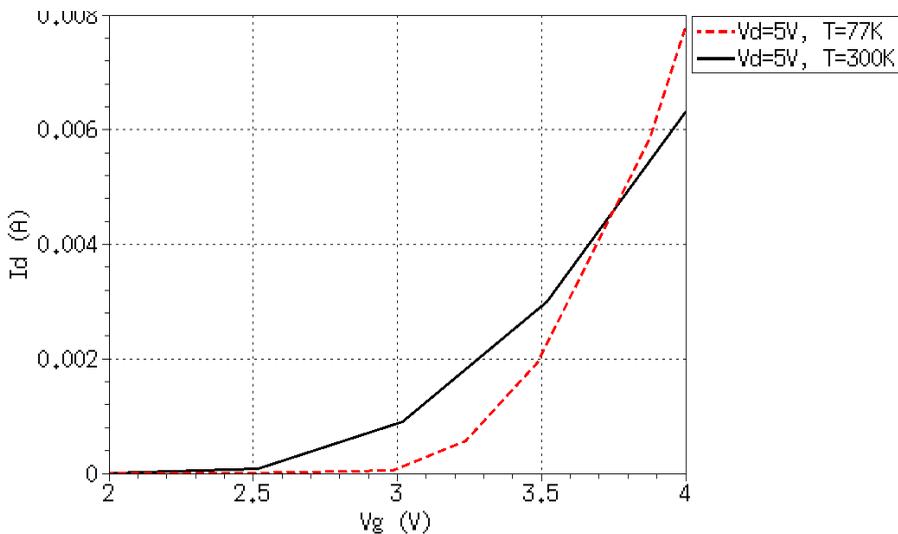


Рис. 4. Пороговое напряжение на затворе при напряжении сток-исток  $V_d = 5$  В и различной температуре  $T$  (K)

Использовались следующие команды для модуля SDevice:

```
Physics {
  AreaFactor = 1e3
  *Temperature = 77
}
Physics(Material = "Silicon") {
  EffectiveIntrinsicDensity(OldSlotboom)
  Mobility(
    DopingDependence
    Enormal(IALMob)
    HighFieldSaturation
  )
  Recombination(
    Auger
  )
}
Physics(MaterialInterface = "Oxide/Silicon") {
  Charge(SurfConc = 1e11)
}
Math {
  Extrapolate
  Iterations = 15
  NumberOfThreads = Maximum
}
Solve {
  Poisson
  Coupled {Poisson Electron Hole}
  Quasistationary(
    ...
  ){Coupled {Poisson Electron Hole}}
}
```

Результаты моделирования дают возможность сделать следующие выводы. При криогенной температуре, в сравнении с комнатной, вольт-амперные характеристики LDD MOS транзистора не меняют форму, их параметры улучшаются, за исключением порогового напряжения, которое немного повышается.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований из [1], что позволяет считать разработанную модель достаточно адекватной.

#### Список литературы

1. *Foty, D.P.* Thermal Effects in n-Channel Enhancement MOSFET's Operated at Cryogenic Temperatures / D.P. Foty, S.L. Titcomb // IEEE Transactions on Electron Devices. – Vol. Ed-34. – No. 1 (January 1987). – P. 107–113.

*Материал поступил в редколлегию 30.09.20.*

И.И. Медведев

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

## **ПРИМЕНЕНИЕ MULTISIM ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ САЙТА ПРОФСТАЖИРОВКИ.РФ**

USING MULTISIM IN PROJECT DEVELOPMENT  
OF WEBSITE PROFSTAZHIROVKI.RF

*Описывается опыт применения интерактивного эмулятора радиосхем Multisim при разработке проекта «Сигнализатор протечки воды», заявленного на сайте профстажировки.рф.*

*This paper describes the experience of using the interactive Multisim radio circuit emulator in the development of the project "water leak detector" announced on the website profstazhirovki.rf.*

*Ключевые слова: интерактивный эмулятор радиосхем Multisim, компьютерное моделирование схем электронных устройств, сигнализатор протечки воды.*

*Keywords: interactive Multisim radio emulator, computer simulation of electronic devices circuits, water leak detector.*

В течение последних двух лет активно продвигается идея более широкого привлечения студентов к участию в научно-технических разработках, которые проводятся научно-исследовательскими организациями, учреждениями и промышленными предприятиями. Для этого у нас в стране был создан сайт «профстажировки.рф». На этом сайте указанные организации, учреждения и предприятия (работодатели) выкладывают задания на разработку какой-либо задачи, темы, устройства, системы и т.д.

Студенты выбирают заинтересовавшее их задание (проект), проводят разработку и выкладывают её результаты обратно на этот сайт. Одно и то же задание (проект) могут выбрать сразу несколько студентов из одного или разных вузов страны. Работодателем проводится отбор лучшей выполненной работы на конкурсной основе.

Студенты выполняют разработки под руководством преподавателя. Иногда может создаваться творческий коллектив из нескольких студентов, которым руководит один руководитель.

Именно такой творческий коллектив из двух студентов под руководством автора настоящей статьи и был создан для работы над проектом (заданием) «Сигнализатор протечки воды», который был заявлен в прошлом году на сайте профстажировки.рф.

Работа над проектом проводилась в два этапа. Поскольку для творческого коллектива эта тема являлась новой, то на первом этапе была проведена научно-исследовательская работа, во время которой были выявлены

назначение сигнализатора протечки воды, области его применения, существующие аналоги, принципы построения и структура сигнализатора протечки воды.

На втором этапе была проведена разработка сигнализатора протечки воды по техническому заданию, представленному работодателем на сайте. Творческим коллективом были разработаны: схема электрическая принципиальная, печатная плата и корпус сигнализатора протечки воды. При этом основное внимание уделялось разработке схемы электрической принципиальной и печатной плате сигнализатора протечки воды. Именно на этом этапе разработки проекта и был применён Multisim.

Multisim – это интерактивный эмулятор радиосхем – одна из лучших компьютерных программ, которая широко применяется для моделирования различных радиоэлектронных устройств и широко используется как радиоинженерами, так и в учебном процессе. О достоинствах и недостатках Multisim автор писал в ряде публикаций [1 – 5].

С помощью Multisim было проведено моделирование разработанной принципиальной электрической схемы сигнализатора протечки воды (рис.1).

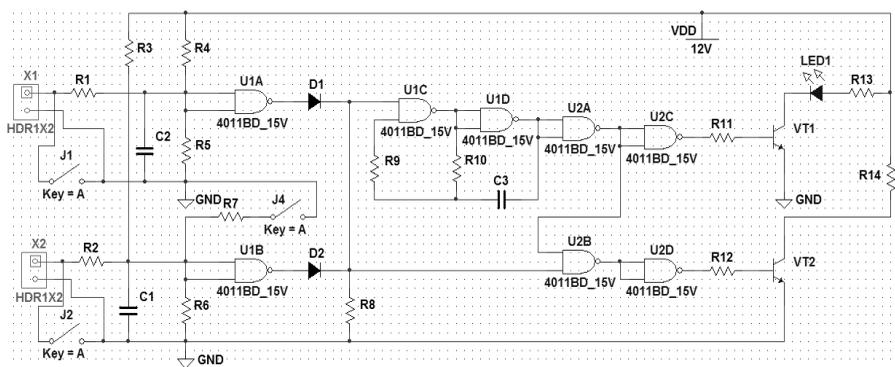


Рис. 1. Схема сигнализатора протечки воды в Multisim

Multisim позволил проверить работу принципиальной электрической схемы сигнализатора протечки воды в ждущем режиме и в режиме сигнализации о произошедшей протечке воды. В ждущем режиме (когда сигнализатор включен и готов к обнаружению протечки воды, но протечки воды пока нет) транзисторы VT1 и VT2, управляющие включением соответственно светового и звукового оповещателей, закрыты, поэтому светодиод LED1 (он имитирует световой оповещатель) не светится, а через R14 (он имитирует звуковой оповещатель) ток не протекает.

Моделирование ситуации обнаружения протечки воды в Multisim

осуществлялось замыканием одного из выключателей J1 или J2, или обоих вместе. В режиме обнаружения сигнализатором протечки воды транзисторы VT1 и VT2 открываются и срабатывают световой и звуковой оповещатели.

Моделирование в Multisim принципиальной электрической схемы сигнализатора протечки воды позволило сделать вывод о том, что расчёты элементов схемы были выполнены правильно. Используя измерительные приборы, имеющиеся в арсенале Multisim, была измерена потребляемая сигнализатором протечки воды мощность от источника питания. Измерения показали, что потребляемая мощность, примерно, в 8 раз меньше (что является одним из достоинств разработанного сигнализатора протечки воды), чем указано в техническом задании на сайте профстажировки.рф.

Таким образом, применение Multisim при разработке проекта «Сигнализатор протечки воды», заявленного на сайте профстажировки.рф, позволило быстро и качественно осуществить разработку проекта.

### Список литературы

1. *Медведев, И.И.* Компьютерное моделирование схем электронных устройств в учебном процессе / И.И. Медведев // САПР и моделирование в современной электронике [Текст] + [Электронный ресурс]: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.2. – С. 143 – 146.

2. *Медведев, И.И.* О целесообразности применения новых информационных технологий в учебном процессе/ И.И. Медведев // Математические методы и информационно-технические средства: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции, 22-23 июня 2012 г. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2012. – С. 130 – 131.

3. *Медведев, И.И.* О «подводных камнях» при применении программ схемотехнического моделирования в учебном процессе / И.И. Медведев // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии: сборник материалов международной научно-практической конференции, 10 июня 2015 г. – Часть 3. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. – С. 103 – 106.

4. *Медведев, И.И.* Применение компьютерных технологий при подготовке специалистов по радиотехническим специальностям / И.И. Медведев // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии: сборник материалов международной научно-практической конференции (Воронеж, 16 июня 2016 г.). – Часть 1-2. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2016. – С. 321 – 323.

5. *Медведев, И.И.* Ещё одна новая ошибка в Multisim 14 / И.И. Медведев // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. научно-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике», 24-25 октября 2019 г. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С. 41 - 43. – ISBN 978-5-907271-06-7. – Текст: непосредственный.

*Материал поступил в редколлегию 05.10.20.*

Г.И. Микита

(г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО АНПТ)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ САПР В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ  
ДЛЯ БАКАЛАВРИАТСКОГО КУРСА КПЭС**

**MODELING OF ELECTRONIC SYSTEMS CFD IN THE EDUCATIONAL PROCESS  
FOR BACHELORS IN THE COURSE OF DEEM**

*Приведена модель конструкторского проектирования электронных систем с применением САПР. Эта модель используется при обучении бакалавров по курсу КПЭС.*

*We have presented a model for the design of electronic systems using CAD. We use this model when teaching undergraduate courses of DEEM.*

*Ключевые слова: моделирование, электронные системы, САПР.*

*Keywords: modeling, electronic systems, CAD.*

Конструкторское проектирование электронных средств (КПЭС) преподается на 4 курсе бакалавриата на протяжении целого года.

В 7 семестре изучается моделирование конструкторско-проектной документации с применением САПР.

На стадии технического предложения в НИР обязательными являются:

ведомость технических предложений (ПТ);

пояснительная записка (ПЗ).

Моделирование создания этих документов значительно упрощается с помощью программ САПР.

На ПТ ставится штамп второго типа, с размерами 40x185, мм.

С помощью программ САПР (например, progeCAD) заполняются, например, прямым шрифтом Б, с заполненными графами 1, 2, 9, 11, 12, 13:

Графа 1. Наименование изделия (например, ЭПВК – электронный ПВ комплекс).

Графа 2. Код документа.

Он состоит из 13 символов. Первые четыре символа – код организации разработчика (например, АНПТ). После точки приводятся с помощью программы САПР 6 символов кода классификации электронного изделия (например, 431132).

После точки ставятся три символа – порядковый регистрационный номер электронного изделия (например, 001).

Таким образом, с помощью программы САПР проставляется код документа, например:

АНПТ.431132.001

Графа 9. Организация разработки (например, АНПТ)  
Графа 11. Фамилии И.О. лиц разрабатывавших, проверявших, зав.сектором, осуществлявшего нормоконтроль и утвердившего документ.  
Графа 12. Подписи.  
Графа 13. Даты подписей.  
ПЗ имеет титульный лист. На нем сверху по центру прописывается наименование организации разработчика (напрмер ООО АНПТ).  
Далее слева должностной код утвердившего ПЗ:  
2 цифры, пробел, 8 цифр.  
Справа: УТВЕРЖДАЮ  
Должность  
Подпись, И.О.Фамилия  
Дата.  
Посередине: название электронного изделия (например, ЭПВК).  
Ниже: Пояснительная записка  
Код документа, как в графе 2 штампа.  
Снизу слева:  
СОГЛАСОВАНО:  
Технолог  
Подпись, И.О.Фамилия  
Нач.управления  
Подпись, И.О.Фамилия  
Нач.департамента  
Подпись, И.О.Фамилия  
Справа:  
РАЗРАБОТАНО:  
Нач.отдела  
Подпись, И.О.Фамилия  
Зав.лабораторией  
Подпись, И.О.Фамилия  
Ассистент  
Подпись, И.О.Фамилия  
Внизу посередине год.  
Титульный лист в рамке без штампа.  
На ПЗ с помощью программ САПР со второй страницы ставится штамп 3 типа, с размерами 15x185, мм.  
Заполняются графы 2 и 7. Графа 7. Порядковый номер листа.  
Таким образом, моделирование электронных систем с помощью САПР, позволяет качественно улучшить процесс образования.

*Материал поступил в редколлегию 29.09.20.*

Г.И. Микита

(г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО АНИТ)

**ПРИМЕНЕНИЕ САПР В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ  
ПРИ КОНСТРУКТОРСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

APPLICATION OF CAD IN THE EDUCATIONAL PROCESS  
IN THE DESIGN OF ELECTRONIC TOOLS

*Рассмотрены возможности САПР для применения его в учебном процессе при конструкторском проектировании ЭС.*

*We have considered the possibilities of CAD for its application in the educational process in the design of electronic tools.*

*Ключевые слова: САПР, конструкторское проектирование, электронные средства.*

*Keywords: CAD, design engineering, electronic tools.*

Конструкторским документом проектирования электронных средств является чертеж общего вида (ВО).

ВО требует штамп 1 типа, с размерами 55x185, мм.

В нем заполняются графы:

Наименование изделия.

Код документа, состоящий из 13 символов - первые четыре символа – это код организации. Следующие 6 символов - код классификации электронного изделия. Последние три символа – порядковый регистрационный номер электронного изделия.

С помощью программы САПР проставляется код документа.

Заполняются графы - организация разработки.

Указываются Фамилии И.О. лиц разработывавших, проверявших, осуществлявшего контроль и утвердившего документ.

Заполняются графы - Подписи.

Проставляются даты подписей.

С помощью программ САПР чертеж ВО заполняется изображениями составных частей электронной системы.

Чертеж ВО является основой для чертежей деталей и спецификации.

На чертеже ВО имеется текстовая информация о элементах электронной системы.

На чертеже ВО наносят габаритные и присоединительные размеры.

Габаритный чертеж (ГЧ) имеет штамп 1 типа, с размерами 55x185, мм.

ГЧ содержит контуры изображения, с габаритными, установочными и присоединительными размерами.

Схема, оформляется с помощью программ САПР с штампом 1 типа, с размерами 55х185, мм.

На схеме с помощью условно-графических обозначений наносятся составные части электронной системы и связи между ними.

Функциональная схема позволяет показать функции работы электронной системы.

При разработке технических предложений проводятся:

1. Анализ технических решений.
2. Патентные исследования.
3. Варианты создания изделия.
4. Оптимальность решения.
5. Макетирование отдельных узлов.
6. Требования для следующих этапов.

На втором этапе НИР проводится:

Выбор направления исследований.

Теоретические и экспериментальные исследования.

Обобщение и оценка результатов исследований.

Основные требования к НИР:

Выполнение всех разделов НИР.

Формирование обязательных документов.

Формирование документов для экспертизы.

Технико-экономическое обоснование.

Художественно-конструкторская разработка.

К технико-экономическим показателям, разрабатываемых НИР, относятся:

Наименование.

Потребность в изделии.

Срок потребности.

Изготовление опытного образца.

Начало промышленного производства.

Источники финансирования.

Художественно-технические разработки удобно делать с применением программ САПР:

Макет изделия.

Имитация отделки внешнего вида.

Карта вариантов цвето-фактурного решения отделки изделия.

Макет упаковки.

С помощью применения программ САПР целесообразно вести конструкторское проектирование электронных систем во время учебного процесса.

*Материал поступил в редколлегию 29.09.20.*

Е.А. Новик, М.В. Ярославцев

(г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОЗОМ С ГИБРИДНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ**

### **MODELLING OF ENERGY CONSUMPTION OF A HYBRID DIESEL-ELECTRIC LOCOMOTIVE**

*Выполнено исследование возможности применения комбинированной энергетической установки на многосекционных грузовых тепловозах. Показаны техническая возможность и экономическая целесообразность замены дизель-генератора одной из секций магистрального тепловоза литий-железофосфатным аккумулятором.*

*The research deals with the possibility of application of hybrid electric drives with energy storage devices on multiple unit diesel locomotives. The technical ability and economic expediency of a lithium battery application instead of the diesel generator on a traction unit is shown.*

*Ключевые слова: тепловоз, накопитель энергии, расход энергии на тягу, гибридные энергетические установки.*

*Keywords: diesel locomotive, energy storage, traction energy consumption, hybrid electric powertrain.*

Неэлектрифицированные участки составляют почти 50% протяженности железных дорог России. Более трети парка грузовых магистральных локомотивов приходится на тепловозы. Несмотря на то, что тепловоз совершает в среднем в 1,5 раза меньшую транспортную работу по сравнению с электровозом, затраты на топливо в расчете на один тепловоз оказываются на 13% большими, чем стоимость электроэнергии, потребляемой одним электровозом. Очевидно высокое значение технических мероприятий, позволяющих сократить потребление топлива и повысить энергетическую эффективность тепловозов.

Важнейшим резервом экономии энергии на железнодорожном транспорте является повторное использование кинетической энергии поезда. Так, на электрифицированных линиях экономия за счет применения рекуперативного торможения составляет свыше 3% от расхода электроэнергии на тягу поездов. Уровень рекуперации зависит от большого числа факторов и уже сегодня приближается к 8% на ряде дорог, имеющих горный профиль и технические средства, позволяющие активное применение рекуперативного торможения.

Можно ожидать, что не меньший эффект в отношении расхода топлива будет достигнут при оборудовании тепловозов накопителями энергии. Более

того, наличие бортового накопителя энергии позволит также обеспечить постоянство нагрузки дизель-генераторной установки, что также сокращает расход топлива и уменьшает интенсивность износа деталей. Ещё одним немаловажным преимуществом перехода к использованию комбинированной энергоустановки является возможность повышения пиковой мощности локомотива. Это позволит сократить потери времени на торможение и набор скорости в случае остановок при скрещении и обгонах поездов.

В настоящее время, по мере развития накопителей энергии, на тепловозах стало возможным заменить реостатное торможение приемом энергии в бортовой накопитель. Предложено несколько проектов таких локомотивов. В США компанией-перевозчиком BNSF совместно с производителем локомотивов General Electric предложена аккумуляторная секция тепловоза с зарядом во время торможений на затяжных спусках [1]. В России построен маневрово-вывозной тепловоз ТЭМ9h с гибридным тяговым приводом, допускающим заряд накопителя от сети депо и от дизель-генератора [2].

Авторами выполнено исследование возможности применения комбинированной установки на многосекционных грузовых тепловозах. Особенностью отечественных магистральных тепловозов является постоянное соединение секций. Это делает возможным обмен энергией между генераторными и аккумуляторными секциями локомотива. Для этого потребуются заменить дизель-генератор второй секции аккумуляторной батареей и повысить мощность двигателя первой секции.

Для определения параметров гибридной энергоустановки необходимо знать мощность и энергию, потребляемые на движение поезда. Для расчета была использована среда моделирования Simulink. В ней составлена модель, основанная на уравнении движения поезда [3, 4]. Структура модели показана на рис. 1. На модели выполнен тяговый расчет для участка железной дороги протяженностью 280 км, имеющего уклоны до 22 тысячных.

С помощью полученной модели построены тяговые и тормозные характеристики тепловоза, на основании тягового расчета определены основные параметры комбинированной энергетической установки [5, 6]. В качестве базового локомотива для сравнения был выбран тепловоз наиболее распространенной серии 2ТЭ116, состоящий из двух секций мощностью по 3000 л. с. [7]. Как показали результаты моделирования, средняя потребляемая за время движения по перевальному участку мощность составляет около 2800 кВт, что объясняется недоиспользованием мощности двигателя при достижении установленной скорости во время движения на спусках.

В результате предложено повысить мощность двигателя одной из секций до 4000 л.с. (2900 кВт) и установить на второй секции накопитель энергии

энергоемкостью 2000 кВт-ч. Масса такого накопителя составит около 26 т, а объем 16 м<sup>3</sup>, что позволит разместить предложенный блок накопителей вместо дизель-генераторной установки.

