

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Новосибирск
2024

Всероссийская научная
конференция молодых ученых

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник
научных трудов

Часть 5

г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

**XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых
г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.**

**Сборник научных трудов
в 11-и частях**

Часть 5

НОВОСИБИРСК
2024

УДК 62(063)
ББК 72.5я431
Н34

Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ: XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых (г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.) // Сборник научных трудов в 11 ч. / Под ред. Соколовой Д.О. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024.

ISBN 978-5-7782-5128-1
Часть 5: – 167 с.
ISBN 978-5-7782-5133-5

В сборнике опубликованы материалы научных исследований, представленных на XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых.

В части 1 сборника представлены материалы по направлению «Информатика, автоматика, вычислительная и измерительная техника». В части 2 сборника представлены материалы по направлению «Информационные технологии математического моделирования и обработки данных». В части 3 сборника представлены материалы по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Материаловедение, технологические процессы и аппараты». В части 4 сборника представлены материалы по направлению «Энергетика». В части 5 сборника представлены материалы по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В части 6 сборника представлены материалы по направлению «Электроника и биомедицинская техника». В части 7 сборника представлены материалы по направлению «Экономика и управление». В частях 8 и 9 сборника представлены материалы по направлению «Гуманитарные науки и современность». В части 10 сборника представлены материалы по направлению «Актуальные проблемы авиаракетостроения». В части 11 сборника представлены материалы по направлению «Экология и техносферная безопасность».

УДК 62(063)
ББК 72.5я431

ISBN 978-5-7782-5133-5 (Ч.5)
ISBN 978-5-7782-5128-1

© Коллектив авторов, 2024
© Новосибирский государственный
технический университет, 2024

Секция ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛЕВИТАЦИОННОЙ ПЛАВКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ

М.Н. Андреев

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, andreev.maxim.1998@stud.nstu.ru**

Научный руководитель: Морев А.Э., старший преподаватель

В данной работе рассматривается исследование электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в индукционной установке для левитационной плавки алюминиевой заготовки весом 18,6 грамм. Получены распределения плотности тока в расплаве, магнитной индукции, силы Лоренца и скоростей в расплаве.

This paper deals with the research of electromagnetic and hydrodynamic processes occurring in an induction unit for levitation melting of an aluminum billet weighing 18.6 g. The distributions of current density in the melt, magnetic induction, Lorentz force, and velocities in the melt were obtained.

Существуют разные способы плавки алюминия: плавка в индукционных тигельных и канальных печах, в печах сопротивления, в газовых печах. Все эти виды плавки обладают одним существенным недостатком – загрязнение расплава металла при взаимодействии с тиглем. Решить данную проблему позволяет плавка во взвешенном состоянии. Она позволяет исключить контакт с тиглем, уменьшить количество отходов и повысить эффективность производства.

Во взвешенном состоянии возможно плавить металлы и сплавы в вакууме или атмосфере очищенного гелия, сохраняя чистоту исходных материалов при массовом содержании в них примесей внедрения, не превышающих тысячных долей процента. Отливки, которые получаются при таком методе плавления, обладают высокой однородностью и имеют минимальное отклонение от заданного состава сплава [1-3].

Магнитогиродинамические задачи являются мультифизическими. Их особенность заключается в границе разных областей физики, из-за чего такие задачи часто ограничены программными средствами моделирования из-за достаточно узкой направленности и сложности таких проблем. Магнитогиродинамические процессы – это процессы, происходящие в проводящей жидкости или газе, которые взаимодействуют с магнитным

полем. Для исследования этих процессов требуется синтез и сопряжение методов электромагнетизма и гидродинамики. Связующими элементами являются обратное влияние движения жидкости на собственное магнитное поле, а также силовое и температурное воздействие электромагнитного поля [2-3].

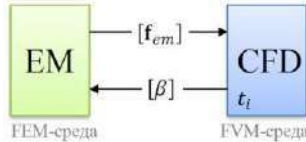


Рис. 1 – Численный подход с обратной связью

Для исследования электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в индукционной системе для левитационной плавки алюминиевой заготовки весом 18,6 грамм, была разработана численная модель в программном комплексе Ansys. Она позволяет рассчитать электромагнитные и гидродинамические параметры установки, такие как: распределение плотности тока, в расплаве, распределение сил Лоренца в расплаве, потребляемая активная мощность, поле скоростей жидкого металла, форма его свободной поверхности [3].

Для исследования этих процессов была рассмотрена индукционная система с индуктором, разделенным на нижнюю часть, обеспечивающую основную левитирующую силу, и верхнюю обмотку, стабилизирующую плавку во взвешенном состоянии.

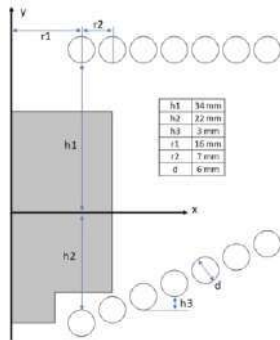


Рис. 2 – Электромагнитная модель с размерами в мм

Для моделирования построили осесимметричную модель, представленную на рисунке 3. Она состоит из обмоток высокочастотного индуктора, объема расплава и воздуха. Электромагнитная модель в Ansys APDL включает расплав, индуктор и воздух, а гидродинамическая модель включает в себя только расплав и воздух вокруг него [3, 4, 6].

На индуктор накладывается действующее значение тока $I = 650$ А с частотой $f = 9650$ Гц. Электромагнитная задача решается методом конечных элементов в $\bar{A} - \phi$ постановке. В качестве граничных условий на внешней границе воздуха приравняем z компоненту векторного магнитного потенциала к нулю.

Гидродинамическая часть задачи была решена методом контрольных объемов в осесимметричной постановке, с использованием многофазной модели *VOF*, которая позволяет предсказывать границу раздела фаз и моделью турбулентности $k - \omega$ SST.

При решении данной МГД задачи с обратной связью был сформирован следующий алгоритм:

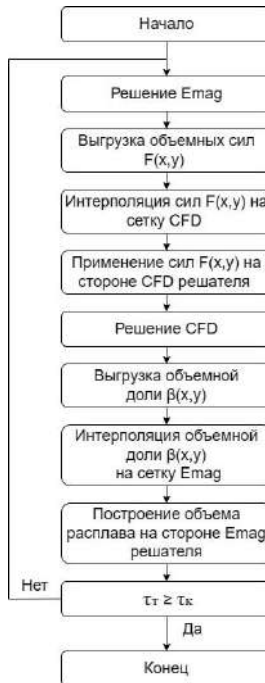


Рис. 3 – Алгоритм решения МГД задачи с обратной связью

В результате решения сопряженной МГД-задачи были получены распределения силы Лоренца и скоростей в расплаве, представленные на рисунках 4 и 5, а также плотности тока в расплаве и магнитной индукции.

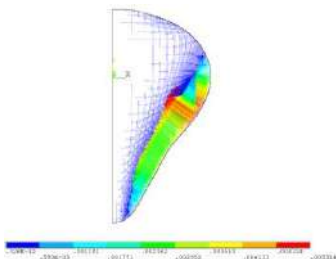


Рис. 4 – Распределение силы Лоренца

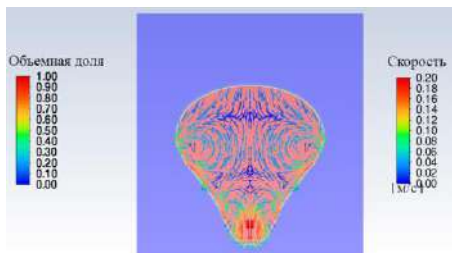


Рис. 5 – Распределение скоростей в расплаве

На рисунке 6 представлено изменение формы свободной поверхности расплава с течением времени.

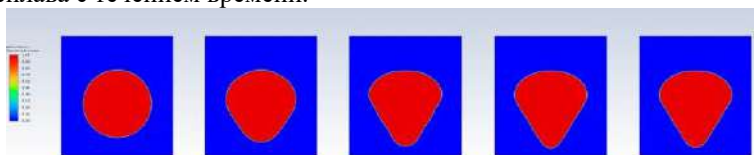


Рис. 6 – Изменение формы свободной поверхности с течением времени

На рисунке 7 отображены результаты аналогичного исследования команды ученых в составе С. Спитанса, Э. Бааке, Б. Наке и А. Яковича.

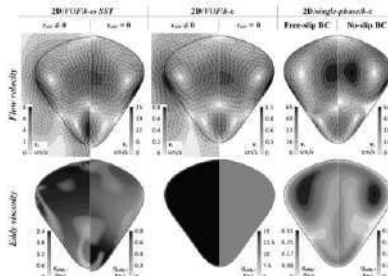


Рис. 7 – Результаты исследования команды Спитанса, Бааке, Наке и Яковича [3-5]

Проанализировав распределения, представленные на рисунках 4 - 8 которые были получены при решении МГД задачи, можно заметить, что форма свободной поверхности, поле скоростей в расплаве, сила Лоренца, поддерживающая расплав в воздухе, хорошо коррелируют с данными, полученными в статье С. Спитанса [3-5].

Литература:

1. *Фогель А. А.* Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / Под ред. А. Н. Шамова — 2-е изд., испр. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989.— 80 с.

2. Численное моделирование процессов магнитной гидродинамики на базе открытого программного обеспечения (OpenFOAM/EOF/Elmer): учеб.-метод. пособие / сост. Н. В. Сизганов, М. Ю. Хацаюк, В. Н. Тимофеев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – 92 с.
3. *Bakhtiyarov S. I., Siginer D. A. Electromagnetic Levitation Part I: Theoretical and Experimental Considerations / FDMP, vol.4, no.2, 2008, P. 99-112*
4. V. Dzelme: Liquid metal electromagnetic levitation. Numerical modelling using Elmer and OpenFOAM. MHD Modelling School 2019 / University of Latvia, Faculty of Physics, Mathematics and Optometry Laboratory for Mathematical Modelling of Environmental and Technological Processes, 2019
5. S. Spitan, E. Baake, B. Nacke, A. Jakovics: Numerical Modeling of Free Surface Dynamics of Melt in an Alternate Electromagnetic Field. Part II: Conventional Electromagnetic Levitation, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 47, 2016
6. Пат. 216594, МПК F27D27/00, Устройство магнитогидродинамического перемешивания жидкого металла в цилиндрической ванне / Алиферов А. И, Андреев М. Н, Морев А. Э; НГТУ – 2022117457; заяв. 28.06.2022; опуб. 14.02.2023. – 6 с.

РАЗРАБОТКА ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НЕСТАНДАРТНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

А.С. Мельников, Ю.С. Быркин, К.А. Рябов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, byrkiny@bk.ru
Научный руководитель: Мельников А.С., ассистент

В статье представлен сравнительный анализ различных конструктивных исполнений плоских индукторов, применяемых в магнитно-импульсной обработке металлов. Целью представленного исследования является формирование улучшения эксплуатационных характеристик индукторных систем за счет неклассического подхода к их проектированию.

The article presents a comparative analysis of various designs of flat inductors used in magnetic pulse metal processing. The purpose of the presented research is to form and improve the operational characteristics of inductor systems due to a non-classical approach to their design.

Условия работы индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов подразумевают наличие целого ряда критических факторов, а именно: термическое воздействие, вызванное протеканием по индуктору кратковременных токов большой амплитуды (10..100 кА) и динамическое нагружение витков индуктора за счет действия силы Ампера [1]. Не редки ситуации, когда в процессе эксплуатации индуктор выходит из строя (рисунок 1) по ряду причин, ключевыми из которых являются разрушение изоляции, вызванное ее перегревом и ударными силами притяжения между витками, а также пластические деформации индуктора, из-за недостаточной жесткости его конструкции.

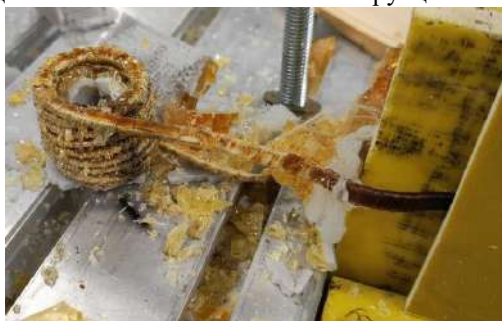


Рис. 1 – Разрушение индуктора вследствие ударной динамической нагрузки

Изоляция для плоских индукторов - это важный компонент, который обеспечивает безопасность и эффективность работы индуктора, также изоляция должна быть прочной и устойчивой к внешним факторам, таким как температурные изменения и механические воздействия. Повреждение изоляции приводит к возникновению межвиткового замыкания в индукторе (рисунок 2), и, как следствие, возникновению электрической дуги и локальному оплавлению индуктора, в отдельных случаях – к прогару витков индуктора.

Для повышения стойкости индукторов рассматриваются неклассические варианты конструктивных исполнений (рисунок 3).

Преимущества предлагаемых конструктивных решений заключаются в том, что представляется возможным использовать в качестве дополнительной межвитковой изоляции прямолинейные вставки из стеклотекстолита, что, в свою очередь, значительно повышает стойкость к межвитковым замыканиям.



Рис. 2 – Повреждения спирального индуктора вследствие межвиткового замыкания

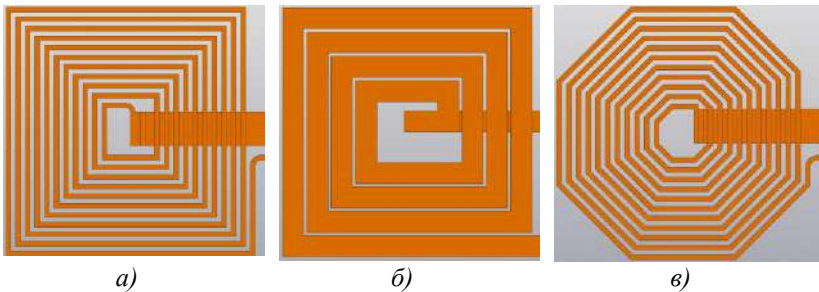


Рис. 3 – Индукторы разной формы: а) квадратный, выполненный из пластин, перпендикулярных заготовке; б) квадратный из пластин, параллельных заготовке; в) октагональный из пластин, перпендикулярных заготовке

На рисунке 4 представлены картины, иллюстрирующие распределение напряженности магнитного поля для исследуемых индукторов.

Считается, что для достижения увеличения микротвердости поверхностного слоя режущей кромки инструмента необходимо применять магнитно-импульсную обработку с напряженностью магнитного поля, превышающей значение $1,8 \cdot 10^5$ А/м [2].

