УДК 621.31

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[[1]](#footnote-1)**

CALCULATION AND SIMULATION OF A PULSE TRANSFORMER WITH LC LOAD

*В работе 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 µ≥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 |

На рис. 1 представлена трехмерная модель трансформатора, выполненная на основе расчетных параметров с выбранным типом сердечника.

 *а б*

*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 U2= 10 кВ, соответствует амплитуде заданной в исходных данных.

-100

-50

0

50

*U*1, В

0

0,05

0,1

0,15

0,2

0,25

0,3

0,35

0,4

-10

-5

0

5

*U*2,кВ

0,05

0,1

0,15

0,2

0,25

0,3

0,35

0,4

*t,*мс

0

*t,*мс

*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

 . (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*ф = 1 нФ, *L*ф = 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

 витка,

где *АL* – индуктивный фактор (коэффициент индуктивности) Гн. Для выбранного типа сердечника *АL* = 60-70 мкГн.

10

0

10

1

10

2

10

3

10

4

*f*, Гц

-60

-40

-20

0

20

40

*A*, дБ

*а*

10

0

10

1

*f*, Гц

-1,5

-1

-0,5

0

*A*, дБ

*б*

*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. – 2-е изд., перераб и доп. \_ Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. ­ 208 с.

2. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов. – 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/ (дата обращения 07.09.2020).

4. Powder core catalog [Электронный ресурс] / Magnetics Inc. – Режим доступа: https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCore Catalog.pdf (дата обращения 07.09.2020).

5. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – 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., Абрамов С. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 8 (189). С. 40-44.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*

1. Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда молодежных стартапов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (приказ №350 общ. от 07.10.2020) [↑](#footnote-ref-1)