Задание тяговых и тормозных характеристик

Выбор режима движения

Расчет потребляемой мощности и энергии

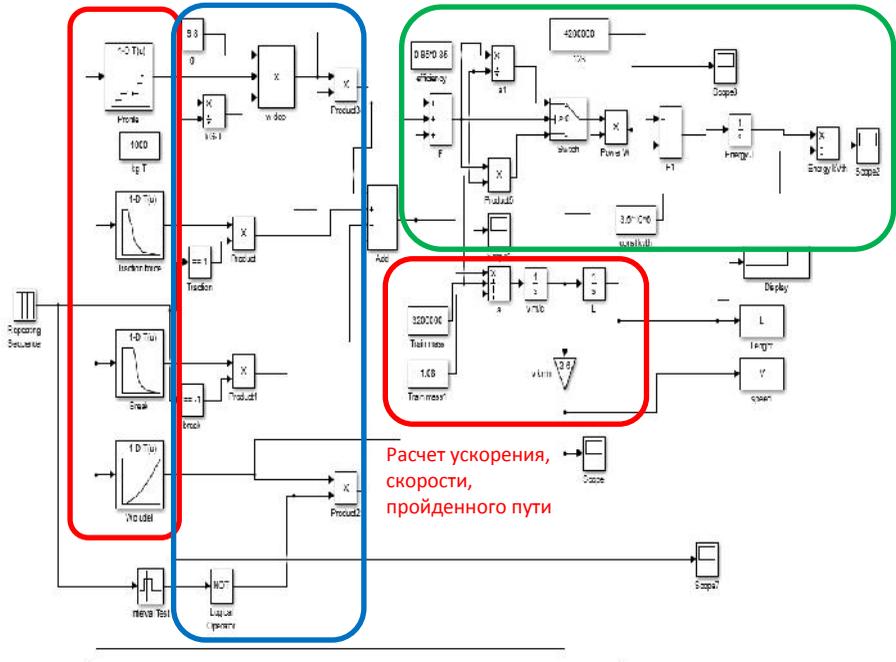


Рис. 1. Имитационная модель для расчета потребления энергии на тягу тепловозом с гибридной энергетической установкой.

Проведенная экономическая оценка показала, что при современной удельной стоимости аккумуляторных сборок около 160 долларов США/кВт-ч величина экономии стоимость накопителя энергии приблизительно равна стоимости производимых в настоящее время локомотивных дизель-генераторов. При этом в ходе эксплуатации будет достигнуто сокращение расхода энергии на тягу за счет приема энергии торможения, а также обеспечения более выгодного режима эксплуатации дизельного двигателя. В то же время, величина достигаемого эффекта существенно зависит от таких

условий эксплуатации, как частота скрещений и доля протяженности вредных спусков на плече эксплуатации локомотивов [8, 9].

В результате выполненного исследования построены тяговые и тормозные характеристики тепловоза, на основании тягового расчета определены основные параметры комбинированной энергетической установки, такие как мощность дизель-генератора, запас энергии и мощность накопительного устройства. В работе показаны техническая возможность и экономическая целесообразность замены дизель-генератора одной из секций магистрального тепловоза литий-железофосфатным аккумулятором.

### Список литературы

1. *Chris Noon Leading The Charge: Battery-Electric Locomotives Will Be Pushing US Freight Trains Further* [Электронный ресурс] // General Electric .– Режим доступа: <https://www.ge.com/news/reports/leading-charge-battery-electric-locomotives-pushing-us-freight-trains> .– October 24, 2018 General Electric. – дата обращения: 01.10.2020.– загл. с экрана.

2. Гибридный тепловоз ТЭМ9h [Электронный ресурс] // Снежинский завод специальных электрических машин.– URL: <https://www.snmomentum.ru/gibrid> ( дата обращения: 01.10.2020.)– загл. с экрана.

3. *Ярославцев, М. В.* Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы: автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Ярославцев Михаил Викторович; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2016. – 16 с.

4. *Yaroslavtsev M. V.* Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain / M. V. Yaroslavtsev, N. I. Schurov, E. A. Belova // *Applied Mechanics and Materials.*– 2014.– Vol. 698.– P. 7-11.

5. *Ярославцев, М. В.* Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // *Электротехника. Энергетика. Машиностроение* : сб. науч. тр. I Международной научной конференции молодых ученых.– Новосибирск, 2014.– С. 290-293.

6. *Щуров, Н. И.* Эффективное использование энергии буферного накопителя гибридного транспортного средства / Н.И. Щуров, М.В. Ярославцев // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении* : сб. тр. V Международной научно-практической конференции.– Томск, 2014.– С. 312-315.

7. *Филонов, С. П.* Тепловоз 2ТЭ116 / С. П. Филонов и др.– М.: Транспорт, 1996. – 334 с.

8. *Spiridonov, E. A.* Evaluation of energy recuperation efficiency for operating conditions of city electric transport / E. A. Spiridonov, M. V. Yaroslavtsev // *Proceedings of IFOST-2016 : 11th International Forum on Strategic Technology.*– Novosibirsk, 2016.– P. 61-64.

9. *Goldie-Scot, L.A* Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices [Электронный ресурс] // Bloomberg NEF .– Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/> .– дата обращения: 01.10.2020.– загл. с экрана.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

В.И. Потапов  
(г. Рязань, Филиал ОКБ «Спектр»)

## **ЗАПРЕЩЕННЫЕ ФИГУРЫ В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ**

### **FORBIDDEN SHAPES IN THE DESIGN OF THE STRUCTURES OF ELECTRONIC MODULES**

*Для проектирования плоских структур электронных модулей предлагается использовать графотеоретический метод, основанный на теории характеристического управления. Сложность алгоритмов синтеза подобных структур обусловлена необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой их изготовления и особенностями разрабатываемого конструктивно-технологического решения.*

*For the design of flat structures of electronic modules, it is proposed to use a graph-theoretical method based on the theory of characterization control. The complexity of algorithms for the synthesis of such structures is due to the need to take into account a large number of different requirements related to the specifics of their manufacture and the features of the developed design and technological solution.*

*Ключевые слова: граф, ребро графа, планарность, запрещенные фигуры, алгоритм, анализ, синтез, характеристическое управление.*

*Keywords: graph, graph edge, planarity, forbidden shapes, algorithm, analysis, synthesis, characterization control.*

Проектирование конструкции односторонних (ОПП) или двухсторонних печатных плат (ДПП) без перемычек является одной из самых сложных задач на этапе проектирования. Задача в такой постановке особенно актуальна для бортовых ЭС, выполненных по технологии поверхностного монтажа, где, например, по причине металлического теплоотвода или керамического основания, структура соединений которых возможна только в одном или двух слоях.

Для её решения предложено большое число различных алгоритмов, однако ни один из них не может практически реализовать тактику и стратегию человека-разработчика. Основным недостатком всех используемых алгоритмов является заложенный в них принцип последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства. Сложность алгоритмов синтеза подобных структур обусловлена также необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой их изготовления и особенностями разрабатываемого конструктивно-технологического решения.

Рассмотрим классический подход к разработке ОПП и ДПП, использующих электро-радиоэлементы (ЭРЭ) с жесткой логикой функционирования. Вначале разрабатывается принципиальная электрическая схема, а затем создается конструкция за счет решения задач размещения ЭРЭ и трассировки соединений на монтажном поле. Этот подход сложился исторически за счет того, что каждый вывод ЭРЭ несет свое функциональное значение.

На основе анализа, проведенного в [1] для решения данной задачи будем использовать графо - теоретический метод, который предполагает планаризацию графа для ОПП и расслоение графа на две стороны для ДПП и предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений, назначая конфликтное звено трассы на обратную сторону печатной платы.

Основной задачей создания топологии схемы соединений выводов ЭРЭ является необходимость расположения соединений на плоскости без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования.

Среди критериев планарности графа наиболее известен критерий Понтрягина-Куратовского.

Задача трассировки соединений выводов элементов в схеме заключается в синтезе графа схемы, не содержащего подграфов гомеоморфных  $K_5$  или  $K_{3,3}$ .

В [1] приведен алгоритм планаризации графа, основанный на теории характеристического управления и нахождении запрещенных фигур и перевода их из класса запрещенных в класс разрешенных.

Основным требованием, предъявляемым к системам автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных схем в виде печатных плат с различным количеством слоев, является обеспечение 100% эффективности трассировки соединений, под которой понимается отношение количества реализованных соединений на одном слое к общему количеству соединений.

В настоящей работе предлагается выполнить проектирование ПП с высокой эффективностью трассировки соединений за счет решения задачи расслоения исходного графа-схемы и построения плоского графа-схемы как на стороне установки ЭРЭ, так и на обратной стороне платы - стороне пайки, исключая запрещенные фигуры по теореме Потрягина-Куратовского. Задача расслоения представляет собой задачу раскраски графа в два цвета, решение который базируется на теореме Кенига, определяющей запрещенную фигуру в виде циклов нечетной длины.

Рассмотрим решение задачи расслоения ребер исходного графа-схемы на две стороны печатной платы в виде задачи раскраски графа-схемы в два цвета используя теорему Кенига. Граф является двухцветным тогда и только тогда, когда он не содержит циклов нечетной длины [1].

Алгоритм расслоения ребер на две стороны.

1. Поиск запрещенных фигур (циклов нечетной длины).
2. Построение семантической таблицы.
3. Нахождение минимального покрытия строк таблицы столбцами. Все строки таблицы покрыты хотя бы одним столбцом? Если да, то переход к п. 7. Иначе к п.4.
4. Нахождение компоненты запрещенной фигуры для приведения исходной модели к интерпретируемому виду.
5. Удаление компоненты из исходного графа на основании семантической таблицы минимального покрытия.
6. Переход к п.1.
7. Полученное минимальное покрытие является оптимальным решением, удаление этих компонент (сигнатур) переводит запрещенные фигуры в класс разрешенных, т.е. формирует двухцветный граф.
8. Конец алгоритма.

Основным критерием эффективности построения плоских структур является 100 % трассировка соединений между элементами структуры в одном или нескольких слоях. Оценивая результаты синтеза плоских структур электронных схем, построенных с применением разработанной модели и алгоритма, для проведения эксперимента по трассировке соединений использовался современный пакет прикладных программ DipTrace и Altium Designer (P-CAD) со специализированным программным приложением. Проведенный сравнительный анализ представленных результатов трассировки (возможность 100 % трассировки) применяемых САПР, полученных «До» (без участия планаризации) и «После» (планаризации) использования предлагаемого подхода планаризации исходных графов для проектирования плоских структур электронных схем, позволяет повысить эффективность трассировки соединений в среднем на 2-5%.

#### **Список литературы**

1. *Горбатов, В.А.* Фундаментальные основы дискретной математики / *В.А. Горбатов.* – М.: Наука. Физматлит, 2000. - 544 с.

*Материал поступил в редколлегию 16.10.20.*

А.С. Сальников, В.А. Боев  
(г. Томск, Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники)

## **РАЗРАБОТКА ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В QUCS**

### **DC BEHAVIORAL MODELING OF TRANSISTOR AND MODEL IMPLEMENTATION IN QUCS**

*Рассмотрен полный цикл разработки новой поведенческой модели, заканчивая реализацией модели в программе моделирования Qucs на языке Verilog-A. В задаче введены упрощения, что позволяет использовать результаты в учебном процессе.*

*The thesis is dedicated to full design flow of transistor behavioral model including Verilog-A implementation in Qucs. The task is simplified so it can be used for educational purpose.*

*Ключевые слова: поведенческая модель транзистора, Qucs, Verilog-A.*

*Keywords: transistor behavioral model, Qucs, Verilog-A.*

**Введение.** При обучении дисциплинам, связанным с электроникой, большое значение имеют инструменты моделирования электрических схем. Практика, однако, такова, что предпочтение приходится отдавать открыто распространяемым программам. Программа моделирования Qucs [1] с открытым исходным кодом позволяет моделировать цифровые, аналоговые и СВЧ-цепи, имеет необходимые модули отображения результатов расчета и может считаться хорошей альтернативой коммерческим САПР в учебном процессе.

Важной темой в полупроводниковой электронике являются модели транзисторов. Для глубокого понимания темы студент должен изучить теорию существующих моделей и экстракции ее параметров, а также на практике реализовать модель в специализированной программе и подобрать ее параметры для описания результатов измерения транзистора. Одной из целей данной работы являлось освоение этой процедуры на примере Qucs.

Современные модели транзисторов, применяемые для моделирования электрических цепей можно разделить на компактные эмпирические, компактные физические и поведенческие. В данной работе сосредоточимся только на поведенческих моделях, которые представляют собой аппроксимацию результатов измерений без глубокого изучения физики работы прибора. Таким модели являются универсальными, относительно простыми в построении и использовании, поэтому подходят под цели работы. Чаще всего для построения поведенческих моделей используют методы машинного обучения, например, искусственные нейронные сети [2], метод

опорных векторов [3] или байесовский вывод [4]. Особенно сложных в изучении нелинейных и электротермических эффектов в мощных транзисторах [5,6].

В данной работе исследуется весь цикл разработки модели, но с учетом применения в учебном процессе каждый этап цикла упрощается. Таким образом, целью представляемой научной работы является разработка простой поведенческой модели, описывающей ВАХ транзистора, и ее реализация в программе Qucs. В данной работе рассматриваются транзисторы на основе КМОП технологии.

**Поведенческая модель.** Есть большое разнообразие поведенческих моделей. С математической точки зрения, построение поведенческой модели — это аппроксимация измеренных параметров устройства. На сегодняшний день широкое распространение в качестве инструмента аппроксимации получили искусственные нейронные сети (ИНС). Однако в ходе исследований на простейших нейронных сетях не удалось получить удовлетворительных результатов, поэтому в дальнейших исследованиях данный подход будет исследоваться более подробно.

В данной работе для описания ВАХ была использована функция специального вида. Функция получена упрощением функции для описания тока, применяемой в модели Angelov, которая используется в том числе и для моделирования КМОП-транзисторов [7]. Используемая в работе функция имеет вид:

$$I_{СИ}(V_{СИ}, V_{ЗИ}) = w_0 [1 + \tanh(w_1(V_{ЗИ} - w_2))] \tanh(w_3 V_{СИ})$$

где  $w_i$  – коэффициенты аппроксимации.

Представленная формула представляет собой поведенческую модель ВАХ транзистора. Для использования модели необходимо подобрать коэффициенты аппроксимации под измерения конкретного транзистора.

**Интеграция модели в Qucs.** Чтобы использовать разработанную модель необходимо реализовать ее в программе Qucs. Для этого можно использовать несколько подходов, в данной работе был выбран файл на языке Verilog-A, поскольку он более функционален и широко используется в практике для разных САПР.

Для начала разработанная модель должна быть записана на языке описание электрических схем Verilog-A. Загрузка файла в программу Qucs выполняется следующим образом: 1) файл добавляется в текущий проект; 2) для файла готовится файл условного обозначения; 3) модель компилируется средствами Qucs; 4) скомпилированный файл загружается в Qucs через меню. Для корректной работы требуется полная установка компилятора, программ Qucs и ADMS в соответствии с инструкциями указанных программ.

**Эксперимент по построению модели.** Для получения исходных данных были смоделированы ВАХ 0,8 мкм КМОП-транзистора с общей шириной затвора 10 мкм на основе данных из [8].

Затем были изучено влияние разных коэффициентов аппроксимации на форму ВАХ. Показано преимущественное влияние  $w_0$  — на максимальной

значение тока,  $w_1$  и  $w_2$  — на крутизну (прирост тока между двумя ветвями для разных  $V_{зи}$ ),  $w_3$  — на наклон линейного участка. Таким образом, методика построения модели проводилась следующим образом: 1) действительные результаты и результаты построения модели нормировались; 2) подбором  $w_3$  достигался требуемый наклон ВАХ; 3) подбором  $w_1$  и  $w_2$  достигался требуемый вид ВАХ; 4) убиралась нормировка и подбирался параметр  $w_0$ . Далее применялись методы оптимизации для достижения большей точности. Для оценки точности модели использовалась формула:

$$E_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_{СИ(k)}^D - I_{СИ(k)}^M)^2}{\sum_{k=1}^N (I_{СИ(k)}^D)^2}} \quad (1)$$

где  $I_{СИ}^D$  - действительное значение тока,  $I_{СИ}^M$  - значение тока, рассчитанное по модели в каждой точке ВАХ, в  $N$  - число точек на ВАХ.

Целью оптимизации была минимизация выражения (1). Найденные значения были подставлены в код модели и интегрированы в Qucs. Сравнение исходных данных и построенной модели представлено на рис. 1. Ошибка моделирования, рассчитанная по (1) составила 0.0817.

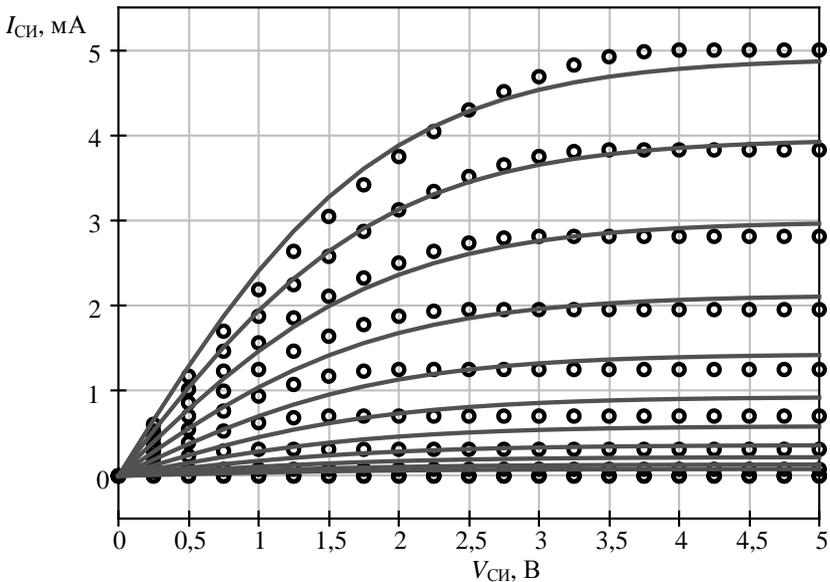


Рис. 1. ВАХ транзистора и построенной модели

Полученные данные показывают недостаточную точность построенной модели. Для повышения точности необходимо усложнять модель.

**Заключение.** В представленной работе пройден полный цикл разработки новой поведенческой модели транзистора от получения исходных данных до внедрения модели в программу моделирования Qucs. Данный цикл отличает простотой и может быть использован в учебном процессе для обучения навыку моделированию электронных устройств в современных САПР, поскольку общие принципы этой деятельности в Qucs совпадают с тем, как это реализовано в коммерческих САПР. В то же время модель показала недостаточную точность. В ходе дальнейших исследований будет проведено усложнение и уточнение поведенческой модели, в том числе с применением ИНС. Для реализации подобных моделей также потребует автоматизация подготовка исходного кода на языке Verilog-A.

### Список литературы

1. Официальный сайт проекта Qucs [Электронный ресурс] – URL: <http://qucs.sourceforge.net/> (дата обращения 09.10.2020).
2. An artificial neural network based nonlinear behavioral model for RF power transistors / J. Cai [et al.] // 2017 Asia Pacific Microwave Conference (APMC). – IEEE, 2017. – С. 600-603.
3. Support vector regression-based behavioral modeling technique for RF power transistors / J. Cai [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 28. – №. 5. – С. 428-430.
4. Cai J. A new nonlinear behavioral modeling technique for RF power transistors based on Bayesian inference / J. Cai, J. King, J. C. Pedro // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). – IEEE, 2017. – С. 624-626.
5. A new design flow based on behavioral modeling applied to wideband and highly efficient power amplifiers with GaN packaged transistors / W. Dementroux [et al.] // 41st European Microwave Conference. – IEEE, 2011. – С. 147-150.
6. Lakrim A. The DC behavioural electrothermal model of silicon carbide power MOSFETs under SPICE / A. Lakrim, D. Tahri // 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2015. – С. 2818-2823.
7. 4-terminal Angelov model for SOI CMOS MESFETs / S. J. Wilk [et al.] // 2015 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). – IEEE, 2015. – С. 359-362.
8. Allen P. E. CMOS Analog Circuit Design / P. E. Allen, D. R. Holberg. – Oxford University Press, 2012. – 783 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

А.В. Серебрянников, Л.С. Севриков, О.П. Павлов  
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **УЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ПРИ СИНТЕЗЕ РЕГУЛЯТОРОВ**

**ACCOUNTING THE CHANGE IN THE FREQUENCY CHARACTERISTICS  
OF THE UNCHANGEABLE PART OF THE SYSTEM IN DIFFERENT OPERATING  
MODES OF THE DEVICE DURING THE SYNTHESIS OF REGULATORS**

*На примере резонансного преобразователя напряжения LLC типа показано, что частотные характеристики неизменяемой части системы могут немного отличаться в различных режимах работы устройства. Даны советы, как этот факт можно учесть при синтезе регуляторов (корректирующих устройств).*

*The article discusses an example of a LLC resonant DC/DC converter. It is shown that the frequency characteristics of the unchanged part of the system may differ slightly in different operating modes of the device. Advice is given on how this fact can be taken into account when designing regulators (correcting devices).*

*Ключевые слова: изменение частотных характеристик, неизменяемая часть системы, режимы работы устройства, синтез регуляторов, корректирующие устройства, резонансный преобразователь постоянного напряжения LLC типа*

*Keywords: variations of frequency characteristics, unchangeable part of the system, device operation modes, synthesis of regulators, correcting devices, LLC resonant DC/DC converter*

Для более качественного синтеза регуляторов (корректирующих устройств) [1–5] необходимо учитывать, что частотные характеристики неизменяемой части системы могут немного отличаться в различных режимах работы устройства, например, при определённых значениях входного напряжения или сопротивления нагрузки, т.к. при изменении режима работы устройства происходит сдвиг рабочей точки системы по постоянному току. Если даже нагрузка системы является постоянной, то входное напряжение любого устройства имеет допустимый диапазон изменения, поэтому после синтеза регулятора как минимум нужно проверить, как будет вести себя замкнутая система при минимальном и максимальном значениях входного напряжения.