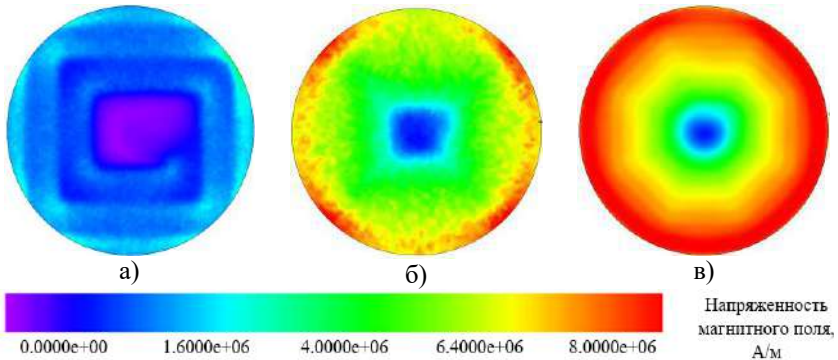


Рис. 4 – Распределение напряженности магнитного поля в детали при использовании индукторов: а) из пластин, параллельных заготовке; б) из пластин, перпендикулярных заготовке; в) октагонального

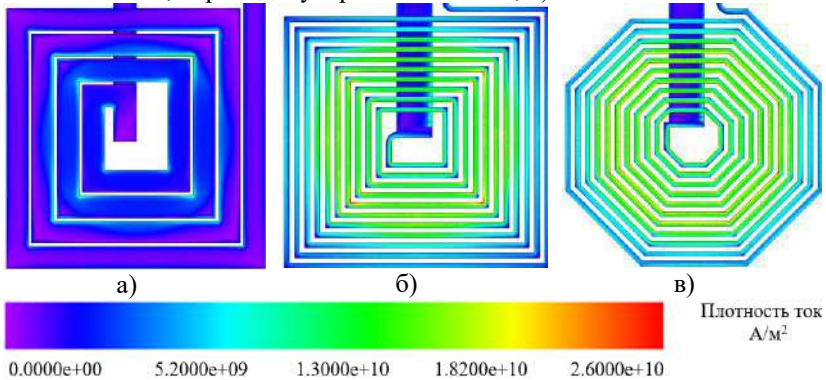


Рис. 5 – Распределение плотности тока в индукторах: а) из пластин, параллельных заготовке; б) из пластин, перпендикулярных заготовке; в) октагонального

При использовании квадратных индукторов имеются потенциально опасные участки – углы, где плотность тока достигает максимума, что может вызвать локальный перегрев в этих областях. В октагональных индукторах наблюдается более оптимальное распределение плотности силы тока.

Октагональный индуктор является наиболее оптимальным в отношении равномерности распределения напряженности магнитного поля в изделии. Этот тип индуктора обладает преимуществом относительно производства по сравнению с плоской спиральной конфигурацией, при этом он также обладает большей жесткостью. Для октагонального индуктора

можно использовать изоляцию из стеклотекстолита, что не только увеличит его жесткость, но также обеспечит надежную изоляцию между витками.

Однако у данной конструкции есть свой недостаток – наличие паяных соединений в углах, подвергающихся высокой тепловой нагрузке. Эти соединения могут стать слабым звеном, поэтому для создания таких индукторов рекомендуется использовать массивные шины толщиной не менее 3 мм. Подобные индукторы также рекомендуется применять в технологических операциях, где интервал между импульсами достаточен для эффективного отвода тепла из индуктора – не менее 30 секунд.

В дальнейшем планируется изготовление опытного образца октагонального индуктора и проведение натуральных испытаний с последующим сравнением его эффективности с классическим индуктором спиральной формы. Одним из направлений будущей оптимизации конструкции является внедрение системы принудительного охлаждения.

Таким образом, октагональный индуктор представляет собой компактное, надежное и эффективное решение для обработки материалов методом магнитно-импульсной обработки.

Литература:

1. *В.А. Глуценков, И.В. Зверев, В.И. Песоцкий.* Основные направления совершенствования индукторов для магнитно-импульсной обработки. Повышение их прочности и ресурса // *Машиностроение и машиноведение.* – 2021. – С. 67–70.

2. A Review on Electromagnetic Forming Process. Dhiraj Gayakwada, Mahesh Kumar Dargara, Pramod Kumar Sharmaa, Rajesh purohitb, R.S.Rana. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (IC-MPC 2014). *Procedia Materials Science* 6 (2014) С.520 – 527.

3. *Самохвалов Ж.В., Самохвалов В.Н.* Магнитно-импульсное прессование электрических соединений многопроволочных проводов // *Электротехника і Електромеханіка.* 2019, вып. №1. С. 51-56.

4. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.

УСТАНОВКИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.О. Васильев¹, А.П. Кислов²

¹Новосибирский государственный технический университет

г. Новосибирск, vasaj@mail.ru

²Торайгыров Университет,

г. Павлодар, Республика Казахстан

Научный руководитель: Алифёров А.И., д.т.н, профессор, НГТУ,

Данная статья рассматривает вопрос компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах, приводится обзор основных методов компенсации реактивной мощности. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого метода, а также их применимость в различных условиях и масштабах, подчеркивается важность энергоэффективности и устойчивого развития в современных электроэнергетических системах.

В заключение, эффективное применение позволяет улучшить работу системы, повысить энергоэффективность и снизить негативное влияние на окружающую среду.

This article deals with the issue of reactive power compensation in electric power systems, and gives an overview of the main methods of reactive power compensation. The advantages and disadvantages of each method and their applicability in different conditions and scales are discussed, emphasizing the importance of energy efficiency and sustainability in modern power systems.

In conclusion, effective application can improve system performance, increase energy efficiency and reduce negative environmental impact.

Компенсация реактивной мощности - не новое понятие в области электроэнергетики, однако в последние годы она стала особенно актуальной в свете растущей потребности в энергосбережении и оптимизации систем электроснабжения. Развитие новых технологий и подходов позволяет решать проблемы, связанные с реактивной мощностью, более эффективно и экономически выгодно.

Одним из новых направлений в компенсации реактивной мощности является применение так называемых активных фильтров [1]. Это устройства, которые способны компенсировать не только реактивную мощность, но и снижать гармонические искажения и улучшать качество электроэнергии. Они обладают возможностью реагировать на изменения в системе мгновенно, что позволяет более эффективно управлять реактивной мощностью и улучшать коэффициент мощности.

Другим новым подходом является использование умных сетей и систем управления, которые позволяют мониторить и контролировать ре-

активную мощность в режиме реального времени. Это позволяет оптимизировать работу системы, а также предотвращать и устранять нежелательные эффекты, связанные с компенсацией реактивной мощности.

Также стоит отметить разработки в области конденсаторных батарей, которые становятся более компактными, энергоэффективными и гибкими в использовании. Это позволяет более эффективно компенсировать реактивную мощность и минимизировать потери энергии.

Новые методы и технологии, а также повышенное внимание к энергоэффективности и устойчивому развитию, делают компенсацию реактивной мощности важным и актуальным направлением в электроэнергетике. Стремительное развитие современных технологий позволяет непрерывно улучшать процессы компенсации, приводя к экономическим и экологическим выгодам.

Установка компенсации реактивной мощности является важной задачей, которая направлена на улучшение электроснабжения и энергетической эффективности системы. Компенсация реактивной мощности позволяет снизить потери энергии, улучшить напряжение в сети и увеличить эффективность работы электрооборудования.

Существует несколько способов установки компенсации реактивной мощности. Один из наиболее распространенных способов - использование автоматических конденсаторов. Автоматические конденсаторы могут быть установлены параллельно с оборудованием или в сети и автоматически регулировать реактивную мощность в зависимости от потребности системы. Они компенсируют индуктивное (реактивное) сопротивление и поддерживают близкое к идеальному значение коэффициента мощности.

Кроме того, для компенсации реактивной мощности может быть использована синхронная компенсация. В этом случае, синхронный компенсатор, такой, как синхронный компенсирующий пусковой двигатель, подключается параллельно к нагрузке и реагирует на изменение реактивной мощности путем изменения своей реактивной составляющей. Этот метод также позволяет достичь высокого уровня компенсации и точности.

Оптимальная установка компенсации реактивной мощности позволит снизить потери энергии в системе, увеличить эффективность работы оборудования, снизить риск перегрузок и улучшить качество электроснабжения.

Компенсация реактивной мощности является важным аспектом энергетической эффективности и оказывает положительное воздействие на работу системы электроснабжения. Применение подходящей технологии

и правильная установка помогут снизить потери энергии, повысить надежность и снизить эксплуатационные расходы.

Ещё одним способом установки компенсации реактивной мощности является использование статических компенсаторов. Статические компенсаторы, такие как статические реактивные компенсаторы (Static Var Compensators, SVC) или статические компенсаторы реактивной мощности (Static Power Factor Compensators, SPC), могут активно регулировать реактивную мощность в системе, обеспечивая стабильное напряжение и компенсацию реактивной мощности.

Еще одним важным аспектом установки компенсации реактивной мощности является правильное размещение компенсационного оборудования. Оно должно быть установлено вблизи нагрузок, которые потребляют реактивную мощность, чтобы минимизировать потери в линиях передачи электроэнергии. Также необходимо учитывать факторы безопасности и требования к подключению.

Кроме того, мониторинг и контроль компенсации реактивной мощности также играют важную роль. Система должна быть оснащена приборами для измерения и контроля показателей компенсации, таких как мощность, напряжение и ток. Это поможет обеспечить эффективную работу компенсационного оборудования и выявлять возможные проблемы своевременно.

Еще один метод компенсации реактивной мощности, который стоит упомянуть, - это использование конденсаторных батарей. Конденсаторные батареи соединяются параллельно с нагрузками и компенсируют реактивную мощность, снижая реактивное сопротивление в цепи и увеличивая её коэффициент мощности. Конденсаторные батареи могут быть установлены непосредственно на объекте или включены в распределительные щиты.

При выборе конденсаторных батарей необходимо учитывать емкость, напряжение, тип соединения (параллельное или последовательное) и другие технические характеристики. Оптимальный размер и количество конденсаторных батарей определяется на основе анализа реактивной мощности нагрузки и требований к коэффициенту мощности.

Еще одним важным аспектом является поддержание оптимального уровня компенсации реактивной мощности. Это достигается за счет автоматической регулировки компенсации на основе мониторинга показателей реактивной мощности. Например, установка регуляторов напряжения и реактивной мощности позволяет поддерживать стабильный коэффициент мощности и минимизировать потери энергии.

Наиболее простым и экономически эффективным способом компенсации реактивной мощности является использование конденсаторов.

Конденсаторы являются пассивной нагрузкой, которая вырабатывает реактивную мощность, противоположную реактивной мощности источников. Подключение конденсаторов параллельно к нагрузкам позволяет компенсировать реактивную мощность в системе и повысить коэффициент мощности.

Преимуществом использования конденсаторов является их относительно низкая стоимость, надежность и простота установки. Кроме того, конденсаторы позволяют снизить потребление активной мощности в системе, что может привести к снижению затрат на электроэнергию.

Однако, при проектировании и установке конденсаторных батарей необходимо учитывать некоторые факторы. Во-первых, определение оптимального размера и емкости конденсаторов требует анализа характеристик системы и расчетов. Во-вторых, необходимо обеспечить правильное соединение конденсаторов с системой, чтобы избежать возможных проблем, таких как резонансные явления.

Кроме использования конденсаторов, также можно применять активные методы компенсации реактивной мощности, такие как использование синхронных компенсаторов или статических компенсаторов. Эти методы позволяют более точно и динамически компенсировать реактивную мощность в системе.

В заключение можно отметить, что компенсация реактивной мощности является важным аспектом в электроэнергетических системах. Реактивная мощность потребляется многими типами нагрузок, такими как электродвигатели, и может привести к нежелательным эффектам, включая потерю энергии и перегрузку сетей.

Компенсация реактивной мощности позволяет улучшить эффективность использования электроэнергии, снизить величину потребления электроэнергии и улучшить надежность работы системы. Применение конденсаторных батарей и других методов компенсации позволяет снизить потери энергии, улучшить фактор мощности и снизить нагрузку на сеть.

Литература:

1. *Лутц Фон Вангенхайм* Активные фильтры и генераторы. Проектирование и схемотехника.- М.: Техносфера, 2010.- 416 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Э.Р. Винтер, М.В. Первухин
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, eduard.vinter@gmail.com

Работа посвящена численному моделированию процесса магнетогидродинамической (МГД) сепарации расплава алюминия в индукционном устройстве канального типа. Представлены результаты расчета эффективности очистки частиц неметаллических включений посредством МГД сепарации. Определено влияние электромагнитной силы и гидродинамических течений на процесс миграции частиц в жидком металле. Проведен расчет распределения концентрации частиц в потоке расплава алюминия с учетом явления коагуляции, обусловленной различными механизмами. Установлено, что явление коагуляции существенно влияет на процесс МГД сепарации частиц неметаллических включений размером 2-20 мкм.

This research focuses on numerical calculation of the process of magnetohydrodynamic (MHD) separation of an aluminum melt in a channel-type induction device. The study presents the calculated efficiency of removal non-metallic inclusions through MHD separation. The investigation examines the impact of electromagnetic forces and hydrodynamic flows on the migration of particles in liquid metal. The distribution of particle concentration within the aluminum melt flow is calculated, considering the phenomenon of coagulation caused by various mechanisms. The study demonstrates that coagulation has a substantial impact on the process of MHD separation for particles ranging from 2 to 20 μm in size.

Результаты численного моделирования

На рисунке 1, а показаны произвольные траектории частиц различного размера. Траектории частиц имеют сложный характер, обусловленный структурой гидродинамических потоков. Характерным поведением многих частиц является их миграция в пристеночную область под действием рециркулирующих потоков расплава, а затем перемещение в вертикальном направлении вдоль поверхности стенки, что обусловлено действием высокой плотности электромагнитных сил в данной области.

На рисунке 1, б приведены зависимости эффективности очистки от относительного размера канала. Распределения концентрации частиц различного размера в канале с расплавом с учетом коагуляции показаны на рисунке 2. Как видно, в процессе МГД сепарации происходит существенное перераспределение концентрации в объеме расплава по сравне-

нию с исходной концентрацией C_0 . В распределении концентрации частиц различного размера для цилиндрического канала с $r_{ch}^* = 1,5$ при воздействии вращающегося ЭМП для всех размеров включений наблюдается их повышенная концентрация в пристеночной области.

