

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 шестисосного 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.

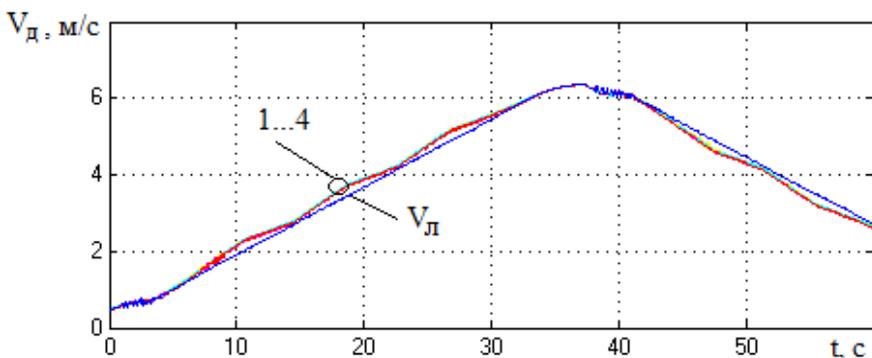


Рис. 1. Скорости роторов асинхронных тяговых двигателей (осей 1...4 соответственно), приведенные к скорости колеса, и скорость локомотива ($V_{л}$)

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.