Если синтез регулятора выполнять только для установившегося номинального режима работы устройства, то вполне возможно, что даже при небольших отклонениях от этого номинального режима или при резких изменениях режима работы устройства параметры регулируемой величины (например, размах пульсаций, время установления переходных процессов)

могут выйти за рамки допустимых значений, регламентированных в техническом задании. В самом худшем случае система может даже потерять устойчивость.

В качестве примера на рис. 1 и 2 показано, как частотные характеристики резонансного LLC преобразователя постоянного напряжения с частотным управлением меняются при изменении тока (сопротивления) нагрузки, а также входного напряжения [6].

При входном напряжении 370 В (рис. 1, а) для всех рассматриваемых случаев нагрузки частота переключения транзисторов резонансного инвертора ниже собственной резонансной частоты колебательного контура. Как видно, ЛАЧХ в этом случае имеет чётко выраженный пик (экстремум) на резонансной частоте, что свидетельствует о наличии в системе колебательного звена.

При входном напряжении 400 В (рис. 1, б) частота переключений выше резонансной, при этом ЛАЧХ неизменяемой части не имеет пика на резонансной частоте и соответствует инерционному (апериодическому) звену второго порядка.

На рис. 2 показано изменение вида ЛАЧХ при различных значениях входного напряжения преобразователя. Хорошо видно, как при увеличении  $U_{вх}$  колебательный характер процессов в системе при частоте переключения транзисторов ниже или равной собственной резонансной частоте колебательного контура (сплошные линии) сменяется режимом выше резонанса с апериодическими процессами (пунктирные линии).

Как видно из рис. 1 и 2, при работе на резонансе или ниже динамика процессов мало зависит от нагрузки и входного напряжения. Это можно объяснить тем, что при резонансе колебательный контур близок к короткому замыканию, при котором процессы мало зависят от нагрузки. А при уменьшении входного напряжения система продолжает работать на резонансной частоте с «мёртвым временем» между полупериодами. Эти интервалы «мёртвого времени», когда синхронные ключи выпрямителя не проводят ток, вызывают большее изменение напряжения на резонансном конденсаторе, что в конечном итоге увеличивает коэффициент усиления по напряжению преобразователя. Можно предположить, что именно эти интервалы паузы придают системе малую зависимость от входного напряжения.

Работа выше резонанса приводит к значительно большему изменению ЛАЧХ в зависимости от нагрузки. Кроме того оказывается, что при переходе от режима резонанса к частоте переключения транзисторов выше резонансной частоты контура полюсы передаточной функции системы меняют свой вид от комплексно-сопряжённых значений к двум различным вещественным корням характеристического уравнения. Это может быть результатом того, что при работе ниже резонанса есть два различных состояния. На самом деле их четыре, просто два из них – зеркальное отражение двух других, причём в любой паре состояний только одно передаёт энергию в нагрузку. При работе выше резонанса имеют место два состояния из четырёх возможных, но в этом случае оба состояния передают энергию в нагрузку. В работе [6] автор предполагает, что именно это приводит к более сильному влиянию на ЛАЧХ нагрузки и входного напряжения при работе выше резонанса.

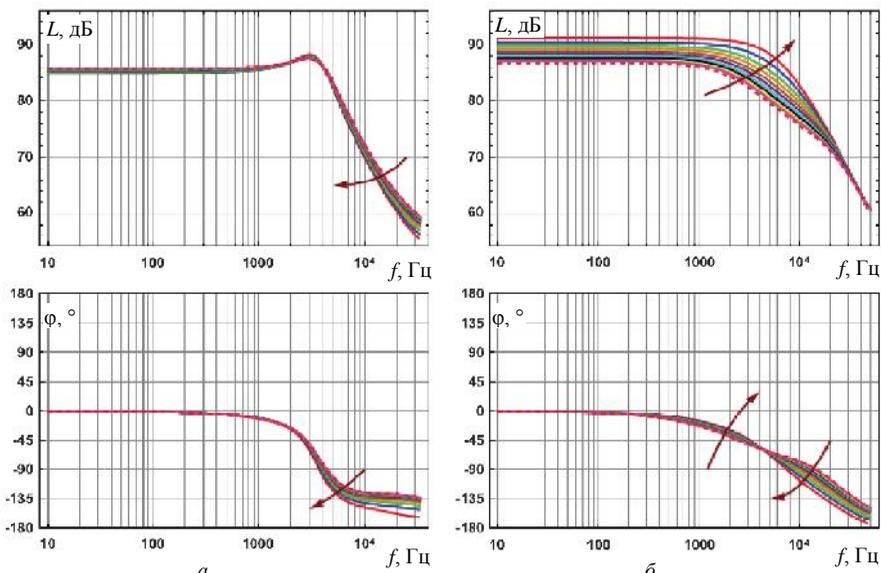


Рис. 1. Иллюстрация изменения частотных характеристик при различных токах нагрузки для  $U_{вх} = 370 \text{ В}$  (а) и  $U_{вх} = 400 \text{ В}$  (б); стрелка показывает направление увеличения тока (уменьшения сопротивления) нагрузки; сопротивление нагрузки менялось от 0,4 до 1,4 Ом с шагом 0,1 Ом (пунктирная линия соответствует значению сопротивления 1,4 Ом)

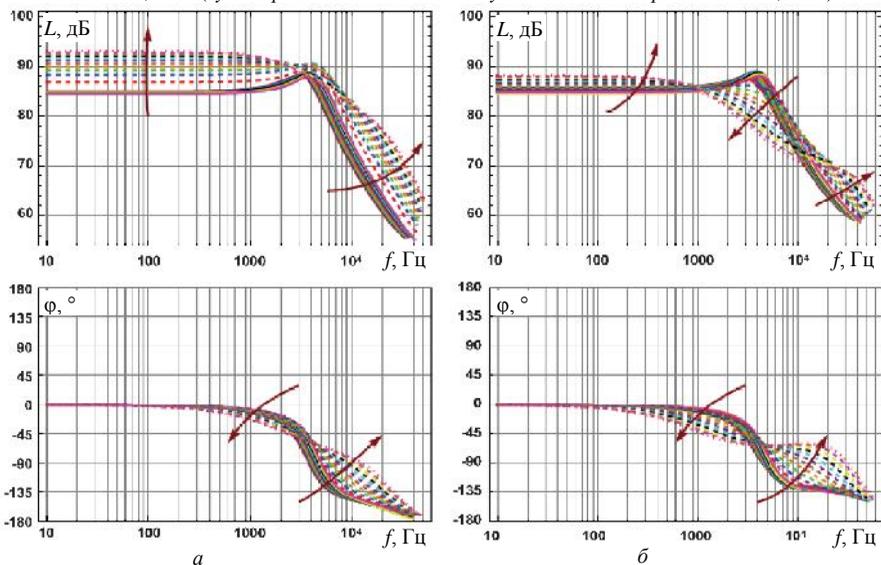


Рис. 2. Иллюстрация изменения частотных характеристик при различных входных напряжениях для  $R_n = 0,4 \text{ Ом}$  (а) и  $R_n = 1,4 \text{ Ом}$  (б); стрелка показывает направление увеличения  $U_{вх}$ , которое менялось от 370 до 400 В с шагом 2 В (сплошные линии соответствуют работе при резонансе или ниже, а пунктирные – выше резонанса)

Можно выделить следующие наиболее часто используемые способы синтеза регуляторов (в порядке увеличения трудоёмкости данного процесса):

- автоматический подбор коэффициентов регулятора для Simulink-модели устройства с помощью инструмента PID Tuner;
- ручная поочерёдная настройка коэффициентов регулятора для Simulink-модели устройства с помощью блока PID Controller;
- частотный способ с выбором желаемой ЛАЧХ и определением требуемой ЛАЧХ регулятора; частотные характеристики неизменяемой части могут быть предварительно получены аналитически, или сняты на реальном устройстве или на его полной Simulink-модели, или получены после замены реального устройства или его модели эквивалентным классическим динамическим звеном или их совокупностью.

Для того, чтобы приведённые выше методы синтеза регуляторов привели к положительному результату, необходимо проверить работу замкнутой системы (сначала модели, а потом реального устройства) в различных режимах работы устройства, например:  $(U_{вх.min}, R_{н.min})$ ,  $(U_{вх.min}, R_{н.max})$ ,  $(U_{вх.max}, R_{н.min})$ ,  $(U_{вх.max}, R_{н.max})$ . При необходимости следует подкорректировать коэффициенты регулятора так, чтобы замкнутая система оставалась устойчивой во всех рассматриваемых режимах работы устройства. Т.к. из всех режимов работы сложно выделить самый неблагоприятный, настройка регулятора только под один конкретный режим работы может не дать желаемого результата.

### Список литературы

1. Белов, Г.А. Частотный метод синтеза непрерывного корректирующего устройства для импульсного преобразователя/ Г.А. Белов, А.В. Серебрянников, А.А. Павлова // Вестник Чувашского университета. – 2008. – № 2. – С. 151-166.
2. Белов, Г.А. К синтезу одноконтурных систем управления понижающими импульсными преобразователями / Г.А. Белов, А.В. Серебрянников, А.А. Павлова // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 2 (50). – С. 26-33.
3. Белов, Г.А. Синтез одноконтурной системы управления понижающим импульсным преобразователем/ Г.А. Белов, А.В. Серебрянников, А.А. Павлова // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 3 (51). – С. 9-15.
4. Белов, Г.А. К синтезу одноконтурной системы управления двухтактным импульсным преобразователем / Г.А. Белов, А.В. Серебрянников // Силовая электроника. – 2013. – Т. 3. – № 42. – С. 47-52.
5. Белов, Г.А. Синтез одноконтурной системы управления двухтактным импульсным преобразователем / Г.А. Белов, А.В. Серебрянников // Силовая электроника. – 2013. – Т. 4. – № 43. – С. 86-91.
6. Brent McDonald. LLC Converter Small Signal Modeling [Электронный ресурс] // 2014 Texas Instruments Power Supply Design Seminar SEM2100, Topic 7, TI Literature Number: SLUP329. – Режим доступа: <https://www.ti.com/seclit/wp/slup329/slup329.pdf> (Дата обращения: 12.10.2020).

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

А. А. Скворцов

(г. Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.)

**КВАЗИАНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО ЛУНАРНОМУ ВОЛНОВОДУ****QUASI-ANALYTICAL ESTIMATION OF THE ULTIMATE POWER TRANSMITTED BY A LUNAR WAVEGUIDE**

Получено квазианалитическое выражение для расчета предельной мощности, передаваемой основной волной по лунарному волноводу с однородным диэлектрическим заполнением. Приводятся результаты квазианалитического расчета нормированной предельной передаваемой по пологому лунарному волноводу мощности при различных значениях его геометрических размеров и рабочей длины волны, которые могут быть полезны при проектировании СВЧ-устройств различного назначения, выполненных на основе рассматриваемой линии передачи.

A quasi-analytical expression for calculating the ultimate power transmitted by the dominant mode of a lunar waveguide with homogeneous dielectric filling is obtained. The results of a quasi-analytical calculation of a normalized ultimate power transmitted in hollow lunar waveguide at different values of its geometrical sizes and operating wavelengths, which can be useful in the design of microwave devices for various purposes, based on the considered transmission line, are presented.

**Ключевые слова:** квазианалитическая оценка, предельная мощность, основная волна, лунарный волновод, прямоугольный волновод.

**Keywords:** quasi-analytical estimate, ultimate power, dominant wave, lunar waveguide, rectangular waveguide.

В настоящее время повышение надежности функционирования, снижение массы и габаритов, расширение функциональных возможностей СВЧ-устройств различного назначения реализуется, как правило, применением в них в качестве базовых элементов волноводов сложных сечений. Одной из перспективных линий передачи (ЛП)

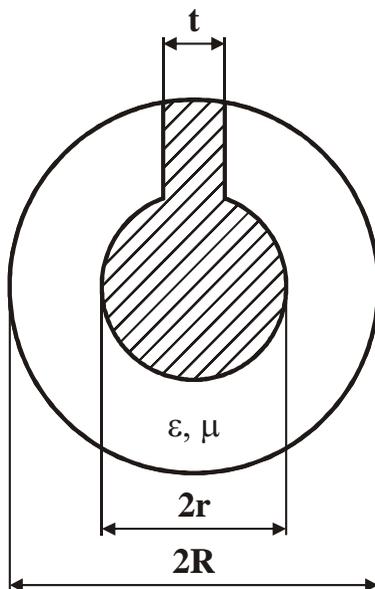


Рис. 1. Поперечное сечение ЛВ

сложных сечений является лунарный волновод (ЛВ), позволяющий существенно улучшить технические характеристики микроволновых систем, реализованных на его основе [1].

Важной электродинамической задачей, связанной с оценкой практической пригодности применения рассматриваемой ЛП для построения тех или иных СВЧ-устройств, является определение предельной мощности, передаваемой основной волной по ЛВ. Оценить предельную мощность, переносимую основной волной по анализируемой ЛП, на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики затруднительно из-за сложной формы поперечного сечения ЛВ, поэтому для решения волнового уравнения необходимо применять численные или квазианалитические методы, обладающие в отличие от более универсальных численных подходов [1, 2], связанных с использованием громоздкого математического аппарата, затрудняющего применение полученных результатов для практических целей, наглядностью, возможностью выявить общие закономерности распространения электромагнитных волн в ЛВ и сравнительной простотой вычислений [1–4].

Как показано в работах [2–4], ЛВ можно рассматривать как прямоугольный волновод (ПрВ), свернутый в поперечной плоскости по дуге окружности, у которого размер широкой стенки равен  $\pi(R+r)-t$ , а узкой –  $R-r$ . С учетом сказанного квазианалитическую оценку предельной мощности, передаваемой основной волной по анализируемой ЛП, можно получить, используя известную методику определения пропускной способности ПрВ [5], по формуле

$$P_{\text{пред}} = \frac{E_{\text{проб}}^2 [\pi(R^2 - r^2) - t(R-r)]}{4Z_c} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c1}}\right)^2}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{c1} = 2[\pi(R+r)-t]\sqrt{\epsilon\mu} \quad (2)$$

– критическая длина основной волны ЛВ с однородным диэлектрическим заполнением [2, 3];

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (3)$$

– характеристическое сопротивление диэлектрического материала, заполняющего ЛВ;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (4)$$

– характеристическое сопротивление воздушного заполнения ЛВ;  $E_{\text{проб}}$  – амплитуда напряженности электрического поля основной волны в ЛВ, при

которой наступает пробой;  $\epsilon$  и  $\mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего ЛВ.

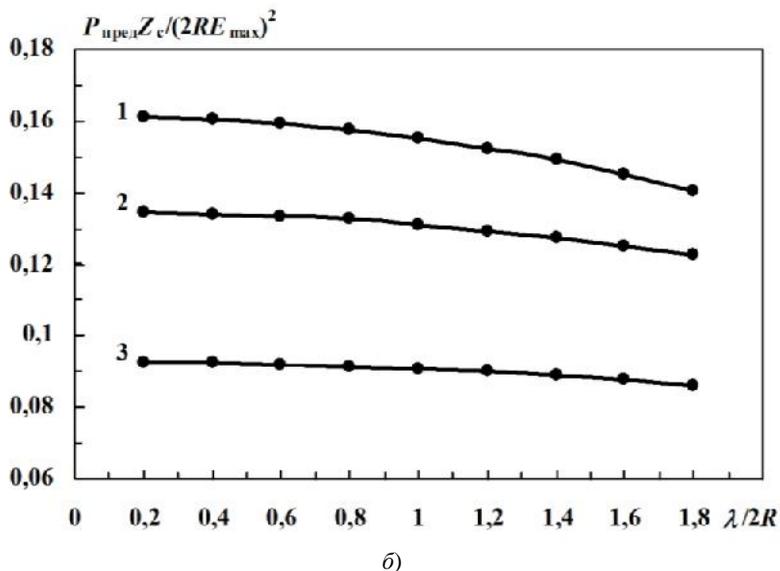
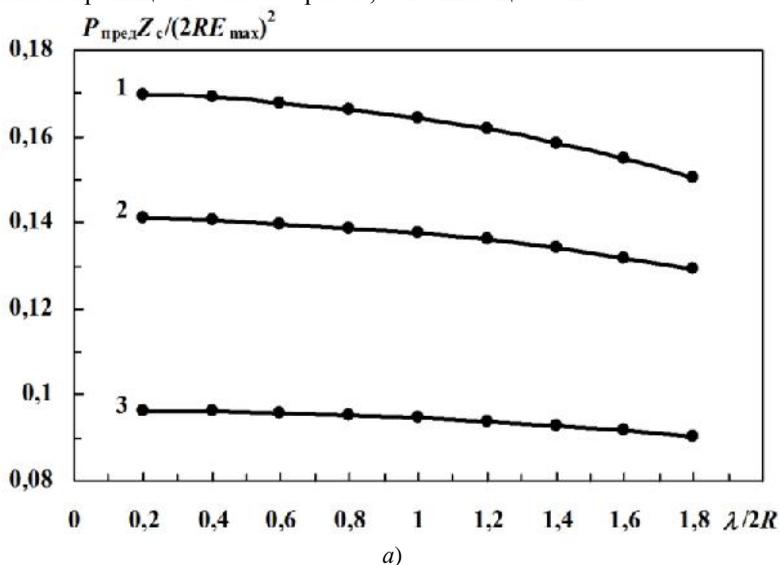


Рис. 2. Зависимость нормированной предельной мощности, передаваемой основной волной по ЛВ, от  $\lambda/2R$  при  $t/2R=0,1$  (а) и  $t/2R=0,2$  (б) и различных  $r/R$ : 1 –  $r/R=0,3$ ; 2 –  $r/R=0,5$ ;  $r/R=0,7$

Из приведенных выше соотношений следует, что предельная мощность, передаваемая основной волной по ЛВ, зависит как от размеров его поперечного сечения и электрофизических свойств диэлектрического заполнения, так и от рабочей длины волны.

По формулам (1)–(4) проведен квазианалитический расчет (КР) предельной мощности, переносимой основной волной по ЛВ, при различных значениях его геометрических размеров, электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны. Так, на рис. 2 в качестве примера, дающего наглядное представление о характере изменения пропускной способности анализируемой ЛП ( $\varepsilon = \mu = 1$ ), приведены результаты КР нормированной предельной передаваемой основной волной по ЛВ мощности, полученные по формуле (1) при различных значениях  $t/2R$ ,  $r/R$  и  $\lambda/2R$ . Как следует из рис. 2, при  $t/2R = \text{const}$  с уменьшением отношений  $r/R$  и  $\lambda/2R$  повышается пропускная способность ЛВ.

Таким образом, рассмотренные в настоящей работе выражения позволили установить в явном виде квазианалитическую зависимость предельной мощности, передаваемой основной волной по ЛВ, от его геометрических размеров, электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны и могут быть полезны при проектировании СВЧ-устройств, выполненных на основе рассматриваемой ЛП. Необходимо также отметить, что рассмотренные выше выражения могут быть в дальнейшем адаптированы для КР предельной мощности, передаваемой основной волной по ЛВ с частичным диэлектрическим заполнением.

### Список литературы

1. Коломейцев, В. А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч.1. / В. А. Коломейцев, В. В. Комаров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. – 160 с.
2. Вольман, В. И. Волноводы, обладающие широкой полосой одноволнового режима / В. И. Вольман, В. Б. Каток // Радиотехника и электроника. – 1978. – № 2. – С. 285–290.
3. Скворцов, А. А. К определению критических длин основной и первой высшей волн лунарного волновода / А. А. Скворцов // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы VI Междунар. научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2019. – С. 155–156.
4. Скворцов, А. А. Квазианалитические выражения для определения волнового сопротивления лунарного волновода с однородным диэлектрическим заполнением / А. А. Скворцов // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 3. – С. 86–89.
5. Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М.: Высш. Школа, 1970. – Т. 1. – 440 с.

*Материал поступил в редколлегию 07.10.20.*

О.А. Топчий

(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

**РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЭП**

**DEVELOPMENT OF A RECEIVING DEVICE PROTOTYPE FOR A SYSTEM  
FOR SEARCH THE FAULT LOCATIONS OF THE POWER LINES**

*Описана очередная доработанная версия устройства для системы дистанционного мониторинга электромагнитной активности в линиях электропередачи в момент повреждения. Проведены экспериментальные исследования и выполнено моделирование определения направления на источник сигнала с помощью приемного устройства.*

*The article describes a device for monitoring system of faults locations in overhead power lines. Experimental researches have been carried out and the modeling of direction finding to the signal source using a receiving device has been performed.*

*Ключевые слова: рамочная скрещивающаяся приемная антенна, дистанционный способ, моделирование определения направления на источник сигнала*

*Keywords: crossed loop antenna, remote method, modeling of direction finding to the signal source*

Большинство повреждений воздушных линий электропередачи (ЛЭП) проявляются через электромагнитные явления. Электромагнитные излучения возникают вследствие разрядов, замыканий, распространении волн перенапряжений и т.д. Фиксация и локализация таких электромагнитных явлений при повреждениях ЛЭП является важной задачей разработки дистанционного способа определения мест повреждений (ОМП) воздушных ЛЭП.

Цель данной работы – проведение исследований в плоскости практической разработки средств по наблюдению за электромагнитными процессами (разрядами, короткими замыканиями и т.п.) в электросетях, в плане их целостности и быстрого определения мест повреждений.

Важным элементом системы мониторинга ОМП является приемная антенна. Рассматривая, анализируя и сравнивая параметры различных видов приемных антенн, предпочтение было отдано сравнительно простой и в то же время обладающей хорошими характеристиками, подходящей для целей решения нашей задачи. Для проведения экспериментальных опытов была сконструирована сложная рамочная антенна, фиксирующая приходящий сигнал двумя каналами звуковой карты компьютера. Антенная система

представляет собой две неподвижные взаимно перпендикулярные рамки (рис.1).