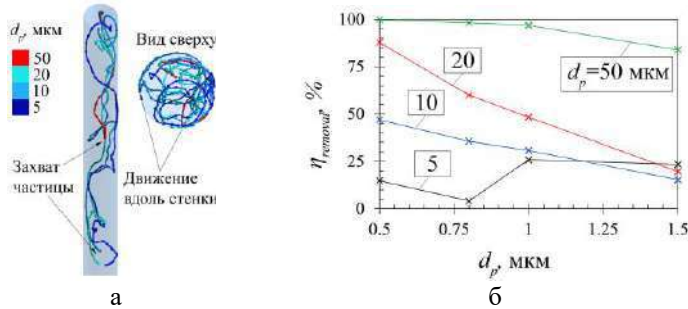


Рис. 1 - Траектория произвольных частиц различного размера в расплаве (а) и Зависимость эффективности очистки от размера канала при воздействии пульсирующим электромагнитным полем (ЭМП) (б)

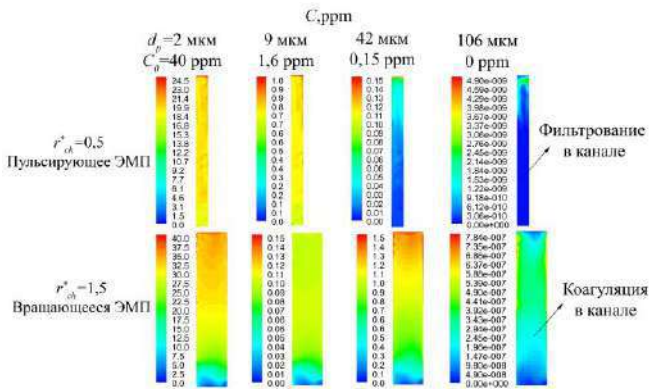


Рис. 2 - Распределение концентрации частиц различного характеристического размера в канале

С целью оценки влияния процесса коагуляции на распределение частиц и их удаление, проведено сравнение результатов расчета, полученных методом Эйлера-Лагранжа и методом размерной группировки. На рисунке 3 изображены расчетные графики эффективности удаления частиц различными методами. Как видно, показания эффективности очистки для частиц 20 и 50 μm , полученные методом Эйлера-Лагранжа, хорошо согласуются с показаниями метода PSG для данного диапазона

частиц. Однако, можно видеть, что результат имеет существенные отличия в значениях эффективности очистки частиц размером в диапазоне 2-20 мкм.

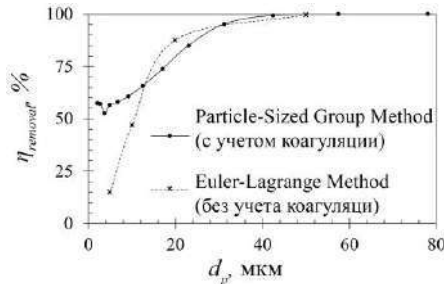


Рис. 3 - Сравнение эффективности очистки для различных размеров включений, полученной методами Эйлера-Лагранжа и PSG

Заключение

Из анализа результатов численного моделирования процесса МГД сепарации было установлено:

1. Основным фактором, определяющим эффективность МГД сепарации частиц неметаллических выталкиваний размером более 5 мкм, является электромагнитная сила выталкивания, в то время как МГД течения расплава не вносят существенного вклада в механизм очистки.

2. Частицы размером более 20 мкм могут эффективно удаляться через механизм МГД сепарации при относительном размере канала $r_{ch}^* < 1$. При этом, частицы данного размера имеют выраженные зоны аккумуляции на стенке канала МГД сепаратора.

3. Явление коагуляции оказывает существенное влияние на процесс удаления частиц с характеристическим размером до 20 мкм. Отсюда следует вывод, что рассмотрение процесса МГД сепарации без учета механизма коагуляции некорректно, если важно учитывать процессы удаления частиц размером менее 20 мкм.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90137.

Литература:

1. Davidson, P.A. An Introduction to Magnetohydrodynamics. – Cambridge: Cambridge university press, 2016. – 431 p.
2. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // Journal of Chemical Physics. – 1954. – P. 683–689.

3. Particle-size-grouping method of inclusion agglomeration and its application to water model experiments / T. Nakaoka, S. Taniguchi, K. Matsumoto S. T. Johansen // ISIJ international. – 2001. – P. 1103-1111.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ САМОСПЕКАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ

В.В. Золотарев, В.А. Сериков

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, zolotoy200896@yandex.ru
Научный руководитель: Алиферов А.И., д.т.н., проф.**

В докладе рассмотрены особенности формирования и факторы, влияющие на эксплуатацию самоспекающихся электродов. Представлены способы автоматизации процесса спекания электрода и направление дальнейшей работ.

The report discusses the features of the formation and factors affecting the operation of Soderberg electrodes. The methods of automation of the electrode sintering process and the direction of further work are presented.

Введение. В настоящее время у ферросплавных заводов существует проблема с формированием самоспекающихся электродов из-за недостаточной научной базы и ограниченного количества каналов, управляющих и контролирующих тепловое поле самоспекающегося электрода. Управление спеканием электродов осуществляется в ручном режиме на основе эмпирических данных и приводит к формированию электродов, качество которых часто не удовлетворяет предъявленным к ним требованиям. Неудовлетворительное качество скокованного рабочего конца электрода приводит к трещинам и обломам и попаданию жидкой электродной массы в рабочее пространство печи.

Для выполнения предъявляемых требований к электроду необходимо:

- чтобы на уровне входа электрода в контактные щели электродная масса поступала в пластичном виде;
- поддерживать зону спекания на уровне прижима контактных щек;
- исключать подвисяние электродной массы;
- поддерживать квазистационарное тепловое поле электрода;
- обеспечить одинаковые значения скорости коксования и расхода электрода.

В печах разного назначения тепловые поля электродов отличаются из-за конструктивных различий, технологических режимов и химических

процессов, протекающих внутри ванны печи. В связи с этим нельзя переносить налаженный режим коксования электрода с одного технологического процесса на другой.

Самоспекающийся электрод состоит из секционного стального кожуха, продольных ребер и самоспекающейся массы, которая по мере прохождения по электроду спекается в графитированный электрод.

Электрод по высоте делится на температурные зоны, изображенные на рисунке 1:

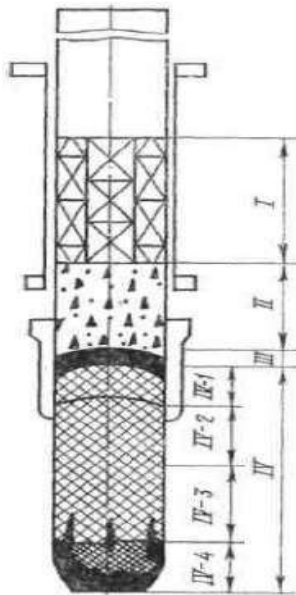


Рис. 1 – Температурные зоны самоспекающегося электрода [1]

- первая зона характеризуется наличием твердой массы, граница определяется началом плавления электродной массы 65-70 °С;
- во второй зоне связующее находится в жидком состоянии и имеет температурные границы 75-350 °С;
- третья зона самая важная зона с температурным интервалом 350-550 °С, в этой зоне жидкая масса коксуется, что сопровождается обильным выделением летучих веществ;
- четвертая зона начинается от температуры 550 °С и продолжается до рабочего торца электрода, в этой зоне происходит обжиг и гравитация электрода [1] .

Анализ публикаций по исследованию режимов работы самоспекающихся электродов показал недостаточность в них информации для разработки рекомендаций по оптимизации режимов работы самоспекающегося электрода, обеспечивающих требуемое температурное поле электрода, и создания автоматизированной системы управления тепловым режимом электрода.

Факторы, влияющие на формирование электрода. Есть много факторов, влияющих на правильное формирование самоспекающегося электрода. Эти факторы можно разделить на две группы: факторы, влияющие на спекание электрода на стадии проектирования печи, и факторы, влияющие на спекание электрода во время эксплуатации печи.

Основные факторы, влияющие на спекание электрода на стадии проектирования печи.

- *Первый фактор* — это конструкция контактных щек. Изменяя длину и ширину щетки, можно влиять на положение изотермы коксования электрода [1, 2].

- *Второй фактор* – толщина кожуха и конструкция ребер электрода. Кожух электрода работает в сложных условиях, подвергаясь тепловым, механическим, а также большим токовым нагрузкам. Наличие ребер в конструкции кожуха снижает градиент температуры и напряженности электрического поля по сечению электрода и электросопротивление электрода на участках неокончательно спеченной массы. Однако ребра способствуют образованию термотрещин в спеченном электроде [4].

- *Третий фактор* – симметрирование температурного поля электрода. Самоспекающиеся электроды трехфазных печей характеризуются неравномерным и несимметричным относительно оси электрода распределением температур по сечению электрода. Асимметрия температурного поля приводит к разным уровням зоны коксования в электроде и соответственно к ухудшению качества электрода.

- *Четвертый фактор* – расход и температура воздуха, подаваемого в мантиль на обдув электрода. Подача воздуха между мантилем и кожухом электрода уменьшает градиент температуры электродной массы выше контактных щек.

Основные факторы, влияющие на спекание электрода в процессе эксплуатации печи.

- *Первый фактор* – величина перепуска электрода. Перепуск электрода напрямую влияет на положение зоны спекания электрода, перепуск определяется величиной расхода электрода.

- *Второй фактор* – уровень расплава в ванне электропечи. Колебания уровня ванны печи приводят к значительному изменению высоты под-

сводового пространства печи и, следовательно, различному влиянию тепловых процессов в подсводовом пространстве на температурное поле в электроде [4].

- *Третий фактор – толщина слоя шихты на поверхности ванны.* Слои шихты или высота откосов шихты на поверхности колошника снижает теплопотери расплава и способствует снижению температуры печных газов под сводом. На теплопотери расплава через слой шихты влияют плотность и толщина слоя шихты [4].

- *Четвертый фактор – плотность тока в электроде* оказывает значительное влияние из-за Джоулева тепла, выделяемого в электроде.

- *Пятый фактор – температура и скорость охлаждающей воды в контактных щелках.* Изменение расхода охлаждающей воды влияет на положение изотермы спекания электрода.

- *Шестой фактор – состав самоспекающейся массы.* Выбор и соотношение компонентов самоспекающейся массы и её предварительная подготовка оказывает существенное влияние на работу электрода.

Автоматизированное управление формированием самоспекающегося электрода. На сегодняшний день на заводах отсутствует автоматизация формирования и поддержания требуемого теплового поля электрода. Для эффективного управления процессом спекания электрода требуется переход от ручного регулирования к автоматизированному управлению.

Заключение. Компания «Электротерм» совместно с Новосибирским государственным техническим университетом (НГТУ) в настоящее время разрабатывает систему автоматизированного управления, которая учитывает дополнительные сигналы обратной связи и управляющие каналы.

Для симметрирования теплового поля в электроде относительно оси электрода в НГТУ разработана методика моделирования и оптимизации вторичных токоподводов.

Также планируется создать рекомендации для конструктивного исполнения узлов, влияющих на спекание электродов при проектировании руднотермических печей.

Литература:

1. *Гасик М. И.* Электроды рудовостановительных электропечей. - М.: Металлургия, 1984. - 248 с

2. *Васильев В. И., Дьяконова Л. А., Рысс М. А.* Влияние на обжиг электрода интенсивности обдувки и состава массы // Электротермия, 1974. - №140. С. 6-8.

3. Струнский Б.М. Руководящие указания по эксплуатации рудно-термических печей. – М.: Metallurgizdat, 1951, - 158 с.

4. Старых Р. В., Выступов С. И., Крупнов Л. В. Особенности формирования и эксплуатации самоспекающихся электродов обеднительных электропечей Надеждинского металлургического завода // Металлург. – 2020. – № 9. – С. 71-76.

ЭЛЕКТРОПЕЧЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНВЕРСИИ ОСАДКОВ МУНИЦИПАЛЬНЫХ СТОКОВ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ВОДОКИСЛОРОДНОМ ФЛЮИДЕ

В.А. Кузнецов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vladikkusnecov@gmail.com**

Научный руководитель: Шишкин А.В., к.т.н., доцент

Существующие методы утилизации осадков сточных вод не позволяют эффективно справиться с этой задачей: биологическая переработка требует поддержания особого теплового режима в течение длительного периода времени, а при сжигании и газификации осадков (при нормальном давлении) образуются опасные соединения: окислы серы и азота, диоксины и парниковые газы. Вода в сверхкритических условиях является активной средой для окисления органических веществ, что позволяет использовать ее свойства для конверсии осадков сточных вод в безопасные продукты и эффективные топлива.

Existing methods of disposal of sewage sludge do not allow to cope with this task effectively: biological processing requires maintaining a special thermal regime for a long period of time, and during combustion and gasification of precipitation (at normal pressure) dangerous compounds are formed: sulfur and nitrogen oxides, dioxins and greenhouse gases. Water under supercritical conditions is an active medium for the oxidation of organic substances, which makes it possible to use its properties to convert sewage sludge into safe products and efficient fuels.

Территория иловых полигонов, используемая для скопления осадков сточных вод, заполнена на 95%, и это оказывает пагубное влияние на окружающую среду. Для решения такой проблемы наиболее широко применяются следующие методы: адсорбция, биологическое окисление, консервация и захоронение в грунте, сжигание и паровоздушное окисление [1].

Реализация биологического окисления осадков канализационных стоков связана с дополнительными затратами, так как этот метод требует создания определенного температурного режима и протекает в течение достаточно длительного времени. Другой метод утилизации – газификация

и сжигание при нормальном давлении – является эффективным способом снижения объема накопленных осадков, однако из-за высокой температуры этих процессов они становятся вредными для окружающей среды. Это связано с выделением полициклических ароматических углеводородов, диоксинов, окислов азота и серы, кроме того, парниковых газов.

В последнее время набирает силу метод утилизации органических веществ и отходов, основанный на использовании воды при сверхкритических параметрах. Научные исследования в этой области показали, что вода в таком состоянии становится активной средой и позволяет произвести частичное окисление органических веществ, в том числе низкокалорийных топлив. Результатом окисления являются более безопасные продукты и более качественные топлива [1].

В лаборатории Института Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе был проведен эксперимент, направленный на исследование конверсии твердых отходов в сверхкритическом водокислородном флюиде. Ниже представлена принципиальная рабочая схема (рисунок 1).

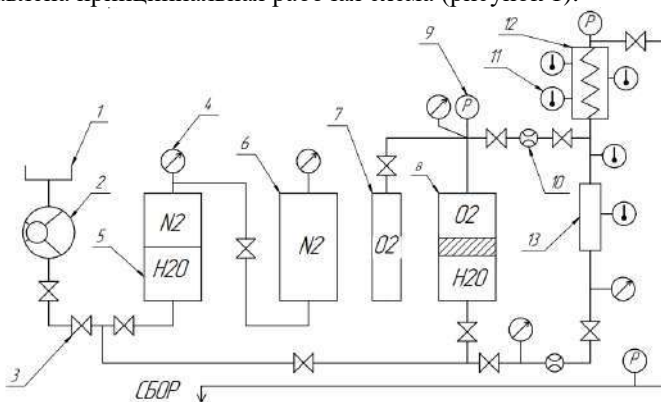


Рис. 1 – Принципиальная рабочая схема: 1 – бак, 2 – насос, 3 – вентиль, 4 – датчик давления, 5,6 – амортизационная система, 7 – баллон с кислородом, 8 – цилиндр с подвижным поршнем, 9 – манометр, 10 – дроссель, 11 – термопара, 12 – электрическая печь, 13 – перегреватель.