Основными преимуществами антенны является то, что она занимает мало места, проста в изготовлении, менее восприимчива (в сравнении с аналогичными антеннами) к внешним помехам [1].



Рис.1. Фото экспериментальной рамочной антенны

Поскольку полотна антенны находятся друг относительно друга под углом  $90^\circ$ , есть возможность по сигналам двух каналов определять направление на место повреждения контролируемой линии (рис.2, 3).

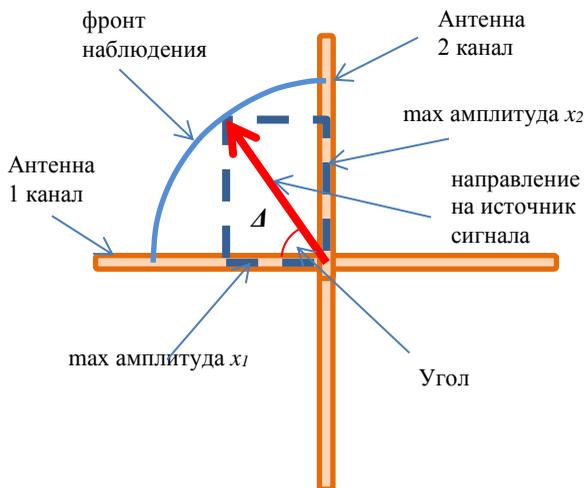


Рис.2. Антенна (вид сверху)

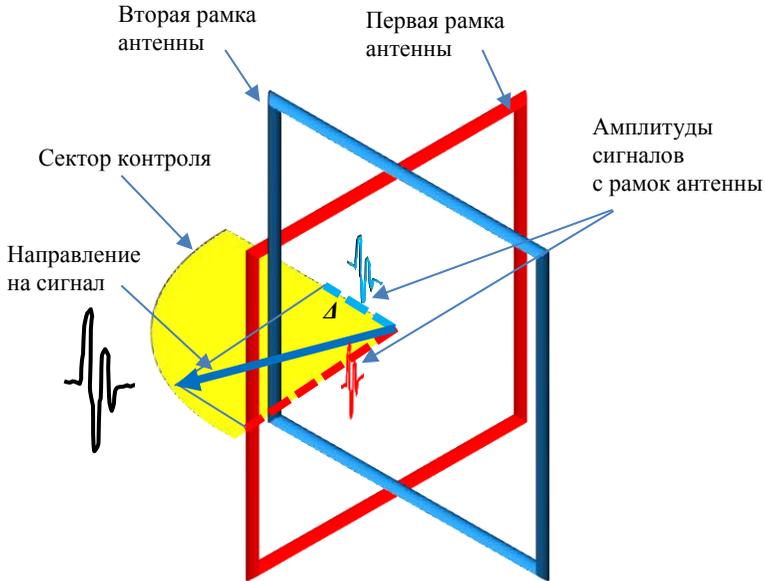


Рис.3. Схематичное изображение антенны и расчета угла направления прихода сигнала

Устройство было собрано, настроено и опробовано в работе в связке «антенна – звуковая карта ПК», под управлением программы, написанной в среде проектирования виртуальных приборов *LabVIEW* [2].

В программном комплексе *LabVIEW* составлена программа (рис. 4), анализирующая записанные сигналы и отображающая результаты анализа в виде спектрограммы.

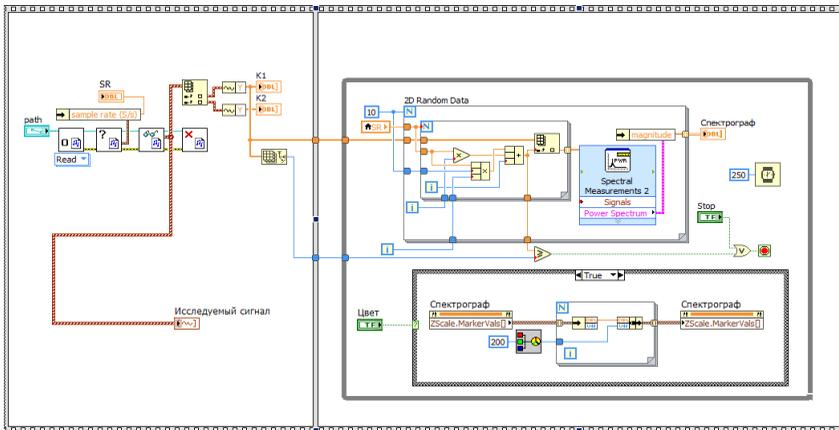


Рис. 4. Блок-схема рабочей программы в *LabVIEW*

На рис. 5 представлен рабочий вид программы с результатами обработки записанных сигналов.

Спектрограф – анализатор позволяет выбирать записанный файл и выполняет разложение в ряды Фурье, по которым строится спектрограмма. Рядом (для наглядности) на осциллографе отображается файл исследуемого сигнала, который (на экране осциллографа) тоже можно анализировать (рис.5).

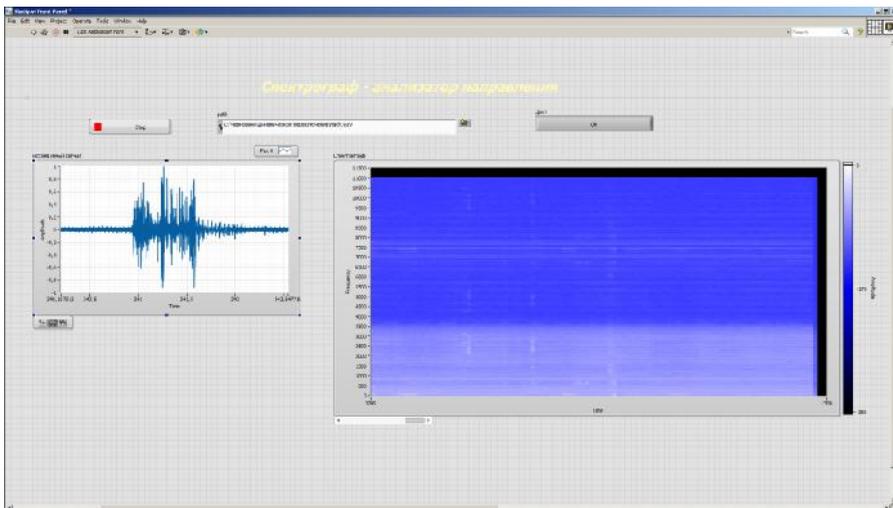


Рис.5. Рабочий вид программы LabVIEW с результатами обработки записанных сигналов

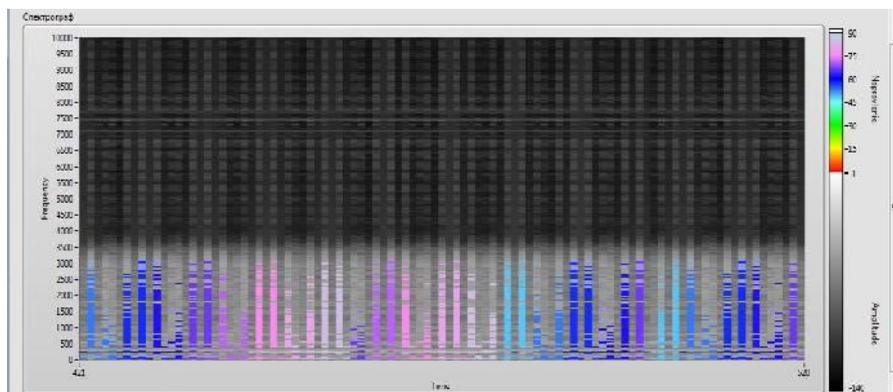
Программа автоматически останавливается по достижении окончания записи, а также предусмотрена возможность останова процесса программы в любом месте.

Разработанная программа анализирует сигналы с обоих каналов звуковой карты. Возможна работа в двух режимах: в режиме спектрографа и в режиме определения направления на проходящий сигнал. В режиме спектрографа программа на экране отображает движущуюся спектрограмму анализируемого сигнала. В режиме определения направления на проходящий сигнал, программа определяет (в градусах) направление на сигнал. Уровень амплитуды сигнала, с которой начинается проведение расчета, определяется (задается) в программе и окрашивает точку сигнала на ленте спектрограммы определенным цветом. Например, для сигналов с амплитудами ниже - 40 dB определяются только уровни сигналов (в черно-белых цветах), а для сигналов с амплитудами выше - 40 dB проводится расчет направления прихода сигнала и эти сигналы окрашиваются в соответствующий цвет.

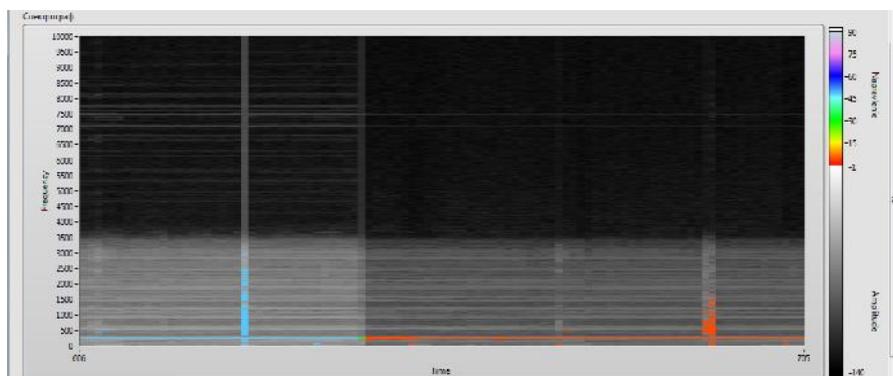
Рядом с экраном спектрографа находится лента цветов спектрографа. Нижняя часть (от -140 dB до -1 dB) определяет цвета амплитуды спектрограммы, верхняя часть (от 0° до 90°) отображает сектор прихода

отслеживаемых сигналов в палитре цветов. В режиме определения направления, сигналы, амплитуды которых выше заданного заранее уровня, окрашиваются на ленте спектрограммы цветом, который соответствует градусу на цветной части палитры. Направление (градус сектора) рассчитывается по соотношению амплитуд сигналов обоих каналов (рис.3).

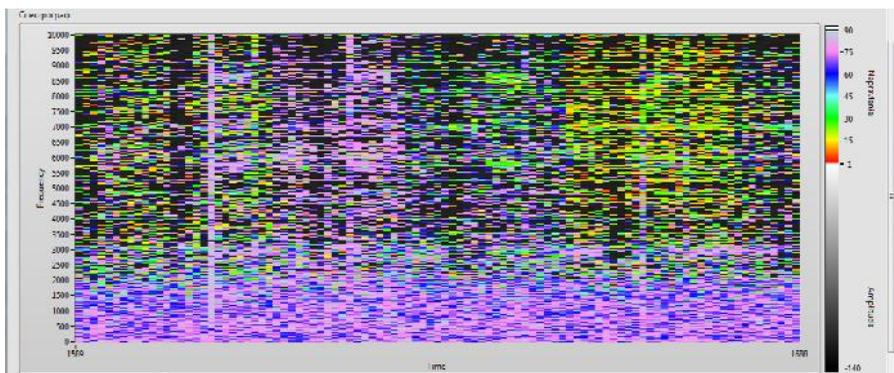
На рис.6 приведены спектрограммы, полученные с помощью разработанной программы в *LabVIEW*.



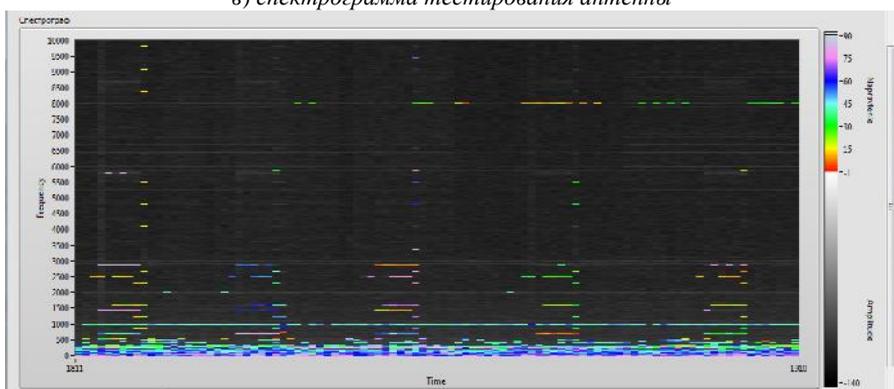
*а) спектрограмма тестового сигнала*



*б) спектрограмма записи грозовых разрядов*



в) спектрограмма тестирования антенны



г) спектрограмма разрядов при включении блока питания

Рис. 6. Спектрограммы определения направления на разные виды контролируемых сигналов

В ходе проведенных исследований был изготовлен экспериментальный опытный образец антенны и разработано для нее программное обеспечение в *LabVIEW* для записи электромагнитных сигналов, построения спектрограмм наблюдаемых сигналов и моделирования определения направления на источник сигнала.

Практическая ценность данного устройства заключается в том, что его легко изготовить, не требуются дорогостоящие детали, оно сразу работоспособно, не требует длительной настройки и надежно в работе.

Сейчас продолжается работа над тем, чтобы программа определяла направление прихода наблюдаемого сигнала с двух и более приемных антенн.

#### Список литературы

1. Ротхаммель, К. Антенны. / К. Ротхаммель. – М.: «Энергия», 1979. – 320 с.
2. Федосов, В. П. Цифровая обработка сигналов в *LabVIEW*: учеб. пособие / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко/ под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.

Р.Р. Хантимиров

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА  
В МЕЖСОЕДИНЕНИЯХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**METHOD FOR ANALYZING SIGNAL INTEGRITY IN INTERCONNECTS  
OF PRINTED CIRCUIT BOARDS OF ELECTRONIC DEVICES**

*Рассматривается проблема нарушения целостности сигнала, вызванные электромагнитными помехами. Описана методика анализа целостности сигнала в межсоединениях печатных плат электронных средств, а также приведен пример с помощью IBIS-моделей и программного обеспечения HyperLyns SI.*

*This paper deals with the problem of signal integrity violations caused by electromagnetic interference. This paper describes a method for analyzing signal integrity in interconnects of printed circuit boards of electronic devices, and also provides an example using IBIS models and HyperLyns SI software.*

*Ключевые слова: целостность сигнала, отражающие сигналы, перекрестные помехи, задержки сигнала, IBIS-модели.*

*Keywords: signal integrity, reflective signals, crosstalk, signal delays, IBIS models.*

Основная задача анализа целостности сигнала в межсоединениях печатной платы заключается в выявлении на этапе проектирования электромагнитных помех, для дальнейшего их устранения.

Целостный сигнал — это сигнал с четкими и быстрыми переходами, стабильными и четкими логическими уровнями, точными соотношениями во времени. Электромагнитные помехи являются главным фактором, влияющим на целостность сигнала.

Существует три основных помехи:

- 1) Задержка сигнала - это время, за которое сигнал доходит от передатчика до приемника. Причиной это задержки являются физические свойства трасс.
- 2) Отражающие сигналы. Они возникают, если сигнал, который распространяется по линии передачи, встретит изменение волнового сопротивления, из-за чего некоторая часть сигнала отразится, а форма прошедшей части сигнала будет искажена.
- 3) Перекрестные помехи - это любые явления, в которых сигнал, переданный по одной линии канала связи, создаёт нежелательный эффект в другой линии.

Для анализа целостности сигнала широко используют IBIS модели. IBIS (Input/Output Buffer Information Specification) — спецификация, описывающая входные и выходные буферы интегральных схем, стандартизованная EIA и ANSI (656-A).

IBIS-модель содержит информацию, относящуюся к цифровым буферам кристалла микросхемы. Анализ целостности сигнала делится на два этапа: предтопологический и посттопологический анализ.

Предтопологический анализ включает в себя предварительное исследование системы на наличие в ней проблем с целостностью сигналов.

Посттопологический анализ включает в себя максимально полное исследование системы на наличие проблем целостности сигналов с учетом реальной трассировки.

Методика анализа целостности сигнала делится на этапы.

- 1) Эквивалентное построение схемы межсоединений.
- 2) Выбор IBIS-модели для каждого элемента.
- 3) Корректировка настроек для получения читаемых осциллограмм.
- 4) Анализ полученных осциллограмм на выявление электромагнитных помех.
- 5) Исправление выявленной ошибки.

Для данной работы приведен пример предтопологического анализа целостности с использованием DDR MT46V16V8 и контроллера FF896

1. Была спроектирована схема для дальнейшего предтопологического анализа целостности сигнала (рис. 1).

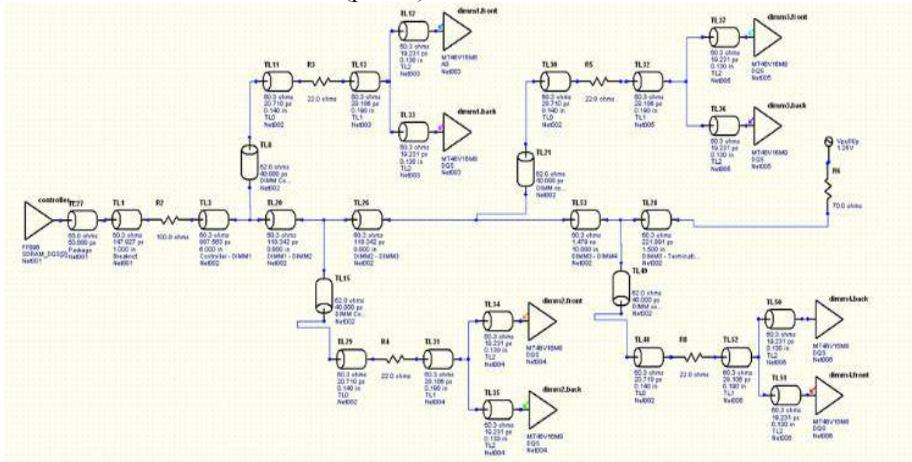
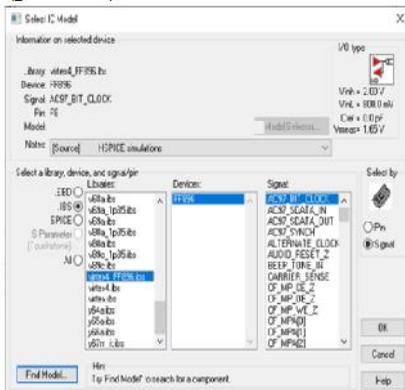
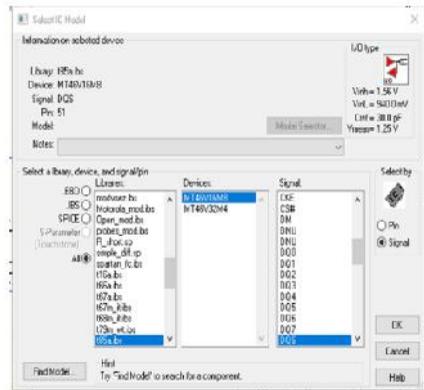


Рис. 1. Схема с MT46V16V8.

2. Чтобы приступить к анализу целостности сигнала необходима для каждого элемента выбрать подходящую IBIS-модель. Для контроллера FF896 выбираем модель `virtex_FF896.ibs` (рис. 2а) для элемента MT46V16V8 выбираем модель `t85a.ibs` (рис.2 б).



а)



б)

Рис. 2. Выбор IBIS – модели для: а – FF896; б – МТ46V16V8

3. После того как на все элементы были выбраны IBIS – модели необходимо изменить некоторые параметры для более удобного анализа. Затем запускаем симулятор (рис. 3).

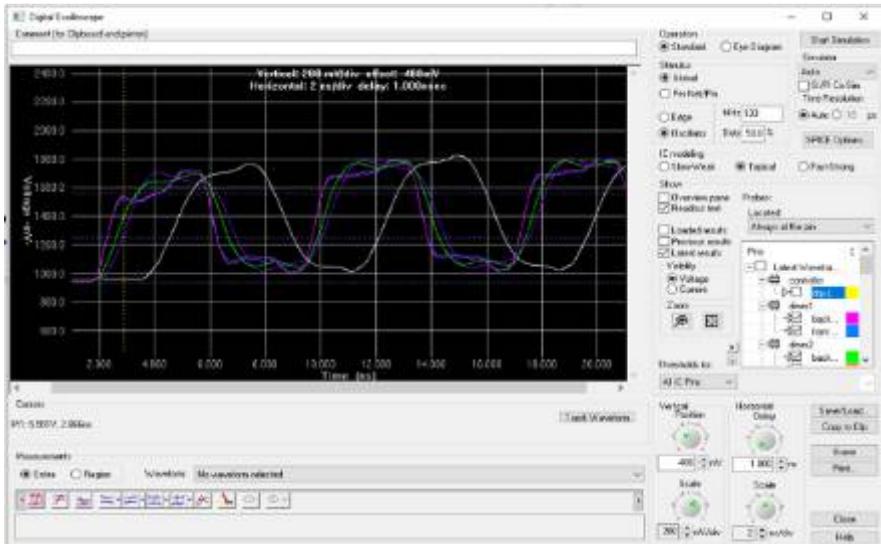


Рис. 3. Digital Oscilloscope

4. Из рис.3. видно, что фронт волны dimm4.back и dimm4.front опаздывает на почти 2 нс. Чтобы это исправить необходимо взглянуть на схему. Можно обратить внимание на трансмиссионную линию TL53, значение Delay (задержка) = 1.5 нс.