Обрабатываемый объект – осадки сточных вод – загружен в реактор, длина которого 815 мм, наружный диаметр – 57 мм, внутренний диаметр – 21 мм. Объект расположен внутри трубчатой электрической печи сопротивления, в которой происходит нагрев излучением. Поступление водокислородного флюида в реактор происходит после прохождения через перегреватель, где он доводится до высокой температуры.

Применяемая электрическая печь сопротивления была спроектирована на основе требований эксперимента. Характеристики установки приведены в таблице 1, эскиз конструкции представлен на рисунке 2.

Таблица 1 – Характеристика применяемой электропечи сопротивления

Параметр	Значение
Максимальная температура нагрева	450°C
Электрическая сеть	3ф x 220В
Установленная мощность	6 кВт

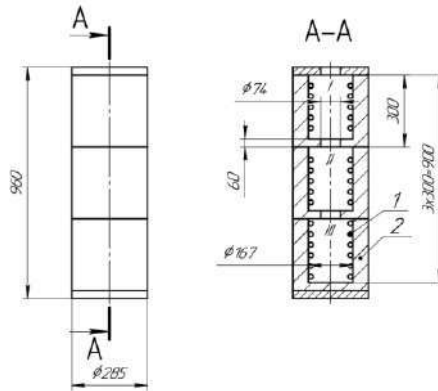


Рис. 2 - Конструкция трубчатой печи сопротивления: 1 – нагреватель, 2 – футеровка; I, II, III – технологические зоны печи

В процессе эксперимента снимались показания датчиков температуры (хромель-алюминиевых термопар) и давления (мембранных тензодатчиков) и вводимой мощности. Описание динамики изменения подводимой мощности и изменения температуры приведено в виде графиков на рисунке 3.

Вывод. Конверсия осадков муниципальных стоков в сверхкритическом водокислородном флюиде дает нам возможность сепарировать исходную загрузку на составляющие (минеральную и органическую), а также получить эффективное и качественное топливо [2]. Для реализации совершенной технологии необходимо решить проблему осаждения солей на стенках реактора и коррозии используемого материала.

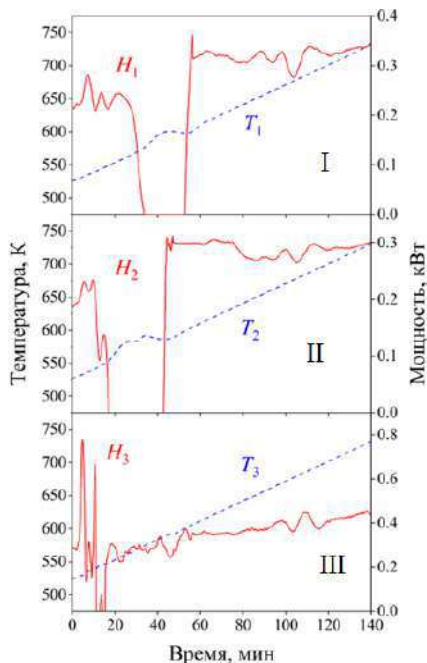


Рис. 3 – Графики температур и подводимой мощности отдельно по технологическим зонам: I – верх, II – центр, III – низ.

Литература:

1. Востриков А.А., Федяева О.Н., Шишкин А.В. и др. Конверсия осадков муниципальных стоков в воде при сверхкритических параметрах // Химия твердого топлива. – 2008. – № 6. – С. 70-80.
2. Федяева О. Н., Востриков А. А. Утилизация токсичных органических веществ в сверхкритической воде // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2012. Т. 7, № 1. С. 64-88. URL: http://scf-tp.ru/articles/2012_01/download/scf-tp_v007_01_2012_pp_64-88.pdf.

ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЖИГА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ

А.А. Мироненко

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, a.mironenko.2019@stud.nstu.ru

Научный руководитель: Алиферов А. И., д.т.н. профессор

В данной работе рассматривается разработка вакуумной электропечи сопротивления для обжига образцов керамики. Обжиг осуществляется при температуре 1800 градусов Цельсия в течение 8 часов.

This paper discusses the development of a vacuum electric resistance furnace for firing ceramic samples. Firing is carried out at a temperature of 1800 degrees Celsius for 8 hours.

Разрабатываемая вакуумная печь сопротивления спроектирована по заказу института ядерной физики СО РАН и предназначена для обжига гексаборида лантана. Гексаборид лантана (LaB₆) - материал, используемый как часть катодного узла электронной пушки в ускорителях электронов. Заготовки гексаборида лантана имеют форму таблетки с размерами: диаметр 10 мм, толщина 2 мм. Проблема состоит в том, что поставляемые таблетки не имеют необходимых однородных свойств. Для того, чтобы они имели нужные свойства необходимо произвести обжиг. Процесс обжига заключается в нагреве материала до 1800°C в вакууме, с дальнейшей его выдержкой при этой температуре в течение 8 часов при высоком вакууме $5 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-6} торр. В процессе нагрева вакуум должен быть не хуже 10^{-4} торр [1]. Минимальная загрузка в печь 100 шт. таблеток. В печи таблетки должны иметь минимальную площадь контакта с поддерживающей подложкой, чтобы материал подложки и материал таблетки не диффундировал между собой. Расстояние между таблетками 2–4 мм.

Для начала нужно определить конструктивную схему и размеры рабочего пространства. Для осуществления равномерного нагрева наиболее подходит цилиндрическое рабочее пространство. Также оптимальное соотношение высоты загрузки к ее диаметру составляет примерно 3:2 [2]. И имея еще условие, что количество таблеток должно быть не меньше 100, был выбран следующий вариант размещения: 6 таблеток по окружности и 17 рядов в высоту. Этот вариант показан на рисунке 1.

В качестве теплоизоляции будут использоваться металлические экраны, так как при откачке воздуха из камеры печи из них будет выделяться очень мало различных газов по сравнению с другими видами футеровки. Экраны будут выполнены из тантала, потому что он способен выдерживать температуру, которая будет в камере печи.

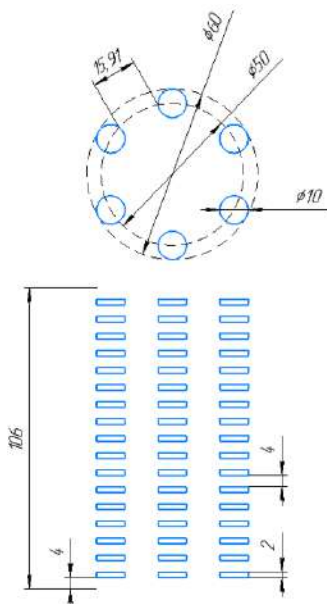


Рис. 1 – Компоновка образцов в печи

Количество используемых экранов будет 7 для боковой стенки, 6 из них выполнены из тантала толщиной 0,2 мм, а один из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Экран из нержавеющей стали будет несущим, и на него будут крепиться танталовые экраны. Расстояние между экранами 5 мм. Применение большего числа экранов не совсем рационально, так как дальнейшее увеличение экранов будет приводить к незначительному уменьшению мощности тепловых потерь [3]. Кроме этого, увеличение количества экранов будет приводить к увеличению стоимости электропечи.

Выполнен тепловой расчет, в котором рассчитаны потери через экраны, аккумулированное тепло и потери через короткие замыкания. Также была рассмотрена упрощенная модель для оценки перепада температуры в таблетке. Перепад получился совсем небольшой – примерно 1,5 градуса. Была рассчитана мощность печи, которая составила около 7 кВт, также был рассчитан КПД печи, который получился очень маленьким всего 0,23%, так как масса нагреваемого изделия очень мала и практически все тепло уходит на нагрев металлоконструкций печи и тепловые потери через экранную изоляцию. Нагревательный элемент выполнен из стержней вольфрама в виде беличьей клетки. Также были рассчитаны параметры нагревательного элемента [4-6].

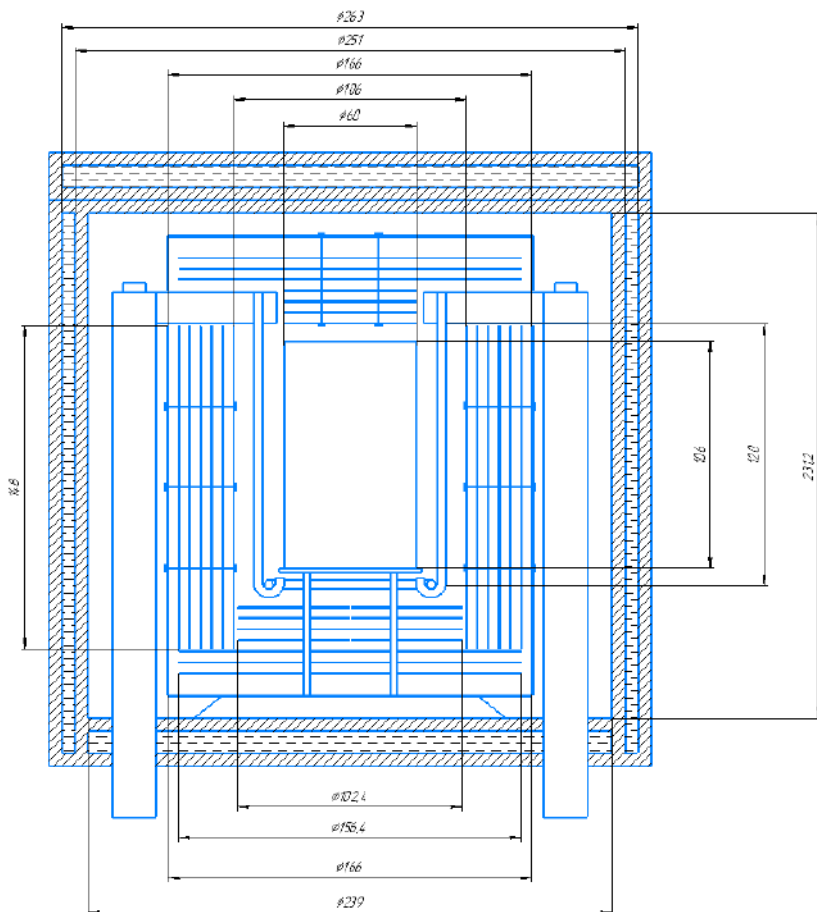


Рис. 2 – Камера печи

Была разработана система автоматического управления, для управления системой питания, системой водяного охлаждения, и вакуумной системой. Определены сигналы в контроллер и из контроллера. Составлена корзина контроллера, написана программа управления и разработан человек-машинный интерфейс.

Разработана лабораторная вакуумная электропечь сопротивления для обжига образцов керамики. Печь по своим характеристикам превышает показатели печи, используемой в настоящее время в ИЯФ СО РАН.

Литература:

1. *Кресанов В. С., Малахов Н. П., Морозов В. В. и др.* Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гексаборида лантана. - Энергоатомиздат, 1987. - 152 с.
2. *Алиферов А. И.* Конструкции электрических печей сопротивления: учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 163 с.
3. *Рубцов В. П., Митяков Ф. Е.* Модификация экранной теплоизоляции в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Вестник МЭИ. № 1. Электротехника электромеханика. – 2011. - С. 36.
4. *Фомин В. М., Слободской А. П.* Вакуумные электрические печи сопротивления с экранной теплоизоляцией. - М.: Энергия, 1970. - 96 с.
5. *Свенчанский А.Д.* Электрические промышленные печи. Ч.1. – М.: Энергия, 1975.
6. *Чередниченко В. С.* Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления: монография / В. С. Чередниченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 624 с.

ОБОБЩЕННАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТЕРЖНЕЙ

Ф.В. Чмиленко, В.Е. Парменов, Чжан Ци, Ю.Ю. Перевалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, parmenov.slava@yandex.ru
Научный руководитель: **Чмиленко Ф.В., д.т.н., профессор**

В статье представлено описание модели, обобщающей параметры индукционного нагрева стальных стержней под ковку на базе нейронных сетей. Целью создания обобщающей модели является предсказание в реальном времени поведения системы индукционного нагрева стальных стержней с лучшей точностью, чем это позволяют получить аналитические методы расчета.

The article describes a model generalizing the steel rods induction heating parameters for forging based on neural networks. The purpose of creating a generalizing model is to predict in real time the steel rods induction heating system behavior with better accuracy than analytical calculation methods allow.

Разработка обобщающей модели на базе нейронных сетей требует создания достаточно большой и достоверной базы данных, на основе которой обобщающая модель может быть обучена. База данных может быть

получена из результатов многочисленных экспериментов, или из результатов расчетов численных моделей. Численные модели более удобный инструмент так как они позволяют получить полное и формализованное в виде набора данных представление о мультифизическом процессе происходящем в системе индукционного нагрева.

Чтобы оценить возможности использования нейронных сетей в теории и практике индукционного нагрева в качестве объекта исследования была выбрана технология нагрева стержней перед ковкой, с нагревом поверхности до 1250°C при конечном теплоперепаде 100°C . В этом случае система индукционного нагрева является достаточно простой и протяженной в пространстве, что позволяет ограничиться одномерной нелинейной электротепловой моделью по радиусу сечения стержня и пренебречь краевыми эффектами, возникающими на торцах.

Для создания базы данных использовалась одномерная электротепловая модель из пакета "Ind Heat", разработанная в ЛЭТИ [1]. Расчеты проводились для стержней с диаметром от 1 до 7 см, с толщиной футеровки от 0,5 до 3 см и с величиной воздушного зазора от 0,5 до 2 см. Диапазон частот для каждого диаметра стержня выбирался по показателю степени поверхностного эффекта m^2 от 2,5 до 5 [2]. Все расчеты проводились в режиме постоянной мощности, поэтому основными результатами расчетов являлись удельная мощность на поверхности и время, требуемое для достижения заданной температуры. Так как нахождение требуемой мощности возможно только итерационными методами, была создана вспомогательная программа, которая управляла расчетной моделью и с помощью метода Ньютона получала требуемую мощность. Таким образом, создание базы данных было полностью автоматизировано.

Помимо основных результатов одномерная модель позволяла получать также интегральные и распределенные параметры. В связи с этим база данных была разделена на две части. В первой части помимо мощности и времени, собирались также электрический, тепловой и полный интегральные КПД и интегральный коэффициент мощности. Во второй части собирались параметры, изменяемые во времени, такие как температура (на поверхности, в центре, средняя), КПД (полный, электрический, тепловой), коэффициент мощности, напряженность электромагнитного поля на поверхности, напряжение одновиткового индуктора. Все расчетные параметры модели являются технологически важными пара-

метрами системы индукционного нагрева стержней, контроль и оптимизация которых напрямую влияет на качество и эффективность технологии индукционного нагрева.

Следующим шагом к построению обобщенной модели был выбор типа нейронной сети. Из всего многообразия [3] была выбрана Байесовская нейронная сеть, так как она устойчива к переобучению. Несмотря на это, для контроля результатов обучения, использовались тестовое и верификационное множества данных.

Для каждого выходного параметра численной модели было принято создать отдельную нейронную сеть. Итого 6 нейронных сетей для интегральных параметров и 9 для распределенных. Обучение нейронных сетей проводилось в среде MatLab [4]. Нейронные сети для интегральных параметров имеют четыре входа: m_2 , диаметр стержня, толщину футеровки и D_1/D_2 (отношение диаметра индуктора к диаметру детали). Использование параметра m_2 вместо частоты позволило значительно снизить количество нейронов в итоговых сетях. Нейронные сети для распределенных параметров имеют пять входов. Первые четыре такие же, пятый – относительное время в процентах от длительности процесса нагрева. Чтобы получить реальные значения следует воспользоваться нейронной сетью для времени и с помощью ее результатов перевести проценты в секунды.

В процессе обучения изменялось количество слоев, количество нейронов и проводился отбор наиболее оптимальных нейронных сетей по максимальной относительной ошибке тренировочного, тестового и верификационного множеств.

В результате отбора было установлено, что для обобщения интегральных параметров наиболее оптимальным является один слой нейронов. При этом оптимальное количество нейронов в слое, дающее минимальную относительную ошибку не более 1,5%, для каждого выходного параметра оказалось разным (таблица 1).

Таблица 1 – Оптимальное количество нейронов в сети

	t, c	$P, кВт$	$\eta_{пол.}$	$\eta_{эл.}$	$\eta_{тепл.}$	$\cos\varphi$
N нейронов	17	10	3	3	2	10

Обученные нейронные сети были формализованы и перенесены в отдельную программу для наглядного представления результатов предсказания параметров (рисунок 1).

Таким образом, созданная обобщенная нейросетевая модель позволяет определять параметры индукционного нагрева стержней в реальном

времени. В отличие от аналитических моделей, обобщенная модель учитывает нелинейности процесса нагрева, вызванные нелинейностью свойств материала стержня от температуры. Она легко может быть встроена в систему управления реальной установкой индукционного нагрева, работающую под управлением микроконтроллера.

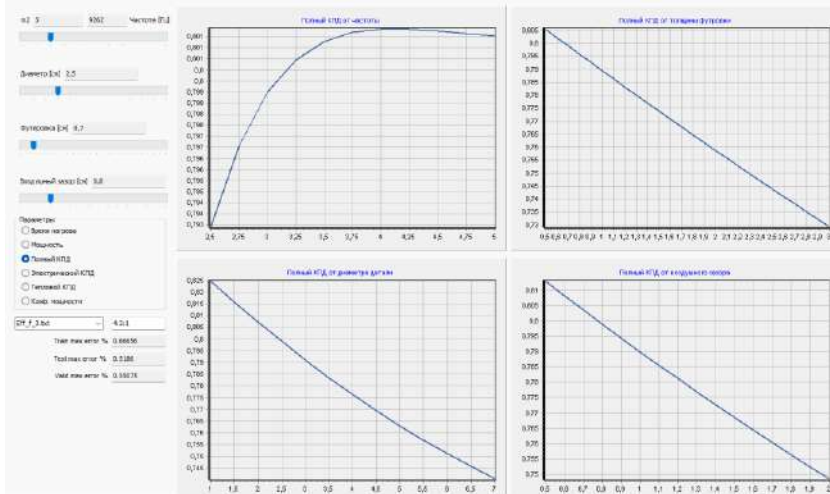


Рис. 1 – Предсказание обобщенной модели о поведении полного КПД системы при изменении входных параметров

На базе подобных обобщенных моделей, «взаимодействующих» друг с другом возможно создание цифрового двойника как отдельного технологического процесса, так технологии индукционного нагрева в целом. Создание обобщенной модели более высокого уровня позволит также настраивать результаты работы данной обобщенной модели для коррекции под конкретную установку.

Подобные обобщенные модели могут применяться в учебном процессе и САПР для автоматизации проектирования типовых изделий.

Литература:

1. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 220 с.
2. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок, Ленинград.: Изд-во Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1974. 280 с.
3. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие/ Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. Казань:Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.

4. Ефименко Г.А., Сеница А.М. Нейронные сети в MatLab [Электронный ресурс] // Digiratory. 2017 г. URL: <https://digiratory.ru/508> (дата обращения: 10.11.2023).

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ОБЖИМА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.С. Мельников, К.А. Рябов, Ю.С. Быркин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, info@etu.ru
Научный руководитель: Мельников А.С., ассистент

В статье рассмотрен перспективный метод создания электрических соединений, основанный на технологии магнитно-импульсной обработки металлов. Представлены результаты исследования, выполненного путем численного моделирования электромагнитных процессов при обжиме кабельного наконечника в различных вариантах индукторных систем, по результатам которого выявлен наиболее оптимальный вариант индукторной системы для последующей реализации.

The article presents a promising method of creating electrical connections based on the magnetic pulse metal processing technology. The results of a study carried out by numerical simulation of electromagnetic processes during cable tip crimping by various designs of inductor systems are presented, the results of which revealed the most optimal design of the inductor system for subsequent implementation.

Совершенствование методов обжима электрических соединений является критическим аспектом для обеспечения надежности, эффективности и производительности. В данной работе рассматривается перспективный метод обжима в импульсном магнитном поле. Этот метод основан на возникновении объемных сил Лоренца в материале заготовки за счет воздействия импульсного магнитного поля индуктора и обладает высокими техническими характеристиками, что позволяет его применять в различных отраслях, включая электроэнергетику, авиацию и др.

Магнитно-импульсная сборка (МИС) оказывает значительное влияние на область сборки электрических соединений, предоставляя несколько важных преимуществ: улучшение электрических характеристик: МИС снижает контактное сопротивление, что уменьшает риск перегрева и обеспечивает надежность соединения [1]; производительность: МИС

уменьшает затраты времени требуемые для получения каждого соединения [2]; усиление неразъемных соединений: МИС создает прочные и плотные электрические соединения [1].

Качество соединения электрических компонентов при МИС зависит от параметров импульса, конструкции индуктора и расположения деталей. В качестве рассматриваемого образца был выбран один из наиболее распространенных типоразмеров наконечника – 25-6-8-М-Т2, выполненный из меди марки М2. Целевой показатель обжима – уменьшение диаметра наконечника на 0,8 мм. Аналитический расчет технологических параметров обжима был произведен по методике, описанной В.А. Глушечковым [3].

При проведении расчетов также учитывались технологические особенности конструкции индуктора и его изготовления, ввиду чего было проведено сравнение индуктора с 6 и 8 витками. Результаты расчета представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты аналитических расчётов

Параметр	Результат
Полная энергия формообразования	66,7 Дж
Напряжённость магнитного поля	$H_{m1} \geq 5,641$ МА/м
Число витков индуктора	6, 8
Сила тока в индукторе 6 витков	18,8 кА
Сила тока в индукторе 8 витков	16,2 кА

Для оценки разработки проведено компьютерное моделирование обжима кабельного наконечника. Рассмотрены два варианта индукторов: классический цилиндрический и цилиндрический с концентратором магнитного поля для сосредоточения действующих сил в определенной области. 3-Д модель кабельного наконечника создана на основании размеров из «ГОСТ 7386-80. Наконечники кабельные медные, закрепляемые опрессовкой». Спроектированные 3D модели индукторных систем представлены на рисунке 1.

Был произведен анализ распределения напряжённости магнитного поля и векторного распределения плотности силы Лоренца в кабельном наконечнике при помощи средств численного моделирования. Результаты анализа представлены на рисунках 2-5.

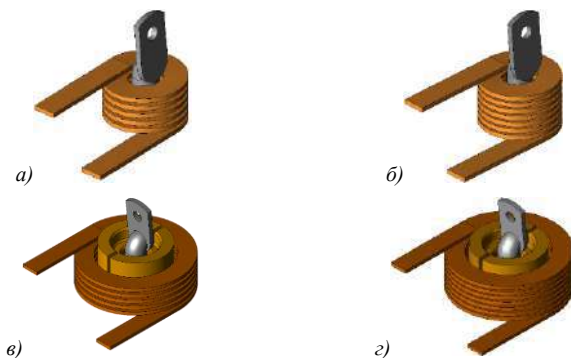


Рис. 1 – 3D модели индукторных систем без концентратора (а, б) и с концентраторами (в, г): 1 – индуктор, 2 – заготовка, 3 – концентратор

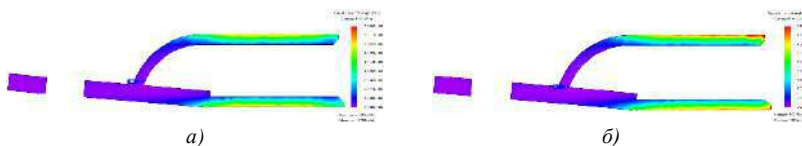


Рис. 2 – картина распределения напряжённости магнитного поля по сечению наконечника: а – с использованием индуктора с 6 витками, б – с использованием индуктора с 8 витками

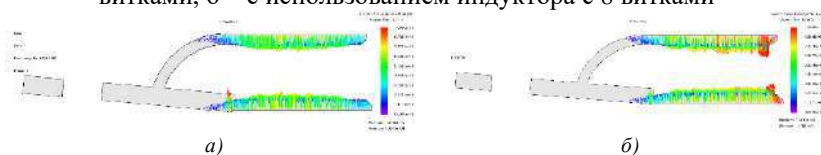


Рис. 3 – векторное распределение плотности силы Лоренца по сечению наконечника: а – с использованием индуктора с 6 витками, б – с использованием индуктора с 8 витками

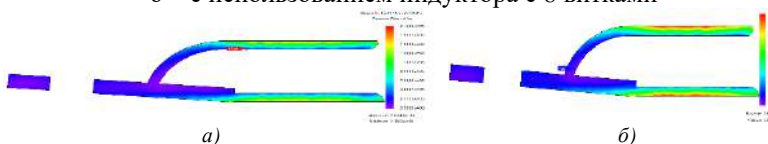


Рис. 4 – картина распределения напряжённости магнитного поля по сечению наконечника с использованием концентратора: а – для индуктора с 6 витками, б – для индуктора с 8 витками

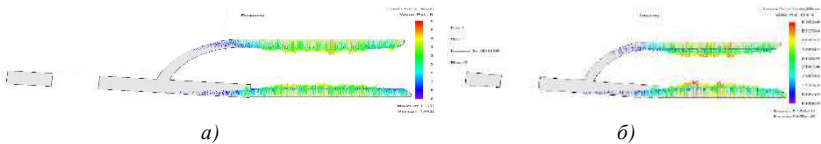


Рис. 5 – векторное распределение плотности силы Лоренца по сечению наконечника с использованием концентратора: а – для индуктора с 6 витками, б – для индуктора с 8 витками.

Общий сравнительный анализ можно свести к следующим суждениям:

- индуктор без концентратора, состоящий из 8 витков, показал себя хуже остальных систем ввиду образовавшегося краевого эффекта на заготовке. Это с большой вероятностью приведет к неравномерному обжиму и повреждению кабеля. Это говорит о нецелесообразности обжима наконечника, углубленного в индуктор;

- в свою очередь, самая равномерная картина распределения магнитного поля наблюдалась в индукторе из 6 витков без концентратора и системе «индуктор-концентратор-заготовка» с индуктором из 8 витков. Равномерное распределение указывает на, соответственно, равномерное воздействие магнитного поля на наконечник;

- наибольшие значения напряжённости магнитного поля на заготовке соответствуют системам без концентраторов, однако поле не сконцентрировано в определенной зоне заготовки;

- системы без концентратора позволяют создавать большие усилия и имеют большую эффективность перед системами с концентраторами, так как во втором случае имеется рассеивание мощности;

- системы с концентраторами являются более перспективными для дальнейшей разработки ввиду преимуществ в конструктивном плане: возможность создания разборной конструкции для случаев, когда кабель имеет большую длину;

- по результатам моделирования система из 8 витков и концентратора является наиболее приемлемой для реализации и изучения;

В качестве следующего этапа развития направления магнитно-импульсной сборки электрических соединений планируется верификация представленных численных моделей путем натуральных экспериментов, а также создание аналогичных индукторных систем для обжима иных типоразмеров кабельных наконечников.

Литература:

1. Самохвалов Ж.В., Самохвалов В.Н. Магнитно-импульсное прессование электрических соединений многопроволочных проводов // Электротехника і Електромеханіка. 2019, вып. №1. С. 51-56.

2. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.

3. Глушечков В.А., Карпунин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2014. – 208 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ОБРАТИМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

И.С. Сафонов, В.Е. Парменов, Н.В. Масленников
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, Yu.a.safonov.2014@inbox.ru
Научный руководитель: Перевалов Ю.Ю., к.т.н., доцент

В работе рассматриваются особенности определения резонансных частот, на которых требуется обеспечить стабильную работу обратимого преобразователя энергии, который входит в состав DC-DC источника питания и выполняет функцию согласования напряжения и гальванической развязки.

The work discusses the features of determining resonant frequencies in order to ensure stable operation of the energy converter, which is part of the DC-DC source, and to ensure the stability of voltage matching and galvanic isolation.

Обратимые преобразователи энергии применяются во многих областях науки и техники, в особенности в системах электротранспорта и зарядных установках, которые позволяют быстро заряжать аккумуляторные батареи [1], которые входят в состав автономного транспорта. Обратимые резонансные преобразователи энергии обладают хорошими массогабаритными показателями, поскольку в составе такого преобразователя со схематехнической точки зрения только одно устройства, а с функциональной точки зрения таких устройств два. На рисунке 1 показана схема DC-DC преобразователя, который входит в состав зарядной станции.

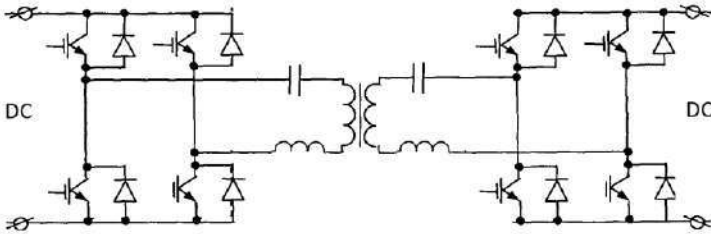


Рис.1 – Резонансный обратимый преобразователь энергии с гальванической развязкой

Данный преобразователь энергии может работать в две стороны и в двух режимах – каждый инвертор, входящий в состав преобразователя, может работать как инвертор, или как выпрямитель [2]. В том случае, если к одной стороне преобразователя энергии подключается аккумуляторная батарея, возможно осуществить частотное регулирование и управлять мощностью на выходе преобразователя путем изменения частоты.

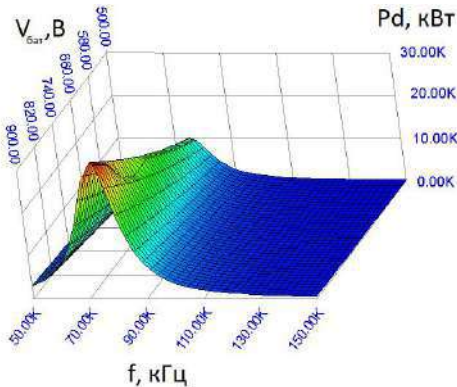


Рис.2 – Частотная регулировочная обратимый преобразователь энергии с гальванической развязкой

На рисунке 2 показана регулировочная характеристика обратимого преобразователя, работающего на аккумуляторную батарею с номинальным диапазоном напряжения 500...900В.