5. Для того чтобы уменьшить задержку уменьшим значение Length до 0.8. После чего задержка стала 118.3 пкс.

После изменений параметров трансмиссионной линии TL53, проведем повторную симуляцию и увидим, как поменялись волны (рис. 4).

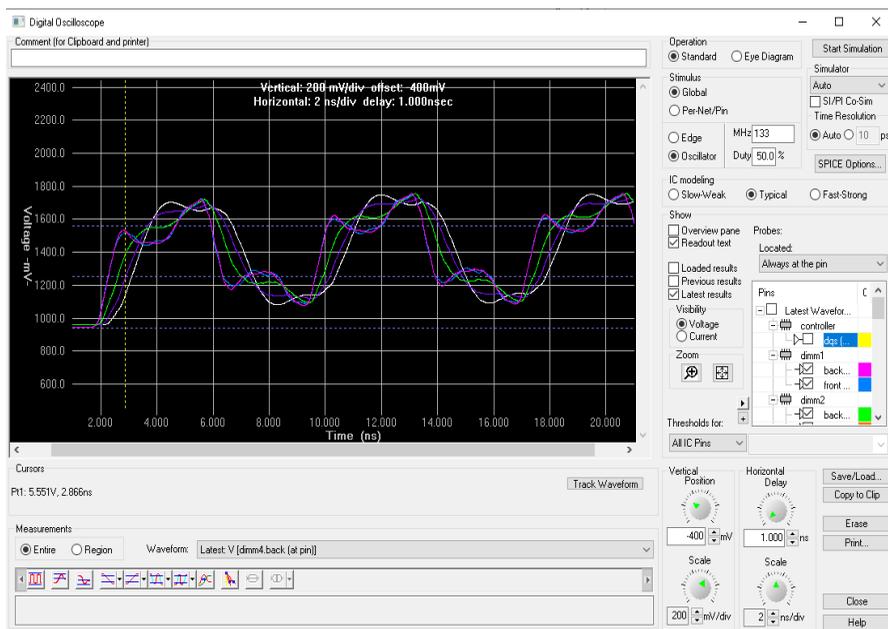


Рис. 4. Повторная симуляция

Повторив симуляцию, после изменений некоторых параметров видим, что фронт волны волн dimm4.back и dimm4.front нормализовался.

**Выводы.** В данной работе было проведено исследование анализа целостности сигнала в межсоединениях печатной платы, использование IBIS – моделей для анализа сигнала. Был проведен предтопологический анализ с использованием DDR MT46V16V8 и контроллера FF896, в ходе чего была выявлена задержка сигнала, которая нарушала целостность сигнала.

### Список литературы

1. Кечиев, Л. Н. IBIS-модели и их применение в задачах ЭМС/ Л. Н. Кечиев., Н. В. Лемешко. – М.: Изд-во Грифон, 2016 – 18 с.
2. Кечиев, Л.Н. Анализ целостности сигналов в САПР печатных плат/ Л.Н. Кечиев, А.И. Феоктистов, Н.С. Фомичева. – М.: МИЭМ, 2006 – 54с.

Материал поступил в редколлегию 20.10.20.

Д.Э. Цыганков<sup>1</sup>, Г.Р. Шайхеева<sup>1</sup>, И.В. Горбачев<sup>2</sup>  
(г. Ульяновск, <sup>1</sup> АО «Ульяновский механический завод»,  
<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

COAXIAL MICROWAVE DEVICES CONSTRUCTIVE & FUNCTIONAL  
DESIGN AUTOMATION

*Рассматривается подход к автоматизации конфигурирования и модификации проектных решений в САПР на основе модульного принципа, позволяющий перейти к терминам предметной области при создании 3D-модели и обеспечить удобство ее повторного использования.*

*The article is deals an approach to design solution configuration and modification in a CAD-system. The approach based on a modular principle and allows operating on the terms of the designed product subject area in the process of its 3D-model creation and increases the convenience of its design data reuse.*

*Ключевые слова: САПР, конструкция, 3D-модель, модификация, проектирование, конструктивно-функциональное представление, автоматизация.*

*Keywords: CAD-system, construction, 3D-model, modification, design, constructive & functional representation, automation.*

На сегодняшний день, в условиях все более возрастающей роли информационных технологий в производственном процессе, САПР стали неотъемлемым инструментом в задачах эскизного и технического проектирования на этапе опытно-конструкторских работ. Следствием чего является возможность накопления и систематизации проектных решений в удобном для повторного использования виде [1]. Актуальность повторного использования проектных решений не вызывает сомнений: разработка нового изделия на уровне функционального узла зачастую основана на каком-либо уже полученном ранее результате, внедренном и проработанном в производстве. Т.е. разработка как процесс может представлять собой **модификацию** наиболее близкого проектного решения в САПР. Это наиболее удобно (в плане визуализации и проработки) при представлении проектных решений в виде электронных 3D-моделей [2], хоть и сопровождается рядом сложностей, из которых основные – временные и трудовые затраты, требуемые для модификации [3].

Класс коаксиальных СВЧ устройств, включающий в свой состав множество изделий, таких как переходы (волноводные/полосковые), соединители, разъемы, нагрузки и т.д., отличающихся как конструктивом, так и назначением, описывается относительно узкой предметной областью, а

также ограниченным набором нормативной документации [4], что проявляется в широком творческом просторе для конструирования.

Принимаемые в процессе конструирования локальные проектные решения имеют свои плюсы и минусы, как с точки зрения конструкции (надежности, обеспечения электрических параметров), так и с точки зрения технологичности; их комбинация приводит к требуемому и желаемому результату.

На рис. 1 представлена вариативность гайки накладки – детали из состава соединителя коаксиального (вилки) типа III по ГОСТ 20265-83: имея идентичный функционал, данные компоненты отличаются конструктивом и, следовательно, технологическим процессом их изготовления.

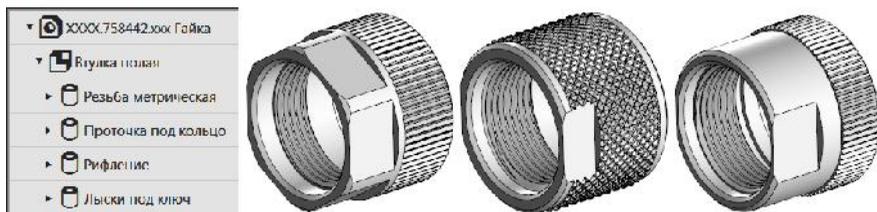


Рис. 1. Вариативность конструкции гайки из состава вилки коаксиальной

Конфигурирование детали на уровне конструктивных элементов соответствует модульному принципу [5], важнейшим преимуществом которого является типизация и унификация проектных решений на уровне типовых элементов, следствием чего является минимизация временных затрат на формирование проектного решения в виде 3D-модели. При этом стоит отметить, что одна и та же требуемая (номинальная) функциональность может быть достигнута множеством различных модификаций.

Подобные локальные конфигурации деталей-компонент в общем случае задают вариативность параметров (а также способ собираемости) изделий на уровне подузлов и узлов, которая, в свою очередь, определяет диапазон требуемых функциональных параметров.

На рис. 2 представлена сборка фиксирующей части разъема из состава вышеупомянутой вилки, состоящая из 4 деталей-компонент. Такая сборочная 3D-модель содержит ~10 сопряжений между компонентами.

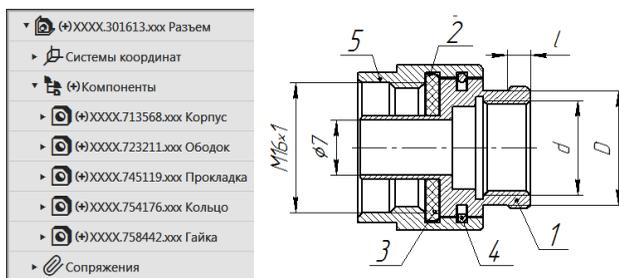


Рис. 2. Пример подсборки из состава вилки коаксиальной

Вариативность данной подборки, вызванная различиями в конструкторских параметрах на уровне деталей-компонент, представлена на рис. 3. Как видно, сборки отличаются параметрами деталей «Корпус» и «Гайка».



*Рис. 3. Вариативность конструкции подборки из состава вилки коаксиальной*

Один из важнейших аспектов конструктивно-функционального проектирования заключается в сопряжении компонент не к геометрическим, а к **структурным** элементам друг друга, что позволяет сохранять корректность конструкции и нивелирует потребность в переопределении всех сопряжений. Представленные на рис. 3 модификации могут быть получены путем изменения параметров деталей-компонент без перестраивания 3D-сборки.

Различаясь структурой и составом компонент, данные изделия относятся к единой предметной области и образуют **класс**, определяющий их конструктивно-функциональную специфику. Возможность конфигурирования изделий в строгих рамках единого класса повысит эффективность автоматизации в задачах повторного использования проектных решений, а также позволит воспроизводить заложенный в исходное решение конструкторский замысел.

Технология конструктивно-функционального проектирования, впервые представленная в работе [6] направлена на разработку изделий, образующих единый класс. Данный подход основан на модульном принципе, дополненным критерием конструктивно-функциональной целостности. Конструктивно-функциональное представление проектного решения в САПР заключается в его отображении в виде системы типовых элементов в дереве построения 3D-модели (см. рис. 1). На уровне каждого такого элемента задаются наборы параметров, описывающие его возможные исполнения, а также ассоциативные связи, обеспечивающие привязки к другим элементам при формировании 3D-модели изделия (см. рис. 3). Задаваемая на уровне такого элемента система предусловий обеспечивает формирование только конструктивно корректного проектного решения [7], т.е. анализируется, прежде всего, не геометрия или структура изделия, а его смысловое содержание (при обязательной корректности и геометрии и структуры).

Сформированное проектное решение в виде 3D-модели впоследствии предоставляет возможность автоматической генерации 2D-фрагментов, представляющих собой компиляцию информационных образов типовых

конструктивно-функциональных элементов с отображением значений исполнительных размеров, которые после ручной доработки в итоге представляют собой полноценный рабочий чертеж (конструкторский документ). То же самое касается и сборочных 3D-моделей: отдельные размеры могут быть указаны как исполнительные/справочные и отображаться на сборочном чертеже.

Автоматизация конструктивно-функционального проектирования коаксиальных СВЧ устройств на этапе конструирования реализуется разработанным комплексом программных средств [8]; дальнейшее развитие предлагаемого подхода связано с интеграцией с САЕ-системой и возможностью конфигурирования конструкции разрабатываемого изделия по итогам проведенного электромагнитного расчета для получения требуемых параметров.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области в рамках научного проекта №18-47-730028.*

#### Список литературы

1. Ларссон, Я. Важность повторного использования проектных решений / Я. Ларссон (J. Larsson) // САПР и графика. – 2014. – № 2 (208). – С. 70-73. – URL: <https://sapr.ru/article/24386> (дата обращения: 03.09.2020).

2. Райкова, Л.С. 3D-визуализация как современная технология повышения качества проектных решений / Л.С. Райкова, С.С. Анисимов, Д.А. Петренко // САПР и ГИС автомобильных дорог – 2014. – № 1(2). – С. 20-24

3. Цыганков, Д.Э. Автоматизация модификации механических узлов в САД-системе / Д.Э. Цыганков, Г.Р. Шайхеева // Автоматизированное проектирование в машиностроении: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – № 7. – С. 93-97.

4. ГОСТ 20263-83. Соединители радиочастотные коаксиальные. Присоединительные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 12 с.

5. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

6. Цыганков, Д.Э. Методы и средства конструктивно-функционального проектирования механических узлов радиотехнических изделий на основе процессной модели проектной деятельности: специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук/ Цыганков Денис Эдуардович; Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2018. – 248 с.

7. Похилько, А.Ф. Формирование функционально адаптируемого представления класса технических объектов / А.Ф. Похилько, И.В. Горбачев, Д.Э. Цыганков // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – Ч.2. – С.123-124.

8. Свидетельство № 2019666872. Модуль проектирования соединителей радиочастотных коаксиальных типа III «Экспертиза» по ГОСТ 20265-83: свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ / Д.Э. Цыганков, М.Г. Царев, Г.Р. Шайхеева; заявитель и правообл. Ульян. гос. техн. ун-т. – № 2019665973; заявл. 06.12.2019; зарегистр. 16.12.2019; опубл. 16.12.2019, Бюл. № 12. – 1 с.

*Материал поступил в редколлегию 06.10.20.*

Д.А. Черемухин

(г. Владивосток, Дальневосточный Федеральный университет)

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНТЕННЫ В ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ**

**APPLICATION OF THE OVERDIRECTIONAL MAGNETIC ANTENNA  
IN UNDERWATER COMMUNICATIONS**

*Рассматривается перспективность применения всенаправленных магнитоиндукционных антенн для построения подводных каналов связи, а также принцип работы и построение разных видов данных устройств.*

*This article discusses the prospects of using omnidirectional magnetic induction antennas for the construction of underwater communication channels, as well as the principle of operation and construction of various types of these devices.*

*Ключевые слова: резонанс, пространство, метаматериал, излучение, диполь, ортогонально, магнитная индукция (МИ), скорость передачи, информация, подводная связь, канал связи, диаграмма направленности, магнитное поле.*

*Keywords: resonance, space, metamaterial, radiation, dipole, orthogonal, magnetic induction (MI), transmission rate, information, underwater communication, communication channel, directional pattern, magnetic field.*

На прошлой конференции была опубликована статья под названием «Осуществление подводной связи через магнитную индукцию» в которой были отражены расчеты различных потерь при прохождении сигнала под водой, и их графические зависимости от параметров сигнала. В последствии было решено реализовать передающее устройство именно со всенаправленной антенной, преимущества которых заключаются в получении всесторонней диаграммы направленности. Также, они малочувствительны к электрическим помехам (например, к шумам от промышленного производства).

Магнитная индукция (МИ) является перспективным методом передачи информации в системах связи ближнего поля- беспроводном физическом уровне ближнего радиуса действия, который обменивается данными, транслируя магнитное поле между устройствами.

Используя МИ, открываются различные возможности, а конкретно: передача данных в режиме реального времени между несколькими подводными датчиками; голосовая и текстовая связь между дайверами на мелкой воде; контроль подводного оборудования с надводных судов; разработка локальных сетей из МИ датчиков для применения в областях от нефтяной промышленности до аквакультуры, проведение мониторинга загрязнения, учета климата, прогнозирования стихийных бедствий, что благоприятно отразится на прибыли разного спектра компаний. Также

возможна телеметрия и дистанционное управление с подводного или наземного оборудования, так как граница вода-воздух пересечена магнитной составляющей электромагнитного сигнала с относительно низким затуханием (поскольку коэффициент ослабления магнитных полей не отличается от коэффициента ослабления в воздухе из-за одинаковой магнитной проницаемости обеих сред).

Магнитные антенны (рис. 1), которые реагируют на магнитную составляющую радиоволн, состоят из: ферромагнитного сердечника, обладающего высокой магнитной проницаемостью и катушки индуктивности.



Рис. 1. Магнитная антенна

Магнитное поле радиоволны пронизывает плоскость такой антенны и индуцирует в ней электрические колебания радиочастоты, которые в приемнике могут быть усилены, продетектированы, а затем преобразованы в звук.

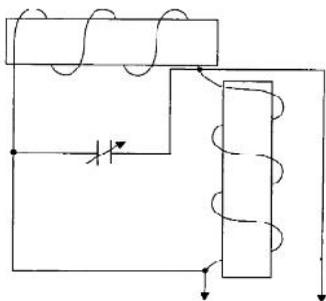
Рассмотрим направленные свойства данных антенн. Величина ЭДС, наведенной в антенне магнитным полем, зависит от ее положения в пространстве и максимума, когда плоскость витков направлена в сторону радиостанции. Если рамку поворачивать вокруг вертикальной оси, то за один полный оборот амплитуда наведенной в ней ЭДС дважды будет достигать наибольшего значения и дважды убывать почти до нуля (ДН «восьмерка») (рис. 2).



Рис. 2. Диаграмма направленности антенны

Поместив внутрь рамочной антенны сердечник (феррит), ЭДС, возникающая в ней под действием магнитного поля, резко увеличивается (так как он концентрирует силовые линии поля, благодаря чему рамка пронизывается магнитным потоком большей плотности. Величина, показывающая, во сколько раз магнитное поле в сердечнике превышает значение внешнего поля, называют магнитной проницаемостью сердечника. Она выше, следовательно, лучше приемные свойства магнитной антенны.

Теперь рассмотрим варианты построения всенаправленной магнитной антенны и принцип ее работы. Она состоит из двух катушек индуктивности, выполненных на двух ферромагнитных сердечниках, расположенных под углом  $90^\circ$  относительно друг друга (рис. 3). Причем катушки индуктивности электрически подключены синфазно, а к их концам параллельно подключен дополнительно введенный конденсатор.



*Рис. 3. Схематичное изображение*

Технический результат применения данного устройства заключается в получении всесторонней диаграммы направленности. Антенна может быть использована в полевых условиях в носимом приемнике и так далее для приема радиосигналов.

Технические результаты:

1) Исключение возможности взаимной компенсации ЭДС, наводимой в них, и обеспечение приема при любом угле поворота приемных антенн относительно вектора магнитного поля путем ортогонального расположения антенн.

2) Повышение эффективной действующей высоты антенны, так как параллельное соединение обмоток снижает общую индуктивность, позволяя добавить витки на каждый из стержней.

За счет неравенства и несинфазности магнитных потоков, возбуждаемых в каждом сердечнике 1, результирующее напряжение на выводах параллельно соединенных обмоток катушек индуктивности 2 сердечников будет составлять векторную сумму напряжений, наводимых магнитными потоками в каждой из обмоток.

Это напряжение практически не зависит от направленности прихода электромагнитной волны (в плоскости магнитного вектора или в пределах полной сферы), что исключает необходимость использования двух усилителей, фазовращателя и сумматора. Настроенный на резонанс антенный контур системы позволяет устранить шунтирование одной катушки другой [1].

При воздействии на антенну магнитного поля сигнала независимо от его угла прихода в катушках индуктивности магнитной антенны наводится ЭДС, которая складывается непосредственно на концах соединенных параллельно

катушек, и суммарный сигнал подается на высокоомный вход РПУ. Параллельное включение двух катушек индуктивности снижает суммарную индуктивность вдвое. Для восстановления значения индуктивности необходимо на каждой из катушек увеличить количество витков в 1,41 раза.

Также следует рассмотреть вариант построения антенны на основе метаматериалов.

Техника преобразования электромагнетизма, инновационный подход к разработке новых электромагнитных устройств, которая может найти здесь свою полезность, потому станет возможным связать пространство, время и материал.

Ниже приведен схематический принцип преобразования координат (рис. 4), используемый для достижения квази-совершенного изотропного излучения.

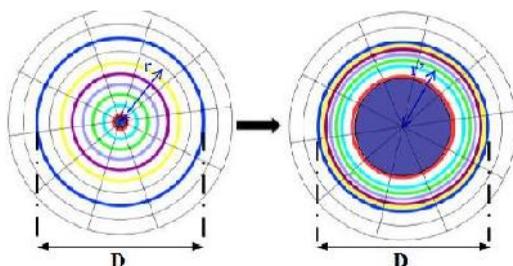


Рис. 4. Схематический принцип преобразования координат в метаматериале

Метаматериалы Electric-LC (ELC) используются для создания радиальных и угловых градиентов диэлектрической проницаемости, чтобы преобразовать двунаправленное излучение во всенаправленное излучение.

Синий круг вокруг источника излучения - ограничивает зону излучения. Преобразование координат «пространственное растяжение» состоит в экспоненциальном растяжении центральной красной круговой области.

За процедурой растяжения следует сжатие. Кольцевая область между красными и синими кругами - обеспечит хорошее согласование импеданса со свободным пространством, где D-диаметр трансформируемого пространства.

Изотропное излучение получается, поскольку размер излучателя очень мал по сравнению с рабочей длиной волны. Таким образом, независимо от типа используемого излучающего элемента, определяется преобразование, экспоненциально растягивающее область, в которой расположен элемент. Длина волны в этом случае будет намного больше в непосредственной близости от излучающего элемента.

#### Список литературы

1. Domingo C., «Magnetic Induction for Underwater Wireless Communication Networks», IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 60, no. 6, june 2012.

Материал поступил в редколлегию 26.09.20.

А.Г. Чертановский, В.Г. Захаров, Н.Н. Дударева  
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

### **SIMULATION OF A SENSOR FOR CONTROL OF OPERATING MODES OF OUTPUT STAGES OF RADIO TRANSMITTERS**

*Контроль, режимов работы выходных каскадов радиопередающих устройств, это очень важная задача, т.к. за счет быстрого реагирования на аварию можно снизить ущерб, который может нанести авария. В работе выполнено моделирование датчика контроля режимом работы выходных каскадов радиопередающих устройств.*

*Monitoring the operating modes of the output stages of radio transmitters is a very important task, because by responding quickly to an accident, you can reduce the damage that an accident can cause. In this work, the simulation of the sensor for controlling the operating mode of the output stages of radio transmitting devices is performed.*

*Ключевые слова: авария, режим работы, радиопередающее устройство, выходной каскад, транзистор.*

*Keywords: accident, operating mode, radio transmitting device, output stage, transistor.*

Самыми энергетически нагруженными узлами радиопередающих устройств являются выходные каскады, работающие непосредственно на антенно-фидерные устройства. Выходные каскады представляют собой генераторы с внешним возбуждением (ГВВ). Особенностью использования ГВВ в радиопередающих устройствах заключается в стремлении получить большую выходную мощность, снимаемую с электронного прибора [1]. Исследования показывают, что при аварийной ситуации в ГВВ изменение токов и напряжений могут в десятки раз превосходить оптимальный режим [2-5].