Данный способ регулирования позволяет изменять выходную мощность, путем изменения частоты, а также позволяет снизить коммутационные потери в транзисторах преобразователя путем обеспечения мягкой коммутации и индуктивной расстройки колебательного контура [3].

В дальнейшем планируется расширить возможности регулирования путем добавления внутримостового фазового регулирования для увеличения нагрузочных возможностей данного типа устройств.

Литература:

1. Li B., Lee F. C., Li Q. and Liu Z. Bi-directional on-board charger architecture and control for achieving ultra-high efficiency with wide battery voltage range. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017, P. 3688-3694.
2. Sun L., Ma Y., Wang J., Hao J., Suo X., Li X. Analysis and design of asymmetric CLLC resonant DC-DC converter. Int Trans on Electr Energy Syst. 2020; 30(5): P. 1785-1796.
3. Min J., Ordonez M. Bidirectional Resonant CLLC Charger for Wide Battery Voltage Range: Asymmetric Parameters Methodology. in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, P. 6662-6673.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДИСПЕРСНОЙ ЗАГРУЗКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ

Н.В. Сизганов, М.Ю. Хацаюк
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, kartofanger@yandex.ru

В данной работе рассмотрены методы математического моделирования для анализа процесса индукционного нагрева в промышленных барабанных печах, используя инновационные подходы на основе OpenFOAM и LIGGGHTS. Исследование освещает важные аспекты тепломассообмена и динамики частиц, предлагая новые возможности для улучшения технологических процессов.

This paper discusses mathematical modeling methods for analyzing the induction heating process in industrial drum furnaces, using innovative approaches based on OpenFOAM and LIGGGHTS. The research highlights important aspects of heat and mass transfer and particle dynamics, offering new opportunities for process improvement.

Нагрев дисперсной загрузки в барабанных печах представляет собой важный процесс в рамках промышленного производства, обуславливающий широкий спектр операций по переработке различных материалов. Тем не менее, процесс сталкивается с проблемами, такими как низкая тепловая эффективность и сложности в равномерном распределении материалов, что актуализирует необходимость оптимизации систем нагрева дисперсной загрузки [1].

Основная цель настоящего исследования заключается в разработке модели на основе бесплатного программного обеспечения с открытым

исходным кодом для улучшения процесса проектирования индукционных барабанных печей. В исследовании акцентируется внимание на применении программ OpenFOAM и LIGGGHTS для комплексного анализа и моделирования физических процессов в индукционных печах. Предложенный подход предоставляет возможности для решения существующих проблем и обеспечивает инструменты для инновационного проектирования и оптимизации процессов, что является ключевым для повышения эффективности и качества индукционного нагрева.

Поскольку индукционный нагрев частиц и их поведение в барабане — это процесс многодисциплинарный, то для корректного описания процессов необходим учет различного рода физических аспектов: электромагнетизм, тепломассоперенос, движение дисперсной фазы (сыпучей среды). Усовершенствованы используемые методы сопряжения двух различных типов численного моделирования сеточный (FVM) и безсеточный (DEM).

Уравнения для численного моделирования установки индукционного нагрева дисперсной загрузки применяются в стандартных библиотеках OpenFOAM [2] и LIGGGHTS [3]. Для связи этих библиотек существует следующее решение - CFDEM Coupling [4]. Однако их функционала недостаточно для решения поставленной задачи. Поэтому была разработана библиотека TempTransferFoam для систем инженерного проектирования с открытым исходным кодом (CAE) OpenFOAM, в которой существующий решатель chtMultiRegionSimpleFoam дополнен модифицированным решателем emFoam [5], что позволило осуществить следующие операции: адаптивное перестроения сетки [6] для уточнения решения при высоких частотах; импорт и интерполяцию начальных условий; учет дополнительных условий в уравнениях энергии; экспорт распределения теплового поля в качестве пользовательской настройки граничных условий в LIGGGHTS, через функции обратные библиотеке CFDEM Coupling. Визуально это показано в виде блок-схемы на рисунке 1 а).

Проведен анализ дифференциальных и интегральных характеристик электромагнитных и тепловых полей для различных геометрических и энергетических параметров индукционной установки. Исследованы механика и траектории частиц, влияние формы засыпки на процесс нагрева.

В результате решения электромагнитной задачи, получено распределение векторного потенциала, соответственно векторы напряженности магнитного поля, плотности тока, напряженности электрического поля и магнитной индукции. Была рассчитана эпюра распределения удельной мощности на поверхности барабана относительно витков индуктора на (рисунок 1, б). После решения электромагнитной задачи проведена интерполяция Джоулевой энергии в тепловую задачу (рисунок 2).

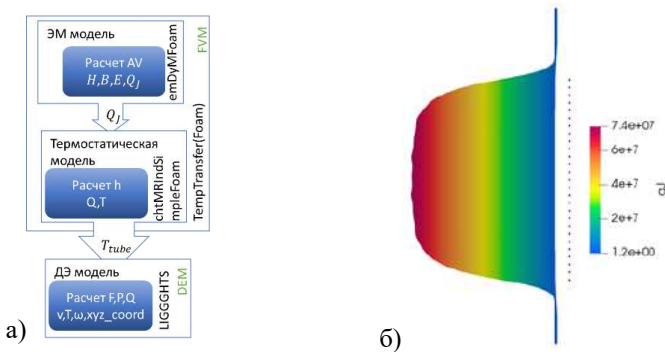


Рис. 1 – а) Блок-схема работы библиотеки; б) Эпюра распределения удельной мощности на поверхности детали относительно витков индуктора

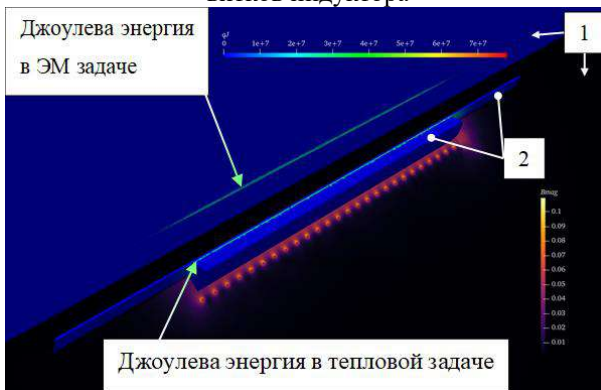


Рис. 2 – Реализация интерполяции из пространства решения ЭМ задачи (1) в тела, в которых решается тепловая задача (2)

Картина температурного поля в прогретом барабане неоднородна, что обусловлено распределением удельной мощности по оси Z. Полученное температурное поле учитывается в задаче дискретных элементов в качестве граничных условий.

В результате решения DEM задачи с учетом тепла были получены распределения тепла в рабочем материале, и траектория частиц материала для различных видов геометрии засыпки.

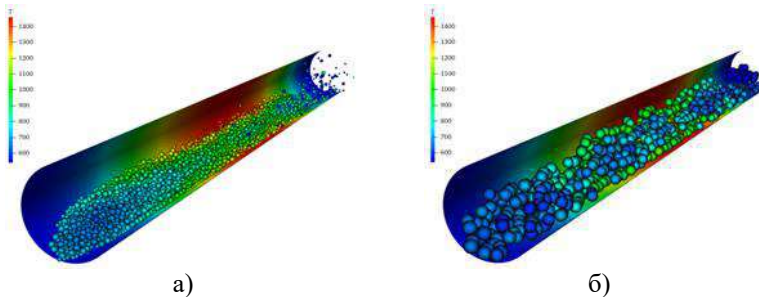


Рис. 3 – Распределение температурного поля в материале

На рисунке 3 а) показано распределение теплового поля при рабочем материале с разной дисперсной фазой от 2 до 5 мм. На рисунке 3 б) показано распределение теплового поля при рабочем материале с произвольной формой в виде двух сферических частиц. В результате анализа данных обнаружено, что время нагрева при осуществлении перемешивания за счет вращения трубы увеличивается при усложнении формы частицы материала загрузки.

В рамках данного исследования при использовании бесплатного программного обеспечения OpenFOAM и LIGGGHTS была разработана новая библиотека для моделирования индукционного нагрева дисперсной загрузки в барабанных печах. Эта библиотека представляет собой значительный шаг вперед в понимании и оптимизации процесса индукционного нагрева, предлагая усовершенствованные методы для анализа и устранения проблем, связанных с тепловой эффективностью и равномерностью распределения материалов. Результаты исследования подчеркивают важность интеграции новых разработок в сфере математического моделирования для улучшения конструкции и функционирования барабанных печей, открывая новые возможности для их применения в различных промышленных областях.

Литература:

1. *Boateng A. A.* Rotary kilns: transport phenomena and transport processes. – Butterworth-Heinemann, 2015.
2. *Van Der Tempel M.* A chtMultiRegionSimpleFoam tutorial //Chamlers University of Technology, Chamlers. – 2012.
3. *Peng Z., Doroodchi E., Moghtaderi B.* Heat transfer modelling in Discrete Element Method (DEM)-based simulations of thermal processes: Theory and model development //Progress in Energy and Combustion Science. – 2020. – Т. 79. – С. 100847.

4. *Zhao J., Shan T.* Coupled CFD–DEM simulation of fluid–particle interaction in geomechanics //Powder technology. – 2013. – Т. 239. – С. 248-258.
5. *Busse C., Bergmann J. P., Hildebrand J.* Numerical modeling of an inductively coupled plasma (ICP) : дис. – Universitätsbibliothek, 2019.
6. *Malik M., Fan E. S. C., Bussmann M.* Adaptive VOF with curvature-based refinement //International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2007. – Т. 55. – №. 7. – С. 693-712.

Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОГО ЛЕНТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ

М.Н. Андреев

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, m.andreev.2019@stud.nstu.ru
Научный руководитель: Новокрещенов О.И.**

В данной работе представлены анализ конструкции магнитного ленточного ускорителя, механический расчёт, расчёт магнитной системы, модернизация магнитного ленточного ускорителя. Методы, используемые в ходе работы: исследование научных публикаций, анализ достижений в области разработки и применения данного типа привода, а также применяемые к ним технические решения; численный метод расчета магнитных полей, реализуемый программой FEMM; механический расчёт.

This paper presents analysis of construction of magnetic belt accelerator, mechanical calculation, magnetic system calculation, modernization of magnetic belt accelerator. Methods used in the course of work: research of scientific publications, analysis of achievements in the field of development and application of this type of drive, as well as technical solutions applied to them; numerical method for calculating magnetic fields, implemented by the FEMM program; mechanical calculation.

При данном способе прокладывания уточной нити через зев, образованный нитями основы, уточная нить прокладывается малогабаритным самозахватным прокладчиком, который в свою очередь перемещается за счет постоянных магнитов, прикрепленных к бесконечному ремню [1-2].

В месте прохождения прокладчика утка через зев, прокладчик отрывается от магнита на некоторое расстояние, но продолжает удерживаться магнитным полем, скользя по направляющей берда станка.

Исходя из технического задания, величина центробежной силы, действующей на прокладчик:

$$F_{ц} = m \frac{2v^2}{D} = 0.06 \cdot \frac{2 \cdot (45 \div 58,31)}{0,36} = 675 \div 1133 \text{ Н}$$

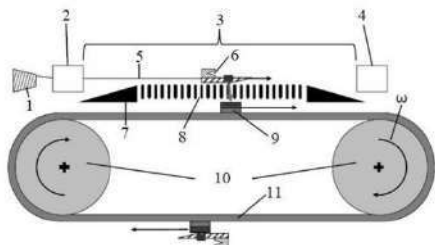


Рис. 1 – Схема магнитного ленточного ускорителя: 1 – бобина, 2 – подача уточной нити, 3 –транспортировка пряжи, 4 – формирователь кромки, 5 – уточная нить, 6 – магнитный прокладчик, 7 – трамплин, 8 – бердо, 9 – магнит, 10 – шкивы бесконечной ленты, 11 – бесконечная лента

Магнитная система, состоящая из магнитов и магнитопровода для концентрации магнитного поля, служит для фиксации прокладчика на ленте. Длина системы 100 мм, ширина 16 мм, высота одной половины 8 мм. В качестве магнита выбран неодимовый магнит N55, а материал магнитопровода – сталь СТ3.

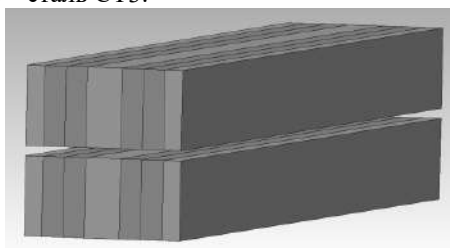


Рис. 2 – Модель магнитной системы

Данная модель была посчитана в программном пакете FEMM [3-4]. По результатам расчёта, сила, действующая на притягивание половин, составляет 1318,03 Н. По результату расчёта сила притяжения половин при проходе прокладчика через бердо составляет 36,4976 Н.

Для того, чтобы уменьшить затраты энергии, но оставить ту же производительность, можно снизить скорость главного привода станка в 2 раза, при этом необходимо поставить второй прокладчик. С меньшей скоростью уменьшатся центробежная сила и потребляемая мощность. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

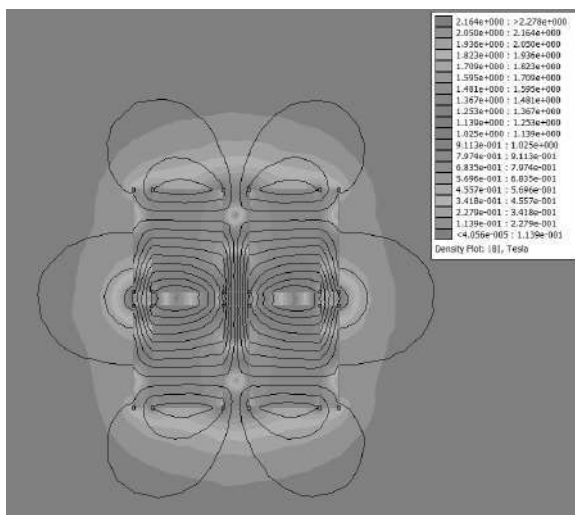


Рис. 3 – Распределение индукции в магнитной системе

Таблица 1 – Результаты сравнения

Кол-во прокладчиков	1	2
Скорость, м/с	45 – 58,31	22,5 – 29,16
Центробежная сила, Н	675 – 1133,342	168,75 – 283,337

В целях безопасности, а также для компенсации центробежной силы можно сделать следующие улучшения конструкции.

Первый вариант – ввести систему из удерживающих роликов для удержания прокладчика [5]. Хотя это может решить проблемы, но появляется несколько других проблем. Первое – это шум. Из-за большого количества роликов возрастёт шум, который может превысить допустимый уровень. Второе – износ роликов, из-за которого возрастут затраты на обслуживание станка.

Второй вариант – обратить конструкцию. Центробежная сила будет полностью компенсирована, т.к. прокладчик будет перемещаться внутри конструкции, он никуда не слетит, что повышает безопасность конструкции, а также данный вариант вносит минимальные изменения в конструкцию.

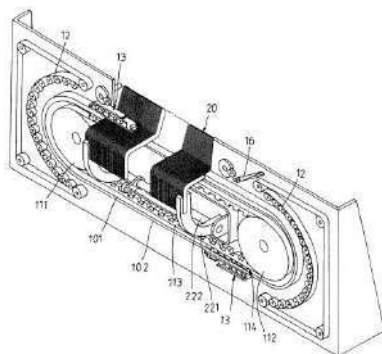


Рис. 4 – Магнитный ленточный ускоритель с системой удерживающих роликов

Чтобы прокладчик мог пробегать изнутри ленты, необходимо добавить вторую пару шкивов, присоединённых через вал к другим шкивам. Также для того, чтобы прокладчик мог захватить нить, необходимо сделать две отдельные ленты с выступами, к которым будет крепиться магнитная система.

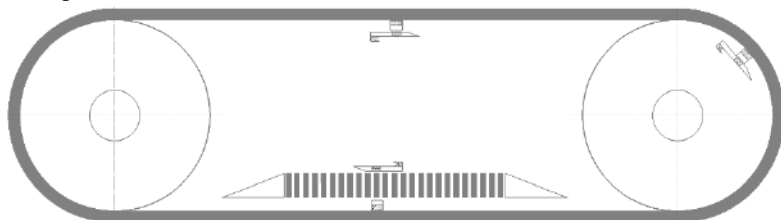


Рис. 5 – Магнитный ленточный ускоритель с обратной конструкцией.
Вид сбоку

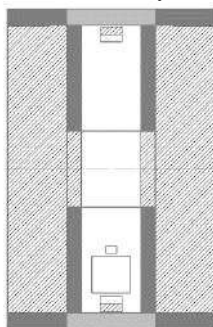


Рис. 6 – Магнитный ленточный ускоритель с обратной конструкцией.
Вид спереди

В ходе работы были выполнены механический расчёт, расчёт магнитной системы в программе FEMM, был предложен новый вариант конструкции магнитного ленточного ускорителя. Новая конструкция позволит компенсировать центростремительную силу, а также сведёт вероятность слёта прокладчика уточной нити к нулю.

Литература:

1. Research & Innovation Excellence Award Finalist – Jan Vincent Jordan. - URL: <https://youtu.be/ZiHBrC7UR3Y> (дата обращения 20.03.2023);

2. MODERN TECHNIQUES OF WEFT INSERTION IN PROJECTILE WEAVING MACHINE – URL: <https://textilestudycenter.com/modern-techniques-weft-insertion-projectile-weaving-machine/> (дата обращения 02.04.2023);

3. Расчет магнитных полей методом конечных элементов в программе FEMM для решения задач электромеханики: учебное пособие / Г.Б. Вяльцев, Д.М. Топорков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018 – 115 с;

4. Моделирование магнитных полей в программе FEMM: учеб.-метод. пособие/А.Г.Приступ, А.В.Червяков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.– 92 с.

5. US4762153A, Weaving loom with magnetic shuttle – URL: <https://patents.google.com/patent/US4762153A/en> (дата обращения 07.04.2023);

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ И ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ГЛАДКОМ НЕМАГНИТНОМ ЗАЗОРЕ

Д.Ю. Бабицкий, Г.О. Гейнрих
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, babiczkij.2013@corp.nstu.ru
Научный руководитель: Шевченко А.Ф., д.т.н., профессор

В настоящей работе проведено исследование образования пульсации момента в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов. Создание момента рассмотрено при взаимодействии гармоник магнитодвижущей силы, создаваемой дробными

зубцовыми обмотками, с гармониками магнитодвижущей силы возбуждения, образованной постоянными магнитами, при гладком немагнитном зазоре.

Current paper presents a study about formation of torque pulsation in electric machines with fractional slot concentrated windings excited by permanent magnets. Torque generation is considered in the interaction of harmonics of the magnetomotive force generated by fractional slot concentrated windings with harmonics of the excitation magnetomotive force generated by permanent magnets at a smooth nonmagnetic gap.

В электрических машинах создание момента, действующего на ротор, согласно закону Ампера можно описать как [1-2]:

$$M = l_{\delta} R^2 \int_0^{2\pi} B_{\delta}(\alpha, t) \times j(\alpha, t) d\alpha \quad (1)$$

где l_{δ} – расчетная длина воздушного зазора, R – средний радиус воздушного зазора, $B_{\delta}(\alpha, t)$ магнитная индукция в воздушном зазоре, изменяющаяся в пространстве и времени, $j(\alpha, t)$ – поверхностная плотность тока, соответствующая пространственному распределению магнитодвижущей силы.

Поверхностную плотность тока можно выразить в виде производной магнитодвижущей силы по угловой координате α :

$$j(\alpha, t) = \frac{dF(\alpha, t)}{Rd\alpha} \quad (2)$$

В свою очередь результирующую магнитодвижущую силу магнитодвижущую необходимо рассматривать как результат взаимодействия магнитодвижущей силы обмотки якоря и магнитодвижущей силы возбуждения от постоянных магнитов:

$$F(\alpha, t) = F_v(\alpha, t) + F_k(\alpha, t) \quad (3)$$

здесь $F_v(\alpha, t)$ – магнитодвижущая сила обмотки, $F_k(\alpha, t)$ – магнитодвижущая сила постоянных магнитов.

Дробные зубцовые обмотки создают бесконечный ряд гармоник магнитодвижущей силы ν [3]. В качестве рабочей выступает одна из высших гармоник, а все другие не являются рабочими и не учувствуют в преобразовании энергии.

Поскольку гармонический состав магнитодвижущей силы возбуждения зависит конструкции магнитной системы ротора, ее кривую в общем виде необходимо представить в виде бесконечного гармонического ряда:

$$F_k(\alpha, t) = \sum_{k=1}^{\infty} F_{km} \cos(kp(\omega_r t - \alpha)) \quad (4)$$

где $k=0,1,2,3\dots$ – номер гармоники МДС, F_{kn} – амплитуда k -й гармоники МДС, p – число пар полюсов ротора, ω_r – частота вращения ротора.

Если принять допущение, что магнитное сопротивление стали равно нулю, то магнитную индукцию можно представить как:

$$B_\delta(\alpha, t) = F(\alpha, t) \times \Lambda_0 \quad (5)$$

где Λ_0 – постоянная эквивалентная магнитная проводимость немагнитного зазора.

На основании проведенного анализа с использованием выражений (1-5) получены условия образования момента для рассматриваемого класса машин.

Первое условие создания момента соответствует созданию основного электромагнитного момента. Однонаправленное преобразование энергии происходит при взаимодействии гармоник магнитодвижущей силы обмотки с гармониками магнитодвижущей силы возбуждения, вращающихся с одинаковой скоростью и имеющих одинаковую полюсность.

Второе условие создания момента имеет место когда, полюсность гармоник магнитодвижущей силы возбуждения совпадает с полюсностью гармоник магнитодвижущей силы обмотки, но их скорость вращения отлична, что приводит к пульсации момента. В таблице 1 для наиболее распространенных дробных зубцовых обмоток с различным числом на полюс и фазу q приведены номера гармоник магнитодвижущей силы обмотки ν и возбуждения $k\rho$, взаимодействие которых приводит к пульсации момента.

Результаты, представленные в таблице 1, показывают, что образование пульсирующего момента происходит при взаимодействии высших гармонических составляющих поля возбуждения с высшими гармоническими составляющими поля якоря.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации про-граммы развития НГТУ, научный проект № С23-15 «Анализ добавочных электромагнитных сил в электрических машинных с дробными зубцовыми обмотками с магнитоэлектрическим возбуждением».

Таблица 1 – Номера гармоник магнитодвижущей силы

$q=1/2$				$q=1/4$			
ν	k	p	kp	ν	k	p	kp
4	4	1	4	10	5	2	10
7	7	1	7	16	8	2	16
10	10	1	10	8	4	2	8
5	5	1	5	14	7	2	14
8	8	1	8	20	10	2	20
$q=3/8$				$q=3/10$			
ν	k	p	kp	ν	k	p	kp
16	4	4	16	10	2	5	10
28	7	4	28	25	5	5	25
40	10	4	40	40	8	5	40
8	2	4	8	20	4	5	20
20	5	4	20	35	7	5	35
32	8	4	32	50	10	5	50
$q=2/5$				$q=2/7$			
ν	k	p	kp	ν	k	p	kp
25	5	5	25	49	7	7	49
55	11	5	55	91	13	7	91
85	17	5	85	133	19	7	133
35	7	5	35	37	35	7	35
65	13	5	65	79	77	7	77
95	19	5	95	121	119	7	119
$q=4/11$				$q=4/13$			
ν	k	p	kp	ν	k	p	kp
55	5	11	55	91	7	13	91
121	11	11	121	169	13	13	169
187	17	11	187	247	19	13	247
77	7	11	77	65	5	13	65
143	13	11	143	143	11	13	143
209	19	11	209	221	17	13	221

Литература:

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. // Л., Энергия, – 1974. – 840 с.
2. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

3. Шевченко А.Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / НГТУ. – Новосибирск, 1999.

АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ «СКИН-ЭФФЕКТ» ПРИ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Р.Г. Галеев

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, galeew.ratmie@yandex.ru
Научный руководитель: Манусов В.З., д.т.н., профессор

Применение высокотемпературных сверхпроводящих проводников (ВТСП) имеет большую перспективу в электрических машинах, работающих на повышенной частоте электрического тока. ВТСП является идеальным диамагнетиком, в совокупности с высокой электропроводностью, что позволяет исключить отрицательное влияние скин-эффекта, который интенсивнее проявляется при повышении частоты. Значимость данного исследования заключается в повышении КПД трансформаторного электрооборудования и увеличение удельной мощности на единицу веса.

The use of high-temperature superconducting conductors (HTS) has great prospects in electric machines operating at an increased frequency of electric current. HTSP is an ideal diamagnet, combined with high electrical conductivity, which eliminates the negative effect of the skin effect, which is more intense when the frequency increases. The significance of this study is to increase the efficiency of transformer electrical equipment and increase the specific power per unit weight.

При промышленной частоте 50 и 60 Гц, используемой во всем мире, сопротивление скин-эффекту незначительно и обычно не учитывается. Эффект вытеснения возникает вследствие магнитного потока во внутреннем пространстве проводника, созданным действующим током в проводе. Ток, индуцируемый внутренним магнитным потоком, ближе к центру провода имеет противоположное направлению действующему току I и попутное направление по внешней контуру проводника. Скин-эффект приводит к экспоненциальному уменьшению плотности тока с глубиной.

Электромагнитная поверхностная глубина δ , на которой плотность тока составляет $1/e$ (≈ 37 %) от его поверхностной плотности, определяется уравнением.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma f \mu}} \quad (1)$$

где σ – проводимость проводника; μ – проницаемость проводника.

От поверхности к оси провода плотность тока J уменьшается по экспоненциальной зависимости.

$$J_z = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (2)$$

где J_0 – плотность тока на поверхности; z – глубина производимого расчета;

Из (1) и (2) следует, что чем ближе к оси проводника, тем меньше плотность тока тем самым значительная площадь сечения провода не задействована в передаче электроэнергии. Как представлено на рис. 1.

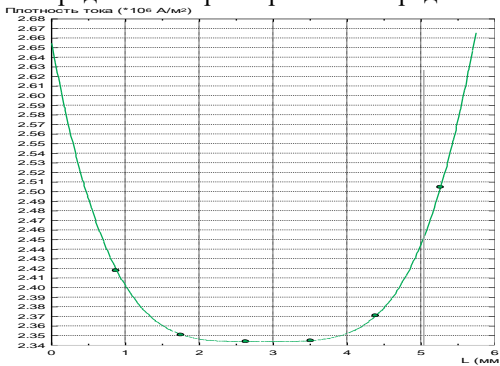


Рис. 1 - Графическое отображение плотности тока по сечению проводника

Из анализа следует, что при проектировании сверхпроводящего трансформатора на повышенной частоте необходимо принимать во внимание скин-эффект. В программной среде Elcut профессиональной версии 6.6 методом конечных элементов произведено моделирование вытеснения тока к поверхности для медного проводника диаметром 5,7 мм и плотностью тока 2,4 А/мм² при частоте переменного тока: 200, 400 и 800 Гц. На рис. 2 представлена цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника. В поперечном сечении медного провода площадью 25,5 мм² с шагом дискретизации 0,05 мм получена сетка конечных элементов с 1306 узлами, что в полной мере отображает картину на которой видно, что при частоте 400 Гц и выше более явно проявляется скин-эффект. Медь по магнитным свойствам относится к диамагнетикам, но её магнитная проницаемость больше нуля $\mu = 0,999990$. Это приводит к проникновению магнитного поля вглубь

проводника и образованию магнитной индукции определенной напряженностью, что ведет к образованию вихревых токов. Их повышение, в свою очередь, влечет за собой к более интенсивному вытеснению тока к поверхности проводника. В связи с этим возрастает выделение тепла и падение напряжения.

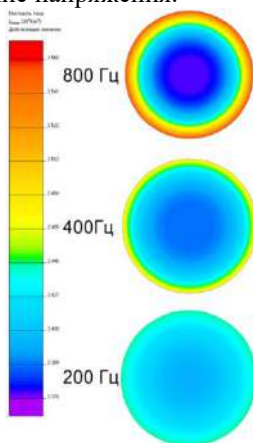


Рис. 2 – Цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника при повышении частоты.

Сверхпроводники являются абсолютными диамагнетиками, магнитная проницаемость которых равна нулю при этом происходит полное вытеснение магнитного поля из объема проводника в сверхпроводящем состоянии. Отсутствие магнитного потока внутри проводника, созданного током протекающим в проводе, исключает создание вихревого электрического поля, которое направлено против движения электрического тока внутри провода. Поток магнитной индукции для медного проводника и ВТСП показан на рис. 3.

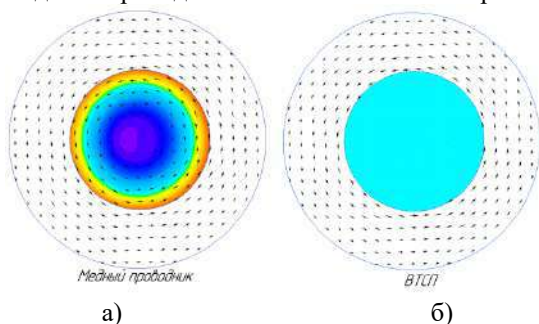


Рис. 3 – Проникновения магнитного потока в глубь проводника при 800 Гц: а) Медного проводника; б) ВТСП.