При резонансной нагрузке в выходном каскаде транзисторы радиопередатчика работают в следующих режимах [1]:

1. Режим отсечки.
2. Активный режим.
3. Перенапряженный режим.
4. Сильноперенапряженный режим.

На рис. 1 показана электрическая принципиальная схема датчика

контроля режимов работы выходных каскадов радиопередающих устройств.

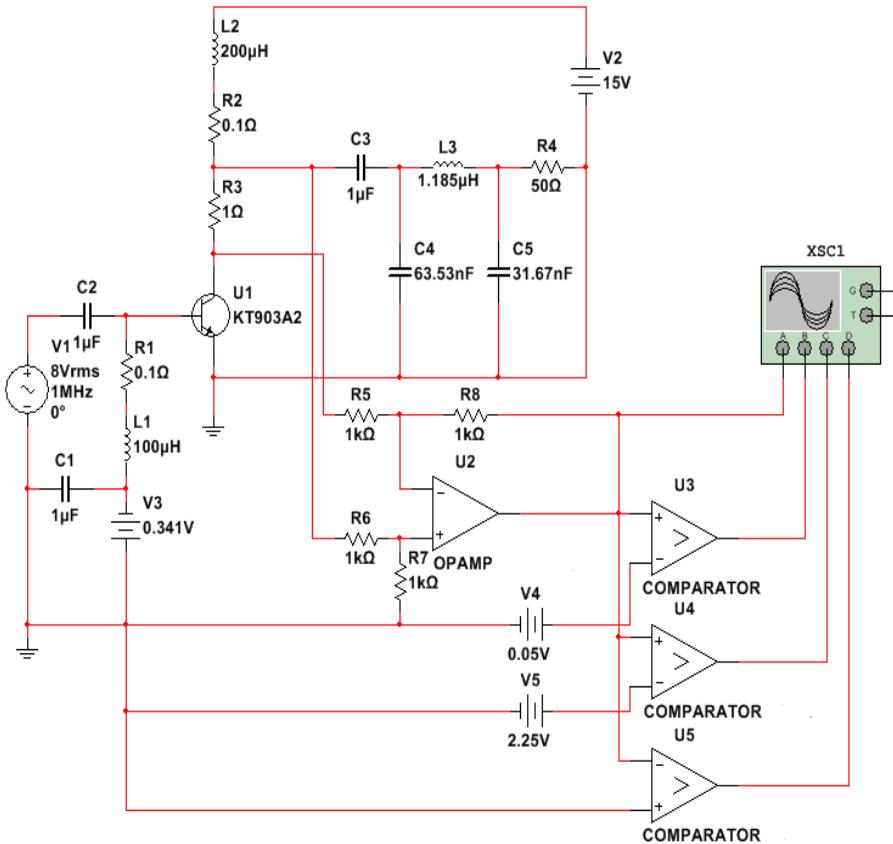


Рис. 1. Схема датчика контроля состояния режимов работы выходных каскадов радиопередатчиков

Выполним моделирование в среде пакета «Multisim» датчика контроля режимов работы выходных каскадов радиопередающих устройств, который контролирует ток коллектора в схеме ГВВ. Схема на рис. 1 имеет следующие параметры радиоэлементов L1 – 100 мкГн; L2 – 200 мкГн; C1-C3 – 1 мкФ; C4 – 63,53 нФ; L3 – 1,185 мкГн; C5 – 31,67 нФ; R4 – 50 Ом; R1, R2 – 0,1 Ом; R1 – 1 Ом; R5-R8 – 1 кОм. Частота входного сигнала V1 - 1 МГц. Напряжение питания V2 – 15 В. Пороговое напряжение режима отсечка/активный режим V4 – 0,05 В. Пороговое напряжение режима активный/перенапряженный режим V5 – 2,25 В.

На рис. 2 показаны результаты моделирования. Все осциллограммы четырехканального осциллографа имеют разрядность по вертикали 5 В на деление.

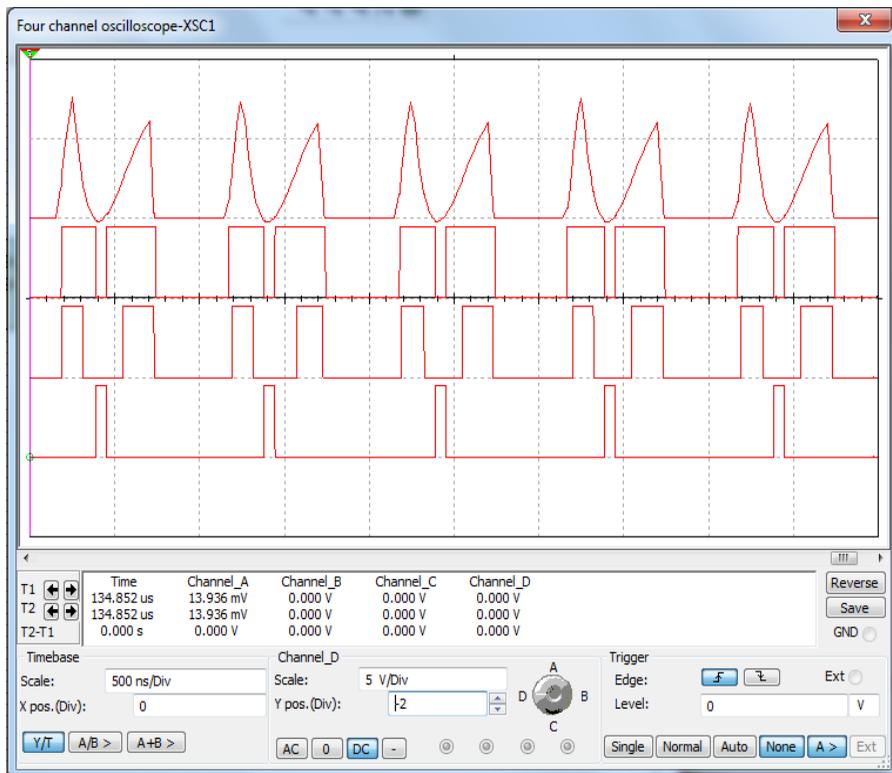


Рис. 2. Результаты моделирования

На первой осциллограмме (рис. 2) показана зависимость тока коллектора транзистора U1. На вход транзистора подана такая величина входного напряжения, что транзистор ГВВ последовательно переходит из режима отсечки в активный режим, далее в перенапряженный и сильноперенапряженный режимы.

На второй осциллограмме (рис. 2) показан сигнал после компаратора U3. Как только сигнал тока коллектора превысит пороговое значение напряжения отсечка/активный режим, на выходе вырабатывается импульс, который сигнализирует, что транзистор открылся. Если ГВВ работает также в сильноперенапряженном режиме, то на выходе вырабатывается два импульса.

На третьей осциллограмме (рис. 2) показан сигнал после компаратора U4. Как только сигнал тока коллектора превысит пороговое значение напряжения активный/перенапряженный режим, то на выходе вырабатывается два импульса, который сигнализирует, что транзистор работает в перенапряженном режиме.

На четвертой осциллограмме (рис. 2) показан сигнал после компаратора U5. Как только сигнал тока коллектора поменяет знак, т.е. транзистор перейдет в сильно-перенапряженный режим, то на выходе вырабатывается импульса, который сигнализирует, что транзистор работает в сильно-перенапряженном режиме.

*Заключение.* Выполнено моделирование датчика контроля режимов работы выходных каскадов радиопередающих устройств, которое позволяет по комбинации сигналов на выходе компараторов в рабочем интервале, сказать в каком режиме находится транзистор в схеме ГВВ.

### Список литературы

1. *Шахгильдян, В.В.* Радиопередающие устройства: учебник для вузов / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; под ред. Шахгильдяна В.В. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.
2. *Чертановский А.Г.* Моделирование аварийных режимов в генераторе с внешним возбуждением / А.Г. Чертановский // Радиотехника в промышленности и энергетике: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 19-27.
3. *Чертановский А.Г.* Экспериментальное исследование аварийных режимов генератора с внешним возбуждением / А.Г. Чертановский // Радиотехника в промышленности и энергетике: сб. науч. тр.: к 20-летию кафедры радиотехники и радиотехнических систем. – Чебоксары, 2014. – С. 89-97.
4. *Охоткин, Г.П.* Режим пробоя коллекторной цепи транзистора в ключевых генераторах с внешним возбуждением / Г.П. Охоткин, А.Г. Чертановский, Н.В. Павлов, С.А. Михайлов, С.Н. Мидушкин // Нигматуллинские чтения – 2018: тезисы докладов Междунар. науч. конф. – 2018. – С. 205-208.
5. *Охоткин, Г.П.* Режим внутреннего обрыва в транзисторе при работе в ключевых генераторах с внешним возбуждением / Г.П. Охоткин, А.Г. Чертановский // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем: материалы III международной научно-практической конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Н.А. Пилюгина. – 2019. – С. 108-112.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

С.Г. Чумаров

(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

## **ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ОПТИМАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

### **EFFECT OF NOISE ON OPTIMAL GAIN OF HIGH-FREQUENCY AMPLIFIERS**

*Рассмотрено влияние шумов на качественные показатели высокочастотных усилителей для цифровых радиосистем. Обоснована актуальность выбора элементной базы при проектировании таких усилителей по критерию минимизации шумов.*

*The influence of noise on the quality indicators of radio-frequency amplifiers for digital radio systems is considered. The relevance of choosing the element base for designing such amplifiers based on the noise minimization criterion is proved.*

*Ключевые слова: высокочастотный усилитель, коэффициент шума, СВЧ-транзистор, компьютерное моделирование.*

*Keywords: radio-frequency amplifier, noise figure, microwave transistor, computer simulation.*

Усиление радиосигналов для цифрового телерадиовещания и других цифровых радиосистем [1] является актуальной задачей из-за ограничения зоны уверенного приема, малой мощности радиопередатчиков, особенности распространения радиоволн, высоты расположения антенны и её конструкции и рельефа местности. Для обеспечения приемлемого коэффициента битовых ошибок (BER) применяют антенны сложной конструкции и малозумящие антенные усилители.

Выпускаемые в настоящее время усилители отличаются по назначению, стоимостью, диапазоном рабочих частот, коэффициентом усиления  $K_u$ , коэффициентом шума  $K_{ш}$  и т.д. При слишком высоком  $K_u$  на ВЧ в широком диапазоне частот неравномерность  $K_u$  может достигать до 10...15 дБ и задача обеспечения устойчивости усилителей становится сложной. В этом случае для получения высокого  $K_u$  применяют каскадное соединение. За определяющий фактор увеличения BER обычно принимают уровень собственных шумов, а не  $K_u$ . Уровень шума на выходе  $K_{ш,вых}$  зависит в первую очередь от уровня шума транзистора первого каскада, усиливаемого всеми последующими каскадами. Вместе с тем шумы последующих каскадов можно не учитывать. Собственные шумы в свою очередь также усиливаются вместе с полезным сигналом и ухудшают отношение сигнал/шум усилителя. В первом каскаде в качестве СВЧ транзисторов рекомендуется использовать транзисторы с низким  $K_{ш}$ .

У многокаскадного усилителя для определения шумов усилителя используется показатель, приведенный к входу коэффициента шума  $K_{ш}$ ,

который равен уровню шума на выходе, кратному на общий коэффициент усиления, т.е.  $K_{ш} = K_{ш.вых} / K_u$ . Увеличение коэффициента усиления при неизменном коэффициенте шума не способствует выигрышу в отношении сигнал/шум и, следовательно, улучшению качества приема. Следует отметить, что чрезмерное превышение заданного  $K_u$  увеличивает вероятность самовозбуждения и перегрузки мощными сигналами или помехами.

Из наиболее часто используемых СВЧ транзисторов можно отметить отечественные КТ391 ( $K_{ш} = 3$  дБ) и КТ3115 ( $K_{ш} = 2$  дБ), импортные – BFR-93A ( $K_{ш} = 1,5$  дБ) и 2SC3356 ( $K_{ш} = 1,5$  дБ). Для исследования влияния шума был выбран двухкаскадный апериодический усилитель ВЧ [2] на биполярных транзисторах BFR-93A в каждом каскаде (рис. 1). Оба усилительных каскада построены по схеме с общим эмиттером и емкостной связью между каскадами. Первый каскад – широкополосный, без коррекции.

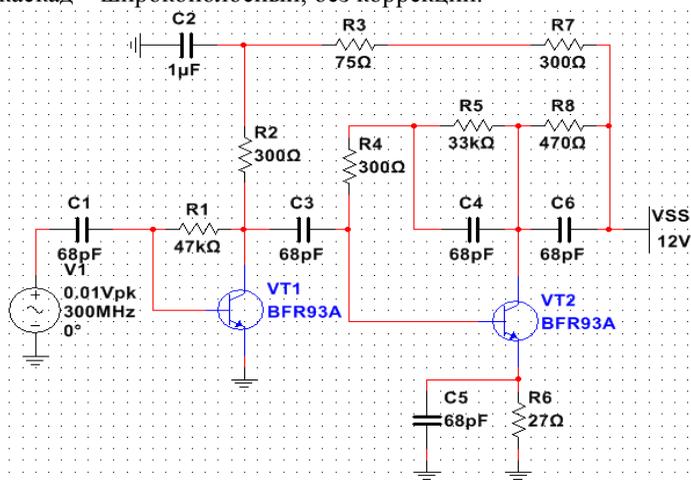


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя

Для компьютерного моделирования электронных схем, имеется достаточно большой перечень программного обеспечения, позволяющих построить полную модель устройства на основе SPICE-моделей элементов, например, Altium Designer, Multisim [3] и т.д. Также возможно моделирование символьным методом [4]. Для моделирования некоторых цифровых схем, в том числе LVDS-интерфейса, удобными являются IBIS-модели [5]. Компьютерное моделирование позволяет обнаружить неправильные схемотехнические решения и подобрать оптимальное значение параметров элементов схемы за счет многократного моделирования.

Анализ шума в Multisim (рис. 2) позволил определить суммарное значение выходного шума (`onoise_total`) и суммарного шума, приведенного к входу (`inoise_total`). На рис. 3 представлен график спектральной плотности суммарного выходного шума (`onoise_spectrum`) и суммарного шума, приведенного ко входу (`inoise_spectrum`) в интересующей полосе.

	Variable	Integrated noise (V or A)
1	inoise_total	14.81951 u
2	onoise_total	249.35585 u

Рис. 2. Результаты анализа шума

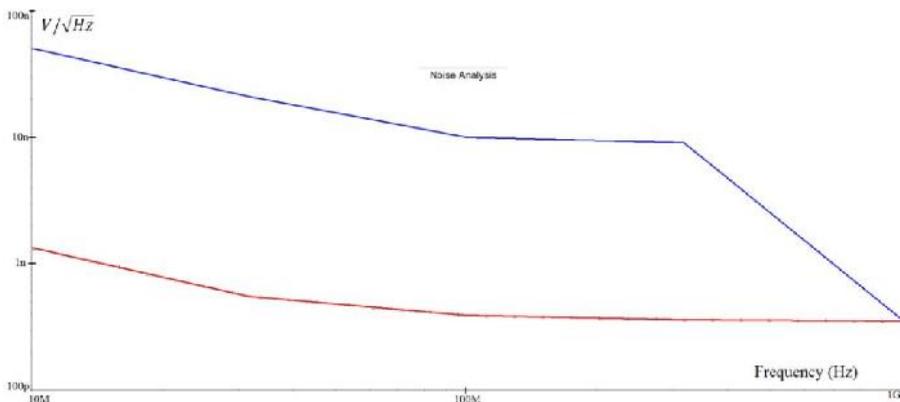


Рис. 3. Спектральная плотность шумов усилителя

Таким образом, в работе определено влияние коэффициента шума компонентов высокочастотного усилителя на его оптимальное усиление. Учет собственных шумов позволяет достичь максимального BER цифровых радиосистем.

### Список литературы

1. Чумаров, С.Г. Особенности реализации и применения программно-определяемых радиосистем/ С.Г Чумаров, Ю.С. Милкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 442-443.
2. Чумаров, С.Г. Моделирование высокочастотных усилителей для современных радиосистем / С.Г Чумаров // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 325-327.
3. Чумаров, С.Г. Исследование мостового усилителя тока с ПИ регулированием/ С.Г Чумаров, В.К. Чернов // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 321-324.
4. Чертановский, А.Г. Методика моделирования переходных процессов в однотактных каскадах на биполярных транзисторах/ А.Г. Чертановский // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 1. – С. 36-41.
5. Григорьев, А.В. Интерфейс последовательной передачи информации по технологии LVDS/ А.В. Григорьев, А.А. Арсентьева // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2018): материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 236-237.

Материал поступил в редколлегию 08.10.20.

У.Ф. Шарафиев, А.Ж. Сахабутдинов  
(г. Казань, Казанский государственный технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ СВЕРХУЗКИХ РЕЗОНАНСНЫХ КОНТУРОВ**

**SIMULATION OF TWO-FREQUENCY SCANNING  
OF SUPERNARROW RESONANCE CIRCUITS**

*Работа посвящена моделированию двухчастотного зондирования сверхузких резонансных контуров. Приведено моделирование оптоэлектронной схемы двухчастотного сканирования резонансного контура в программном пакете Optisystem.*

*The work is devoted to modeling of two-frequency scanning of ultra-narrow resonance contours. The modeling of an optoelectronic circuit for two-frequency scanning of a resonant contours in the Optisystem software package is presented.*

*Ключевые слова: оптический, волоконная брэгговская решетка, резонансный контур, двухчастотное сканирование.*

*Keywords: optical, fiber bragg, resonance circuit, two-frequency scanning.*

Волоконно-оптические измерения – быстро развивающееся и постоянно расширяющееся направление. Современная промышленность освоила производство волоконно-оптических датчиков, таких как датчики температуры, давления, вибрации, деформации. Расширяется применение и мультипликативных датчиков, где чувствительным элементом является волоконная брэгговская решетка или структура на ее основе. Главным преимуществом волоконно-оптических средств измерения параметров относительно традиционных являются меньшие габариты и вес, невосприимчивость к электромагнитным полям, простота исполнения, возможность передачи большого количества датчиков по одному каналу и построение измерительных систем на их основе [1, 2].

Особый интерес вызывают волоконные брэгговские структуры, в спектральный отклик которых включаются сверхузкие элементы, такие как окна прозрачности, сформированные, например, дискретными фазовыми сдвигами, или линейно чирпированные волоконные брэгговские решетки или структуры собранные из таких элементов. Измерение параметров спектрального отклика, а именно амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристики, таких структур весьма важная задача [2].

В работе была поставлена задача моделирования исследования спектральных характеристик сверхузких оптических элементов на базе двухчастотного сканирования [3,4]. Источником исходного излучения является узкополосный лазер, излучение которого проходит через модулятор

Маха-Цендера и формирует двухчастотное коррелированное излучение. Двухчастотное излучение, направляется на резонансный контур (в качестве которого выступает классическая волоконная брэгговская решетка с фазовым сдвигом), выходной сигнал принимается на фотоприемнике с последующей фильтрацией электрического сигнала на разностной частоте излучения. По форме выходного сигнала фотоприемника, сформированного как результат биений двух частотных компонент, делается вывод о спектральной форме исследуемого оптического устройства. Изменяя центральную частоту исходного лазерного, получаем зависимость электрического сигнала фотоприемника от центральной длины волны исходного сканирующего сигнала.

Моделирование проводилось в программном пакете Optisystem, модель оптико-электронной схемы двухчастотного сканирования резонансного контура приведена на рис. 1.

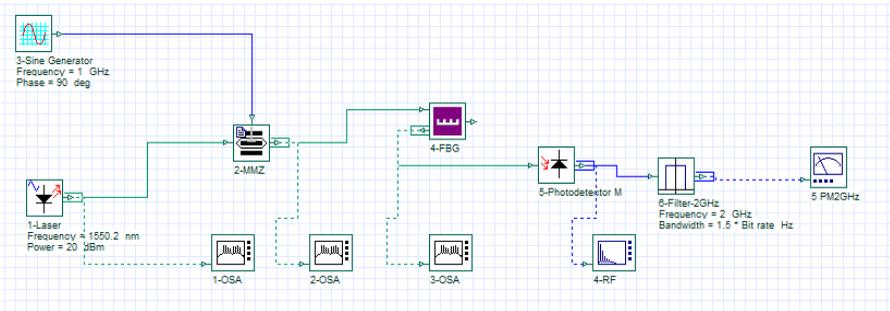


Рис. 1. Модель оптико-электронной схемы двухчастотного сканирования

Узкополосное лазерное излучение моделируется с помощью CW Laser (1-Laser, рис. 1). Центральную длину волны лазерного излучения зададим от 1549.8 до 1550.2 нм, с шагом 20 пм. С помощью модулятора Маха-Цендера (2-MMZ, рис. 1) получим двухчастотный сигнал, подавая на модулятор гармонический синусоидальный сигнал с генератора (3-Sine Generator, рис. 1), частота генератора 1 ГГц, с амплитудой тока 0.5 усл. ед. Подобрал напряжение смещения модулятора Маха-Цендера, получим двухчастотное излучение с максимальным подавлением несущей частоты. На рисунках 2,а и 2,б представлены исходное излучение и сформированное двухчастотное излучение. Разностная частота двухчастотного сканирующего сигнала равна удвоенной частоте модуляции, подаваемой с генератора – 2 ГГц. Двухчастотное лазерное излучение подается на исследуемый резонансный контур, который задан ВБР (4-FBG, рис. 1), с центральной длиной волны 1550 нм. АЧХ исследуемого резонансного контура приведена на рис. 2,в. Двухчастотное лазерное излучение после взаимодействия с резонансным контуром представлена на рис.2,г, где мы можем наблюдать изменение амплитуды сканирующего сигнала. Результат двухчастотного сканирующего

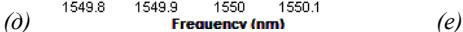
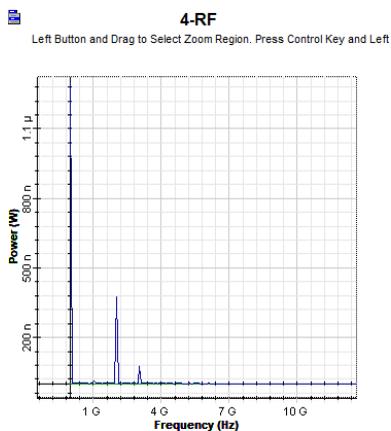
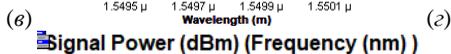
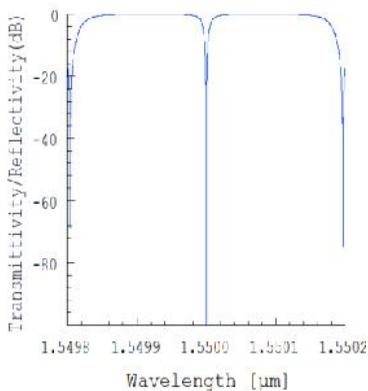
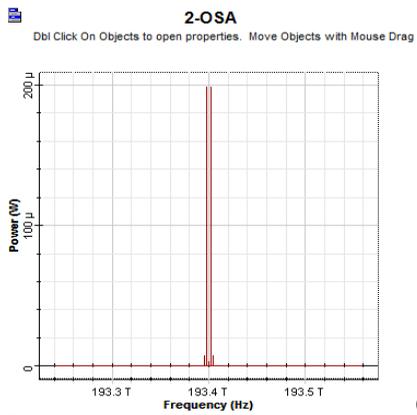
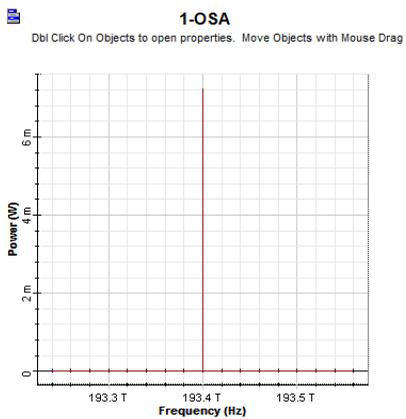


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики двухчастотного сканирования резонансного контура

излучения подается на оптический вход фотоприемника (5-Photodetector-M, рис.1). Двухчастотное лазерное излучение на фотоприемнике формирует колебания биений на разностной частоте оптических составляющих – 2 ГГц.

Спектральная характеристика электрического сигнала после фотоприемника приведена на рис. 2,д. Для выделения разностной частоты используется частотный фильтр с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой, с центральной частотой 2 ГГц и шириной фильтра 0.2 ГГц. После прохождения фильтра сигнал принимается на измерителе мощности (5-PM2GHz, рис. 1). На рис. 2,е приведена восстановленная амплитудно-частотная характеристика резонансного контура. По оси абсцисс отложен номер итерации, соответствующий сдвигу центральной длины волны двухчастотного излучения в диапазоне 1549.8 до 1550.2 нм, с шагом 20 пм, а по оси ординат величина мощности электрического сигнала.

Сравнивая амплитудно-частотные характеристики исследуемого резонансного контура (рис. 2,в) и восстановленную амплитудно-частотную характеристику методом двухчастотного сканирования (рис. 2,е), можно видеть, что кривые в целом повторяют форму, что в свою очередь подтверждает корректность выдвинутых теоретических предсказаний и результатов компьютерного моделирования.

### Список литературы

1. *Сахабутдинов, А.Ж.* Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: специальность 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»: дис. на соискание ученой степени док. техн. наук/ Сахабутдинов Айрат Жавдатович; Казан. нац. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2018. – 467 с.

2. *Нуреев, И.И.* Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков: специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук / Нуреев Ильнур Ильдарович; Казан. нац. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2016. – 515 с.

3. *Морозов, О.Г.* Симметричная двухчастотная рефлектометрия в лазерных системах контроля параметров природной и искусственных сред: специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук/ Морозов Олег Геннадьевич; Казан. нац. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. - Казань, 2004. - 383 с.

4. *Нуреев, И.И.* Статическая и динамическая радиофотонная интеррогация однотипных волоконных брэгговских решеток при полигармоническом зондировании/ И.И. Нуреев // Научно-технический Вестник Поволжья. – 2016. – №3. – С. 69–71.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.20.*

А.В. Шмойлов, Р.В. Халеев

(г. Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ ПОТОКОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕФОННОЙ СТАНЦИИ HiPATH 4000**

### **MODELING OF THE PROCESS OF SETTING UP DIGITAL STREAMS AUTOMATIC TELEPHONE EXCHANGE HiPATH 4000**

*В условиях ограниченного количества рабочих мест администратора при изучении процесса настройки цифровых потоков автоматической телефонной станции HiPath 4000 возникает задача моделирования данного процесса на ПЭВМ. Представлен подход по созданию эмулятора для настройки автоматической телефонной станции.*

*Under the conditions of a limited number of administrator jobs, when studying the process of configuring digital streams of the HiPath 4000 automatic telephone exchange, the task of modeling this process on a PC arises. An approach to creating an emulator for setting up an automatic telephone station is presented.*

*Ключевые слова: эмулятор, автоматическая телефонная станция, цифровой поток.*

*Keywords: emulator, automatic telephone exchange, digital stream.*

Для подготовки компетентного технического персонала, обслуживающего то или иное оборудование, необходима его всесторонняя подготовка, включающая в себя, как прохождение специальных теоретических курсов по изучению назначения, состава и технических возможностей, так и практических занятий по настройке, конфигурации. Для отработки практических задач по настройке цифровых потоков автоматических телефонных станций необходимо использовать два рабочих места и в идеальном случае два комплекта оборудования, соединенного между собой посредством их линейных интерфейсов линией связи.

Закупка большего числа комплектов оборудования нецелесообразна и экономически невыгодна, так как коммутационное оборудование является достаточно дорогостоящим. Кроме того, имеет место ограниченное количество одновременно обучающихся теории и тренирующихся на средствах связи на одном учебном месте.

Современный способ обучения специалистов связи видится в разработке и активном использовании эмуляторов по изучению и эксплуатации коммутационного оборудования, позволяющий обучать персонал без использования реального оборудования [1, 2].

Данные средства разработки при создании программных модулей пользовательского интерфейса и авторизации могут обеспечить максимальное

приближение создаваемого интерфейса к реальному интерфейсу программы рабочего места администратора станции.

Одними из наиболее сложных вопросов в конфигурировании автоматических телефонных станций является настройка цифровых потоков, по которым станции взаимодействуют друг с другом. Для настройки цифровых потоков необходимо вводить команды, которые взаимосвязаны между собой. Для отработки вопросов конфигурирования цифровых потоков и закрепления навыков можно использовать эмуляторы, которые без использования станций позволяют обучающимся получить навыки и совершенствовать умения по их настройке.

Управление станцией осуществляется с использованием специального программного обеспечения *Comwin*, с помощью которого осуществляется подключение ПЭВМ к станции и ее администрирование. Процесс конфигурирования представляет собой ввод команд администратором станции в режиме диалога.

Интерфейс эмулятора должен ничем не отличаться от реального интерфейса, чтобы при настройке телефонной станции у обучающегося не возникало проблем с вводом команд.

Сложность в настройке цифровых потоков заключается в том, что настроив одну станцию, обучающийся не сможет проверить правильность введенных команд. Поэтому в эмуляторе обучающемуся предлагается настроить две станции, чтобы потом убедиться в правильности установленных параметров (рис. 1).



*Рис.1. Исходное меню*

После выбора станции обучающемуся предлагаются исходные данные, которые включают: наименование исходного модуля, образующего интерфейс для подключения цифрового потока, его местоположение в конструкции станции, используемый протокол сигнализации, количество и номера *B*-каналов в потоке, используемый приоритет по синхронизации и код выхода на противоположную станцию.

Далее в соответствии с исходными данными обучающийся вводит необходимые команды с указанием требуемых параметров (рис. 2).

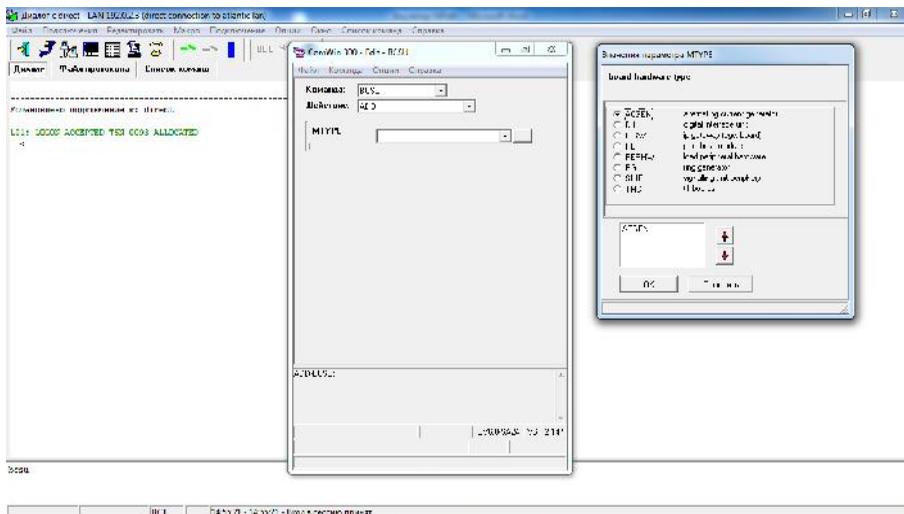


Рис. 2. Пример скриншота интерфейса программы

После ввода команд для первой и второй станций обучающийся переходит к проверке цифровых потоков (рис. 1). Для этого он должен в соответствии с исходными данными набрать код выхода на противоположную станцию и получить сигнал "ответ станции", что будет означать правильность введенных команд.

Таким образом в условиях дефицита учебных рабочих мест для конфигурирования цифровых потоков автоматических телефонных станций и получения практических навыков работы администраторов станций, разработанный эмулятор позволит обучающимся получать практические навыки без реального использования оборудования.

### Список литературы

1. Трухин, А.В. Анализ существующих в РФ тренажёрно-обучающих систем. – URL: <https://ido.tsu.ru/files/pub2008/8.pdf> (дата обращения: 11.09.2020).
2. Образцов, И.В. Виртуальные тренажеры в практике технического образования/ И.В. Образцов, В.В. Белов. – URL: <http://cdokp.tstu.tver.ru/site.services/download.aspx?act=1&did=89791&dbid=marcmain> (дата обращения: 11.09.2020).

Материал поступил в редколлегию 23.09.20.

А.Р. Юсупова

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

## **СРАВНЕНИЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩЕГО ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ И НИЖНИХ ЧАСТОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ NI MULTISIM**

### **COMPARISON OF CIRCUIT MODELING OF AN INTERFERENCE-SUPPRESSING HIGH-AND LOW-PASS FILTER USING THE NI MULTISIM PROGRAM**

*Для защиты устройств от помех и решения задачи электромагнитной совместимости необходимо использовать фильтры. Спроектированы и протестированы два фильтра. Результаты подтвердили эффективность обоих протестированных фильтров в подавлении электромагнитных помех, генерируемых источником питания.*

*To protect devices from interference and solve the problem of electromagnetic compatibility, you must use filters. Two filters were designed and tested. The results confirmed the effectiveness of both tested filters in suppressing electromagnetic interference generated by the power supply.*

*Ключевые слова: схемотехническое моделирование, фильтр верхних и нижних частот, переходные характеристики.*

*Keyword: circuit modeling, high and low pass filter, transient characteristics.*

Моделирование и проектирование фильтров подавления электромагнитных помех – это одна из главных задач при производстве изделий силовой электроники, так как мощные преобразователи по своей структуре не могут соответствовать нормам электромагнитной совместимости без дополнительной фильтрации. За последние несколько лет наблюдаются значительный рост числа электронных устройств, подключенных к энергосистеме. Сложившаяся ситуация объясняется тремя основными причинами [1]. Во-первых, это необходимость постоянного повышения эффективности использования энергии. Во-вторых, большое использование возобновляемых источников энергии, которые требуют преобразования этой энергии. И в-третьих, снижение цен на силовые полупроводниковые приборы. Увеличивающееся число устройств силовой электроники и растущие частоты коммутации влияют не только на общую устойчивость электросети и приборов, поэтому нормальное функционирование оборудования, подключенного вблизи источника помех, может быть нарушено. Выходом из этой ситуации являются фильтры подавления электромагнитных помех, которые стали обязательным компонентом для силовых электронных устройств.

Главной целью данной статьи является сравнение работы помехоподавляющих фильтров верхних и нижних частот по переходным характеристикам.

Для осуществления заданной цели служат следующие задачи:

- 1) Проектирование фильтра нижних и верхних частот.
- 2) Задача синтеза схемы для спроектированного фильтра.

Наиболее эффективным способом исследования проектируемого объекта на стадии формирования его принципиальной электрической схемы является схемотехническое моделирование. Произведем моделирование фильтра для подавления помех с использованием программы NI Multisim 12.0 [2].

Зададим следующие параметры для проектирования фильтров нижних и верхних частот.

Таблица 1. Параметры фильтров

Параметр	Фильтр нижних частот	Фильтр верхних частот
Частота среза $f_{cp}$	1 КГц	10 КГц
Частота затухания $f_3$	3 КГц	5 КГц
Полоса пропускания $A_{пр}$	-1 Дб	-1 Дб
Полоса задержания $A_3$	-25 Дб	-25 Дб
Сопротивление нагрузки $R_H$	50 Ом	50 Ом

Частота среза фильтра нижних частот равна 1 КГц, следовательно, сигнал по частоте превышающий частоту среза будет сильно заглушаться.

Произведем синтез схемы для данного фильтра и составим электрическую принципиальную схему, добавив источник питания, сопротивление источника, осциллограф и плоттер Боде, на входе и на выходе установим измерительный зонд (рис. 1).

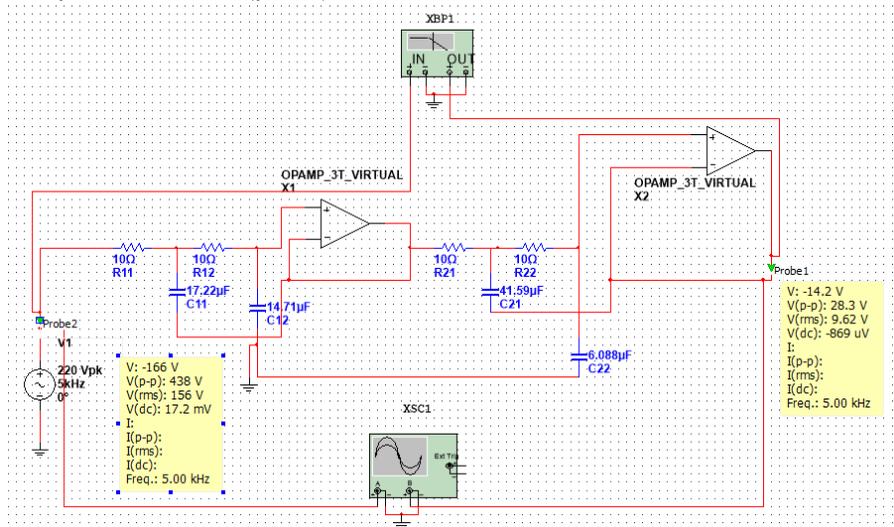


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема ФНЧ

Построим график переходных характеристик входного (рис. 2) и выходного (рис. 3) напряжения и силы тока. Сравнив эти два графика видно, что амплитуда напряжения и силы тока на выходе слишком мала по сравнению с входными данными. Значит, спроектированный фильтр нижних частот справился со своей задачей, он полностью устранил поданную на вход помеху.

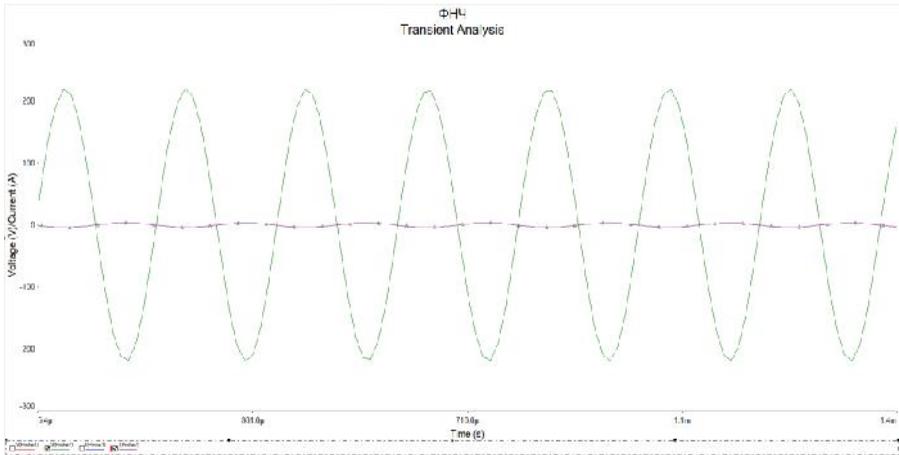


Рис. 2. График переходных характеристик входного напряжения и силы тока

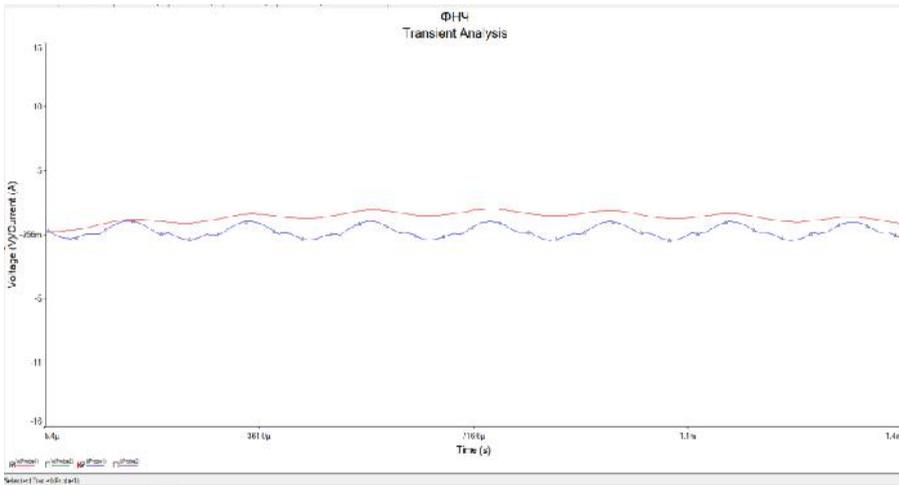


Рис. 3. График переходных характеристик выходного напряжения и силы тока

Аналогичным образом спроектируем фильтр верхних частот по заданным параметрам из таблицы 1.

Частота среза в этом случае равна 10 КГц, значит, сильнее будут затухать только сигналы, которые по частоте меньше 10 КГц. Если мы подадим помеху, у которой значение частоты выше частоты среза, то сигнал по амплитуде все равно изменится, но это затухание будет не критично.

Электрическая принципиальная схема фильтра верхних частот представлена на рис. 4.

Произведем построение графика переходных характеристик фильтра верхних частот (рис. 5, рис. 6).

Сравнив эти два графика, сделаем вывод о работоспособности фильтра, так как напряжение на выходе стремится к нулю.

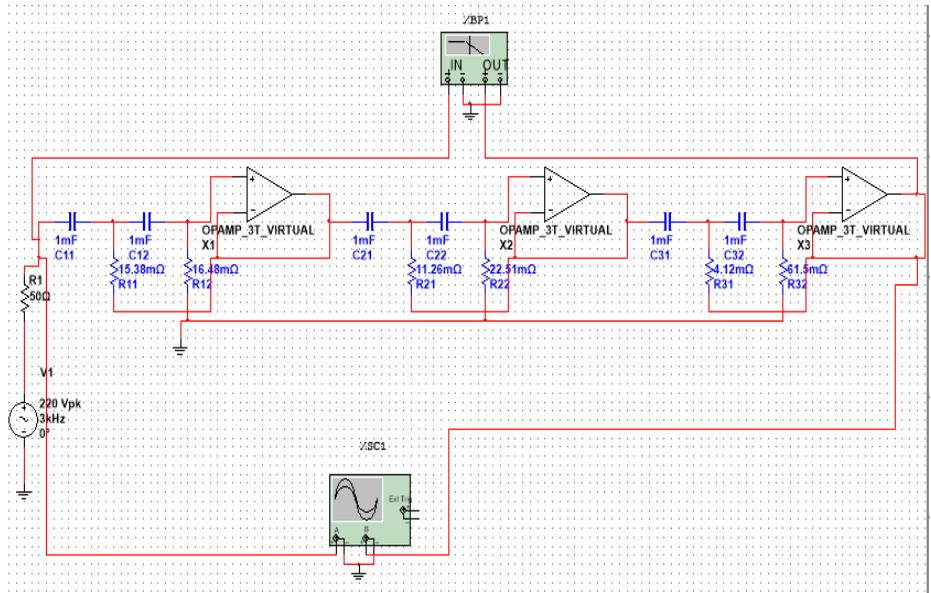


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема фильтра верхних частот

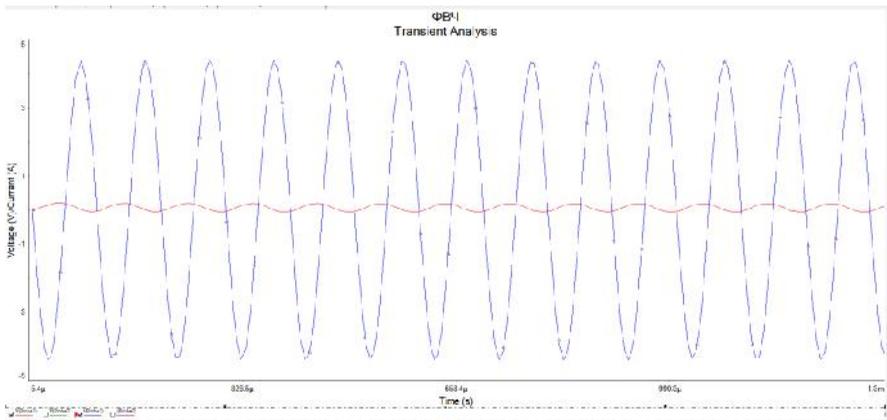


Рис. 5. График переходных характеристик входного напряжения и силы тока

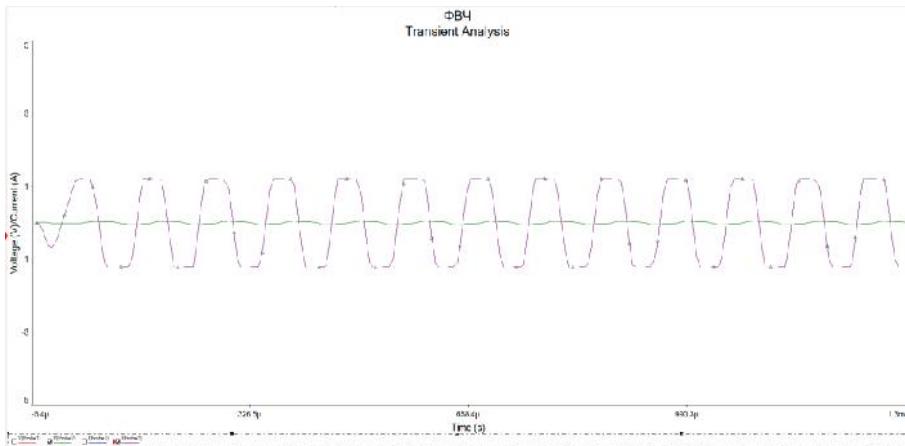


Рис. 6. График переходных характеристик выходного напряжения и силы тока

Сравнив работу фильтров верхних и нижних частот, сделаем вывод о том, что амплитуда силы тока превосходит амплитуду напряжения на графике переходных характеристик фильтра верхних частот по сравнению с фильтром нижних частот.

### Список литературы

1. Манушин, Илья. Модельно-ориентированная разработка эффективных фильтров подавления ЭМП для преобразователей большой мощности в CST STUDIO SUITE / Илья Манушин; пер. Владимир Рентюк // Компоненты и технологии – 2019. - №1. – С. 92-98.

2. Макаренко, В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI Multisim / В. Макаренко // ЭКис – Киев: VD MAIS, 2008. – № 1, 2, 3.

*Материал поступил в редколлегию 02.10.20.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ «ПРИМЕНЕНИЕ САПР В ЭЛЕКТРОНИКЕ, ФИЗИКЕ, РАДИОТЕХНИКЕ И СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

<b>Бавбель Е.И., Анискевич А.С.</b> Применение САПР в проектировании модуля радиотелеметрии БПЛА .....	3
<b>Бизякина В.С.</b> Применение метода имитации отжига для автоматизации поиска кратчайшего пути режущего инструмента .....	7
<b>Богомолов Б.К.</b> Исследование переходов и состояний триттера .....	10
<b>Булыгина О.В., Уварова Н.А.</b> Разработка модуля интеллектуального анализа режимов работы энергорайонов .....	14
<b>Бондарев В.Н., Воскресенский А.А.</b> Анализ эффективности САПР для моделирования тепловых процессов в печатных платах .....	17
<b>Гришин Р.С., Неснов Д.В.</b> Моделирование мультифункционального портативного рабочего места CompactWorkshop .....	20
<b>Валеев Д.Х., Карабцев В.С.</b> Гибридное моделирование - инструмент повышения качества разрабатываемых колесных транспортных средств ...	24
<b>Колошкина И.Е.</b> Подготовка специалистов по САПР технологического профиля применяемых в современной промышленности .....	28
<b>Константинова А.А., Цивильский И.В.</b> Моделирование передачи ультразвука через жидкую среду в зону лазерного воздействия .....	32
<b>Лебедев В.А.</b> Анализ результатов МКЭ моделирования вибрационных испытаний кузова двухэтажного пассажирского вагона .....	37
<b>Лебедев В.А., Глазов А.И.</b> Оценка напряженного состояния несущей конструкции кузова универсального полувагона методом конечных элементов .....	39
<b>Мамедова С.И., Гилемханова Н.Ф., Захарова З.Х.</b> Имитационное моделирование потока налогоплательщиков в органы федеральной налоговой службы в системе AnyLogic .....	42
<b>Рейимова Э.Б.</b> Исследование прочности центробежного колеса компрессора в системе ANSYS .....	46
<b>Суфьянова Ф.А.</b> Применение метода имитации отжига для автоматизации регулярного раскроя фигурных заготовок .....	50

**Филипович О.В., Гарматюк М.И., Майстришин М.М.** Применение САПР при проектировании кнопочной панели эндоскопической видеосистемы..... 53

**Шевцова Н.М.** Исследование прочности сварного соединения в системе SolidWorks..... 56

**Umurzakova D.M.** Development of models and algorithms for studying the dynamics of multidimensional systems with pulse-width modulation ..... 59

### **СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

**Андреянов Н.В.** Распознавание интересующих объектов в воздухе с использованием нейронной сети DetectNet ..... 63

**Андреянов Н.В.** Распознавание интересующих объектов в воздухе с помощью метода Виолы Джонса ..... 67

**Габдрахманова Ч.Ш.** Автоматизированная информационная система торговли на виртуальных торговых площадках ..... 71

**Гаптуллазянова Г.И.** Разработка приложения исследования помехоустойчивости оператора при обработке оперативной информации.. 74

**Глазырин А.В., Воробьев Е.С.** Преобразователи дискретных и аналоговых сигналов на цифровой подстанции ..... 77

**Глушак А.А.** Алгоритм функционирования регистрирующей аппаратуры электромагнитного калориметра Супер С-Т фабрики ..... 81

**Залялов Д.В.** Выбор методов распознавания автомобильных номеров..... 85

**Зарайский С.А., Конохов А.А.** Система управления мобильным роботом для системы безопасности на основе остаточных нейронных сетей..... 88

**Зотин В.Ф.** Контроль динамических параметров микросхем драйверов плазменных и вакуумно-люминесцентных дисплеев ..... 92

**Игнатъев Д.А., Михайлов А.Л.** Эксплуатация РРЛ-22 и интеграция каналов связи с системой ТМ СТН-3000..... 96

**Капитонов О.А., Третьяков А.С.** Оценка поправочных коэффициентов для расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя ..... 102

**Кардаков В.А.** Безопасность смарт – контрактов для САПР..... 106

**Краснов Р.П.** Моделирование радиооптических каналов распределенных систем ..... 110

**Ляшева М.М.** Сжатие изображений в информационно-измерительных системах ..... 113

<b>Ляшева М.М.</b> Контурный анализ изображений в информационно-измерительных системах .....	115
<b>Маряшина Д.Н.</b> Информационно-методическое обеспечение проектирования ИОС .....	117
<b>Назикова Л.А., Медведев М.В.</b> Распознавание объектов на изображениях при помощи нейронной сети средствами мобильного телефона.....	121
<b>Никонорова А.Р.</b> Автоматизация проектирования ИОС линейной алгебре	124
<b>Петровская М.В., Аптинова Д.Л.</b> Лабораторный стенд для исследования дробно-операторных устройств .....	128
<b>Петровский В.В., Нафиков И.Ф.</b> Лабораторный стенд для исследования динамических характеристик АЦП .....	130
<b>Петровский В.В., Шахтурин Д.В., Козлова А.А.</b> Лабораторный стенд для исследования статических и динамических характеристик оптоэлектронных элементов .....	132
<b>Стадник Н.А.</b> Разработка информационной системы организации работ складского помещения.....	134
<b>Фаттахов Н.И., Захарова З.Х.</b> Информационная система проверки сотрудников на защищенность от фишинга .....	138
<b>Шафигуллин И.Д., Денисов Е.С.</b> Автоматизированная измерительная система для квазираспределенного резистивного датчика с древовидной структурой .....	142

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ»**

<b>Барабанов Д.В., Хвостов В.А.</b> Частотно-регулируемый электропривод насоса магистрального нефтепровода с управлением по положению регулирующей заслонки .....	146
<b>Барабанов Д.В., Пугачев А.А.</b> Моделирование электропривода с асинхронным двигателем и импульсно-ключевым регулированием сопротивления ротора.....	149
<b>Гаврилов Е.С., Хвостов В.А.</b> Система автоматического регулирования давления в магистральном трубопроводе с адаптивным модальным регулятором .....	153
<b>Дадабаев Ш.Т.</b> Компьютерное моделирование пусковых режимов асинхронного двигателя при низком качестве питающей сети .....	156

<b>Karimov I.R.</b> Simulation of electric drive of ring spinning machines .....	162
<b>Петроченко И.М., Пугачев А.А.</b> Синтез контура положения следящего электропривода постоянного тока .....	169
<b>Подкопаев Б.П., Якшин А.С.</b> Диагностическое моделирование узлов радиотехнических систем со статическими нелинейностями.....	173
<b>Пугачев А.А., Морозов С.В., Морозов А.С.</b> Математическое моделирование тепловых процессов в асинхронном двигателе .....	177
<b>Седых С.В., Чуприна Н.В., Пугачев А.А.</b> Моделирование электропривода с асинхронным двигателем и системой векторного управления в энергосберегающем режиме.....	181
<b>Тяпин А.А., Литовченко А.В., Кинев Е.С.</b> О стратегии пространственно-векторной ШИМ в инверторе несимметричной линейной МГД-машины ...	185
<b>Тяпин А.А., Кинев Е.С.</b> Система электропитания МГД-перемешивателей расплава алюминия с IGBT-инверторами.....	190
<b>Татуйко П.С., Федяева Г.А., Беззубенко А.И.</b> Исследование резонансных преобразователей напряжения .....	196
<b>Татуйко П.С., Федяева Г.А., Беззубенко А.И., Надточей А.Г.</b> Повышение энергоэффективности систем электродвижения .....	200
<b>Хвостов В.А.</b> Моделирование процессов в синхронном двигателе при быстodeйствующем автоматическом включении резерва .....	204
<b>Чуприна Н.В., Седых С.В., Пугачев А.А.</b> Сравнительная оценка энергоэффективности систем управления автономным инвертором напряжения в составе электропривода переменного тока.....	208
<b>Akilov A.</b> Experience in using information technologies in laboratory exercises on the course of electromechanics.....	212

#### **СЕКЦИЯ «МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ПОВЕДЕНЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»**

<b>Гаврилов Е.С., Пугачев А.А.</b> Математическое моделирование асинхронного двигателя в произвольной системе координат .....	217
<b>Гадашев Д.Г., Дракин А.Ю., Школин А.Н.</b> Разработка драйвера энергоэффективного LED светильника .....	221
<b>Ибрагимов Р.В., Фадеева Л.Ю.</b> Моделирование неоднородных поверхностей для радиотехнических приложений .....	225
<b>Илюшин М.В., Вершинин К.В., Жданов Г.В.</b> Исследование модели планирования качества восприятия речевого сигнала .....	228

<b>Индохов К.А., Андреев С.Ю.</b> Вероятность символьной ошибки оптимального приемника для модуляции без памяти в условиях воздействия нестационарных помех .....	232
<b>Штеников И.В., Инкин Т.А.</b> Программа моделирования скорости конденсации хромовых покрытий в вакууме в зависимости от режимов их формирования.....	234
<b>Княгинин Д.А.</b> Идентификация линейных систем для решения задачи объединения моделей объекта разного порядка.....	238
<b>Константинов Э.С., Гизатуллин З.М.</b> Функционально-поведенческая модель дистанционной диагностики кардиостимуляторов .....	241
<b>Константинов Э.С., Гизатуллин З.М.</b> Математическое обеспечение автоматизированной системы для дистанционной диагностики кардиостимуляторов .....	245
<b>Пищик В.И., Игнатченко А.М., Обидина О.В.</b> Моделирование процессов, протекающих в плазме тлеющего разряда при обработке металлов и сплавов.....	249
<b>Седых С.В., Школин А.Н.</b> Разработка и тестирование поведенческой модели интегральной микросхемы 5340EY01x .....	252
<b>Семенов В.И., Шурбин А.К.</b> Конструирование вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой .....	257
<b>Халилов Т.М.</b> Моделирование прочности соединения балок с болтовым соединением в системе АРМ FEM Компас 3Д .....	261
<b>Халилов Т.М.</b> Решение задачи раскроя листового материала симплексным методом .....	265

### **СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ»**

<b>Давыдов В.Г.</b> Моделирование дискретно-нелинейной динамической системы Дмитриева-Кислова с селективным подавлением формируемых сигналов .....	270
<b>Золотухин А.В.</b> Разработка информационной системы организации работ производственного цеха .....	273
<b>Корнеев А.П.</b> Разработка математической модели электромеханической системы с распределенными параметрами в среде Matlab.....	277
<b>Корнеев А.П.</b> Экспериментальное исследование системы с распределенными параметрами в частотной области .....	281

<b>Малинин Г.В., Севриков Л.С.</b> Моделирование резонансного преобразователя постоянного напряжения .....	285
<b>Мукаева В.Р., Горбатков М.В., Фаррахов Р.Г., Парфенов Е.В.</b> Диагностика толщины покрытия в ходе ПЭО магниевое сплава AZ31 .....	289
<b>Мукаева В.Р., Шарипов А.Е., Мельничук О.В., Парфенов Е.В.</b> Диагностика толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования титана .....	291
<b>Охоткин Г.П., Угарин С.В., Дарвин А.А.</b> Моделирование работы логического устройства, формирующего диагональный закон коммутации ключей с переключением верхнего транзистора мостовой схемы вентильного преобразователя .....	293
<b>Охоткин Г.П., Угарин С.В., Дарвин А.А.</b> Моделирование симметричного закона коммутации в Simulink с применением пакета расширения Stateflow .....	296
<b>Раупов Р.Р., Афанасьев В.В.</b> Моделирование формирователей сигналов на основе управляемой нелинейной Multi-Scroll динамической системы по схеме Jerk .....	300
<b>Пугачев О.И., Фазилова К.Н.</b> Статистическая оценка интенсивности отказов программного комплекса .....	304
<b>Фазилова К.Н., Анцыферов С.С.</b> Модель динамики функционирования когнитивных систем .....	307

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОСИСТЕМ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, ПРОИЗВОДСТВЕ, НАУЧНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ И В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ»**

<b>Абдуллин Л.И., Вагапов Г.В., Балявина Э.Р., Абдуллазянов А.Ф.</b> Определение параметров режима однофазного замыкания на основе умных измерителей .....	310
<b>Абрамов С.В., Веселов В.Л., Викторов А.А., Игнатова Н.А., Никитина О.О.</b> Расчет и моделирование импульсного трансформатора с LC- нагрузкой .....	313
<b>Анисимов А.А.</b> Исследование последовательного активного силового фильтра с системой управления на базе быстрого преобразования Фурье ..	317
<b>Анисимов А.А.</b> Применение EasyEDA для моделирования электроники в дистанционном учебном процессе .....	320

<b>Архипова Д.А., Юсупова А.Р.</b> Сравнение последовательного алгоритма с алгоритмом слепого поиска решения задачи размещения элементов на печатной плате.....	323
<b>Бабенко В.П., Битюков В.К., Костин М.С.</b> Бездрроссельный DC/DC преобразователь с накачкой заряда .....	327
<b>Батенков К.А.</b> Возможности использования программных продуктов Riverbed IT Guru и MODELER в учебных заведениях.....	335
<b>Беспалов Н.Н., Горячкин Ю.В., Панькин К.Ю.</b> Моделирование тепловых процессов в силовых диодах штыревой конструкции при внешнем нагреве от источника квазибесконечной мощности .....	337
<b>Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.</b> Трехуровневый транзисторный преобразователь с питанием от трехфазной сети.....	341
<b>Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.</b> Транзисторный преобразователь напряжения с уменьшенным влиянием на питающую сеть .....	346
<b>Васильев Н.С.</b> Проектирование сети «Умный дом» в среде Cisco Packet Tracer .....	350
<b>Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Градов В.М.</b> Моделирование импульсных ксеноновых разрядов с широкодиапазонным спектральным составом излучения.....	354
<b>Горин В.Я., Куть Е.В., Беркович Г.М.</b> Разработка строительномонтажной подсистемы САПР для решения учебно-исследовательских задач при прокладке современных кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения .....	358
<b>Грбчак Е.П., Логинов Е.Л.</b> Моделирование многопараметрического поведения объектов энергетики с повышенными требованиями к отказоустойчивости в условиях критических воздействий.....	363
<b>Григорьев А.В.</b> Моделирование приёмо-передатчика LVDS интерфейса ..	367
<b>Жгун А.В., Жгун Д.А., Кликно Д.Д., Гладышев А.Б.</b> Разработка программно-аппаратного комплекса моделирования взаимной высокоточной навигации.....	370
<b>Зачиняев И.В., Кавалер М.И., Ярославцев М.В.</b> Определение энергоёмкости аккумуляторной батареи пригородного поезда на имитационной модели .....	374
<b>Зейналова С.М.</b> Алгоритм ассоциативного поиска информации в базах данных и знаний инструмента автоматизированного проектирования специализированных электронных интерфейсов.....	377
<b>Кихтенко С.Н.</b> Моделирование стационарных задач теплопроводности в учебном процессе .....	381

<b>Коркин А.Г., Фокин А.Б., Цвиоров К.Л.</b> Модель регулирования скорости передачи данных в радиоканале .....	383
<b>Королев А.В., Коркин А.Г., Корнилов С.А.</b> Моделирование процесса обслуживания вызовов в симуляторе телефонной станции .....	385
<b>Малаханова А.Г.</b> Решение задачи линейного программирования средствами Scilab .....	387
<b>Медведев Д.М., Малаханов А.А.</b> Моделирование вольт-амперных характеристик LDD MOS транзистора при криогенной температуре.....	390
<b>Медведев И.И.</b> Применение Multisim при разработке проектов сайта Профстажировки.РФ .....	394
<b>Микита Г.И.</b> Моделирование электронных систем с применением САПР в учебном процессе для бакалавриатского курса КПЭС .....	397
<b>Микита Г.И.</b> Применение САПР в учебном процессе при конструкторском проектировании электронных средств .....	399
<b>Новик Е.А., Ярославцев М.В.</b> Моделирование потребления энергии тепловозом с гибридным тяговым приводом .....	401
<b>Потапов В.И.</b> Запрещенные фигуры в проектировании конструкций электронных модулей .....	405
<b>Сальников А.С., Боев В.А.</b> Разработка поведенческой модели транзистора на постоянном токе и ее реализация в QUCS .....	408
<b>Серебрянников А.В., Севриков Л.С., Павлов О.П.</b> Учёт изменения частотных характеристик неизменяемой части системы в различных режимах работы устройства при синтезе регуляторов.....	412
<b>Скворцов А.А.</b> Квазианалитическая оценка предельной мощности, передаваемой по лунарному волноводу .....	416
<b>Топчий О.А.</b> Разработка прототипа приемного устройства для системы определения мест повреждений ЛЭП .....	420
<b>Хантимиров Р.Р.</b> Методика анализа целостности сигнала в межсоединениях печатных плат электронных средств .....	426
<b>Цыганков Д.Э., Шайхеева Г.Р., Горбачев И.В.</b> Автоматизация конструктивно-функционального проектирования коаксиальных СВЧ устройств.....	430
<b>Черемухин Д.А.</b> Применение всенаправленной магнитной антенны в подводной связи .....	434
<b>Чертановский А.Г., Захаров В.Г., Дударева Н.Н.</b> Моделирование датчика контроля режимов работы выходных каскадов радиопередающих устройств .....	438

<b>Чумаров С.Г.</b> Влияние шума на оптимальное усиление высокочастотных усилителей .....	442
<b>Шарафиев У.Ф., Сахабутдинов А.Ж.</b> Моделирование двухчастотного сканирования сверхузких резонансных контуров .....	445
<b>Шмойлов А.В., Халеев Р.В.</b> Моделирование процесса настройки цифровых потоков автоматической телефонной станции HiPath 4000 .....	449
<b>Юсупова А.Р.</b> Сравнение помехоподавляющего фильтра верхних и нижних частот с использованием программы NI Multisim.....	452

Научное издание

# **«САПР И МОДЕЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ»**

**IV Международная  
научно-практическая конференция  
(Брянск, 22 – 23 октября 2020 г.)**

**Сборник научных трудов**

**Под общей редакцией А.Ю. Дракина**

Компьютерный набор      О.А. Топчий

*Сборник научных трудов публикуется в авторской редакции*

Темплан 2020 г., п. 48

---

Подписано в печать 24.12.20. Формат 60 x 84 1/16.  
Печ. л. 27,07. Уч.-изд. я. 27,07. Тираж 200 экз.

---

Брянский государственный технический университет  
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7  
Типография «Карат», ул. Ульянова, 34