В сверхпроводнике электроны формируют пары, называемые куперовскими парами, которые образуют сверхпроводящее состояние. Они обладают нулевым спином и могут передвигаться без взаимодействия с кристаллической решеткой, вызывая нулевое сопротивление в материале. Эта подтверждается эффектом вытеснения внешнего магнитного поля из тела сверхпроводника за счет внутреннего вихревого тока (эффект Мейснера) в сверхпроводниках.

ВТСП проводники обладают нулевым сопротивлением при температуре 77 К, следовательно выражение (1) трудно применимо.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что применение высокотемпературных сверхпроводников в состоянии сверхпроводимости исключает явление скин-эффекта, что в свою очередь позволяет неограниченно повышать частоту электрического тока в перспективе 1000 и более Гц. Это приведет к значительному уменьшению массогабаритных характеристик генерирующего и преобразующего оборудования системы электроснабжения и увеличению энергоемкости и следовательно к увеличению КПД.

Литература:

1. Malcolm S. R. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies // Article in Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved).– 2015/– vol.60.– pp.51–69.
2. Pein A. Skin effect, proximity effect and the resistance of circular and rectangular conductors. 2022. 41 p.
3. Corcoran J. Nagy P. B. Compensation of the Skin Effect in Low-Frequency Potential Drop Measurements // Journal of Nondestructive Evaluation.– 2016.– vol. 35.– no. 4.– doi: 10.1007/s10921-016-0374-4.
4. Ibrahim M., Pillay P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops// IEEE Transactions on Industry Applications.– 2013– vol. 49– no. 5.– p.p. 2061-2068.– doi: 10.1109/TIA.2013.2260852.

К ВЫБОРУ СФЕР ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С БЕСПАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ СТАТОРА

Г.О. Гейнрих, Д.Ю. Бабицкий

**Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, germangenrich@gmail.com**

Научный руководитель: Шевченко А.Ф., д.т.н., профессор

В данной работе предлагается сравнить беспазовые электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов с аналогами с пазовой конструкцией для определения рациональности их выбора в различных применениях.

In this paper, it is proposed to compare groove-less electric machines with permanent magnet excitation with their slot-type analogs to determine the rationality of their selection in various applications.

Перспективность развития направления беспазовых электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов (в дальнейшем БЭМПМ) была обоснована ранее [1,2]. Но синхронные машины с постоянными магнитами на роторе и статором без зубцовой зоны обладают рядом специфических особенностей, присущих только этому классу машин, которые в некоторых сферах применения могут служить как достоинствами, так и в иных – недостатками.

Таким образом, для понимания рациональности тех или иных применений БЭМПМ было проведено детальное сравнение с аналогичным СДПМ пазовой конструкции (ПЭМПМ).

Для этого сделано построение моделей обеих конструкций двигателей (рис.1), причём все линейные размеры моделей беспазовой и пазовой конструкции соответствуют реальному пазовому двигателю, разработанному кафедрой Электромеханики Новосибирского Государственного Технического Университета для электромеханического усилителя рулевого управления (ЭМУР) легкового автомобиля.

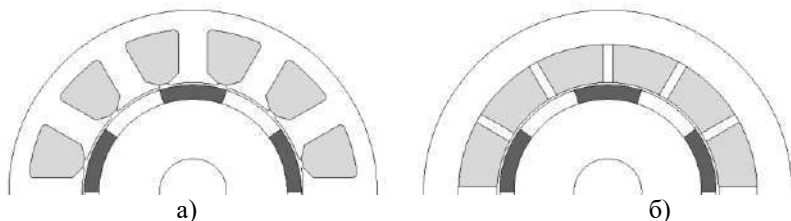


Рис. 1. – Эскизы моделей электродвигателя: а) пазовая конструкция б) беспазовая конструкция

Таблица 1 - Параметры моделей

Параметр	Обозначение	Значение
Марка стали	-	2421
Марка магнитов	-	N35UH
Внешний диаметр листа статора	D_a	76,5
Внешний диаметр корпуса	D_k	80 мм
Длина корпуса	l_k	81 мм
Диаметр расточки	D	46 мм
Длина сердечника	l	55 мм
Число пар полюсов	p	5
Число пазов на полюс и фазу	q	2/5

Стоит оговориться, что максимальная мощность электродвигателей определяется их тепловым состоянием, которое зависит от уровня потерь. Задаваясь уровнем предельных потерь 37 Вт, который был определён по допустимой величине удельных потерь на единицу площади наружной поверхности 0,12 Вт/см² для электродвигателей с диаметром 80 мм [3]. В расчёт будут взяты только электрические потери в обмотках и в стали магнитопровода.

Первое сравнение производится для режима короткого замыкания. В таком режиме потери в магнитопроводе пренебрежимо малы, основную часть потерь будут составлять электрические потери. Их величина может говорить о максимально допустимом уровне тока, по которому можно определить максимально развиваемый момент электродвигателя. Результаты сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметр	БЭМПМ	ПЭМПМ
Момент, Н·м	0,75	2,98

Результаты моделирования показывают, что двигатель с пазовой конструкцией значительно превосходит беспазовый двигатель по величине момента в режиме короткого замыкания. Это объясняется

большей величиной воздушного зазора и, следовательно, меньшей величиной основного магнитного потока в беспазовом двигателе.

Однако, известно, что ПЭМПМ выполняются, как правило, многополосными, что, в свою очередь, требует высокой частоты питающего напряжения. Следовательно, расчёт потерь в магнитопроводе для разных частот вращения двигателя может несколько изменить результаты сравнения.

Второе моделирование было произведено для разных частот вращения при прежнем уровне суммарных потерь 37 Вт. Фиксировались величины развиваемого момента и полезной мощности электродвигателей. Полученные зависимости представлены на рис.2 и рис.3.

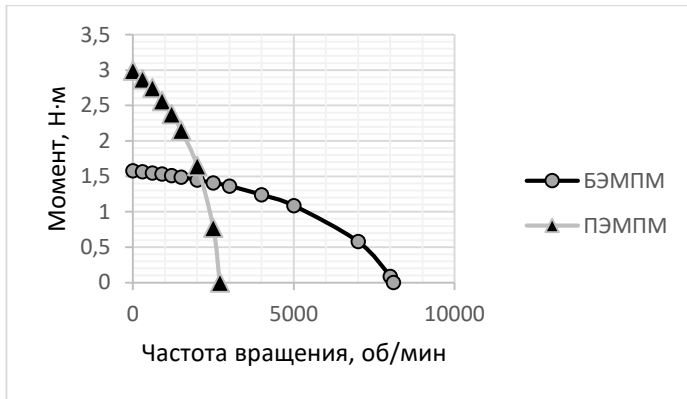


Рис. 2. – Зависимость развиваемого крутящего момента от частоты вращения

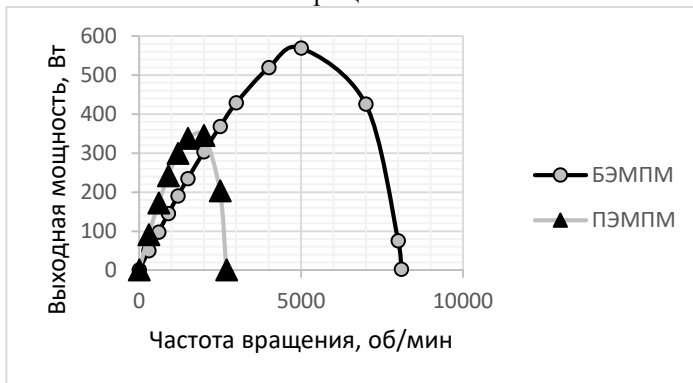


Рис. 3. – Зависимость полезной мощности от частоты вращения

Подводя итог под результатами сравнения, можно утверждать, что при поддержании одинакового теплового состояния выходной момент беспазовой электрической машины может быть сопоставим с моментом пазового аналога, особенно на высоких частотах вращения. Преимущества БЭМПМ в большей мере раскрываются именно на высоких частотах вращения, поэтому они могут применяться, например, в беспилотных летательных системах, роботах, автомобилестроении и так далее. Перспективно применение беспазовых машин в различных прецизионных приводах, так как они имеют чрезвычайно низкий уровень пульсации момента [4].

Помимо прочего, стоит отметить, что, приведённые выше сравнения, производились для электродвигателей с одинаковой конструкцией магнитной системы ротора. Для БЭМПМ возможно значительное увеличение объёма постоянных магнитов, а также применение “сборки Халбаха”, которая оправдана при значительной толщине магнитов. В то время увеличение массы магнитов в пазовой конструкции возможно в, весьма, ограниченных пределах из-за насыщения магнитной цепи. Таким образом, при определённых конструктивных решениях, мощность БЭМПМ может быть сопоставима с мощностью ПЭМПМ и на малых скоростях вращения в одних и тех же габаритах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации про-граммы развития НГТУ, научный проект № С23-15 «Анализ добавочных электромагнитных сил в электрических машинных с дробными зубцовыми обмотками с магнитоэлектрическим возбуждением».

Литература:

1. Афанасьев А.А., Нгуен Конг Там. Беспазовый магнито-электрический вентильный двигатель с комбинированным про-водом. — Вестник Чувашского университета, 2016, № 3, с. 5—12.2)
2. Гейнрих, Г. О. Анализ особенностей беспазовых электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов / Г. О. Гейнрих, А. Ф. Шевченко // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 года. Том Часть 5. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. – С. 12-16. – EDN OVN VZX.
3. Каасик П.Ю., Несговорова Е.Д, Борисов А.П. Расчёт управляемых короткоза-мкнутых микродвигателей. Ленинград, «Энергия», 1972, 170 с.
4. Pristup A. G. A study of cogging torque in permanent magnet synchronous machines with fractional slot windings / A. G. Pristup, D. M. Toporkov, A. F. Shevchenko // Russian Electrical Engineering. - 2014. - Vol. 85, iss. 12. - P. 743-747.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О.А. Жилин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, oleg.zhilin.1998@mail.ru

Научный руководитель: Приступ А.Г., к.т.н., доцент

В данной работе приведены преимущества и недостатки асинхронных тяговых электродвигателей. Описаны основные особенности конструкции тягового асинхронного электродвигателя по сравнению с конструкцией общепромышленного производства. Выявлены основные направления совершенствования методов разработки асинхронного тягового электродвигателя.

This paper presents the advantages and disadvantages of traction asynchronous motors. The main features of the design of a traction asynchronous electric motor in comparison with the design of a general industrial production are described. The main directions of improvement of methods of design of traction asynchronous electric motor are revealed.

Сегодня асинхронные электродвигатели широко используются в тяговом приводе электротранспортных средств, поскольку обладают простой конструкцией и низкой стоимостью, имеют высокие показатели коэффициента полезного действия, могут обеспечивать постоянство выдаваемой мощности в широком диапазоне скоростей вращения, надежны, удобны в техническом обслуживании и способны работать в тяжелых условиях. Но, как и любая другая машина, асинхронный тяговый электродвигатель имеет и ряд недостатков: сложность управления при работе на низкой скорости; низкий коэффициент мощности в условиях небольшой нагрузки; небольшой воздушный зазор между статором и ротором, увеличение которого приводит к повышению массы и увеличению размеров машины; выделение потерь в роторе электродвигателя [1].

Так как тяговый асинхронный электродвигатель работает от преобразователя частоты в составе привода транспортных средств, его конструкция принципиально отличается от двигателей общепромышленного производства. Основные особенности конструкции асинхронных тяговых электродвигателей могут быть сведены к следующему:

– Из-за плавного пуска двигателя за счет изменения напряжения и частоты питания пазы ротора выполняют неглубокими;

- При глубоких диапазонах регулирования частоты вращения электродвигатели снабжают принудительной вентиляцией;
- Отсутствует необходимость разработки электродвигателей с повышенным скольжением, что увеличивает их КПД;
- Имеется возможность оптимального выбора числа пар полюсов на этапе проектирования машины;
- Необходима более качественная изоляция обмоток ввиду перенапряжений вследствие особенностей работы преобразователей;
- При мощности свыше 100 кВт необходимо применять изолированные подшипники;
- Электропривод, содержащий асинхронный электродвигатель и преобразователь частоты, должен разрабатываться для конкретного технологического агрегата. Особенно это важно для случаев реализации сложных графиков движения [2, 3].

Разработка новых асинхронных тяговых электродвигателей проходит на основе предельно высоких технико-экономических требований. Принципы проектирования с учетом специфики применения пока не устоялись [4]. Поэтому решение задач совершенствования и оптимизации конструкции асинхронных тяговых электродвигателей на современном, довольно высоком уровне их развития требует новых углубленных методов расчета и исследования.

Целью данного исследования было выявление основных на сегодняшний день направлений совершенствования методов разработки асинхронного тягового электродвигателя.

Анализируя научно-техническую литературу по вопросу поставленной цели, можно выделить ряд основных направлений:

- Повышение удельной мощности асинхронного тягового электродвигателя. Ряд исследований [5, 6] направлен на повышение удельной мощности электрической машины за счет уменьшения числа витков обмотки статора. Это изменение снижает индуктивное сопротивление обмотки, благодаря чему в области высокой частоты вращения электродвигателя достигается больший крутящий момент. При этом из-за увеличения мощности электродвигателя необходимо увеличивать поперечное сечение проводников для того, чтобы потери в обмотке оставались на том же уровне. Есть исследования, где повышение удельной мощности достигается за счет увеличения скорости вращения электрической машины, при этом снижается масса и габариты машины [7].
- Оптимизация геометрии электрической машины с целью повышения энергоэффективности. Это направление можно разбить на две категории. К первой можно отнести исследования [8, 9], где

рассматривается вопрос оптимизации геометрии конструкции с точки зрения снижения собственных потерь электрической машины и повышения ее КПД. Ко второй категории относятся исследования [10], в которых рассматривается влияние изменения геометрии машины на возникающие дополнительные потери при работе от преобразователя частоты. При этом сам расчет дополнительных потерь проводится либо методами численного моделирования, что является ресурсозатратным в части вычислительной мощности. Либо расчет ведется упрощенно с помощью Т-образной схемы замещения тягового электродвигателя, в результате становится затруднительно учитывать насыщение магнитной цепи, эффекты вытеснения тока и эффект близости проводников.

– Повышение точности расчета тяговых и тормозных характеристик асинхронного тягового электродвигателя. В основной доле исследований, в которых рассчитывают тяговые характеристики электродвигателя, закладываются допущения, которые не в должной мере учитывают эффекты, возникающие в области постоянства крутящего момента или области ослабления поля электродвигателя. Вопрос расчета тормозных характеристик асинхронного электродвигателя слабо освещен в литературе.

– Исследование охлаждения тяговых асинхронных электродвигателей. Охлаждение является важным аспектом в разработке тяговых машин. Использование новых технологий охлаждения или новых изоляционных материалов с улучшенными показателями теплопроводности может улучшить теплоотвод и повысить энергоэффективность электродвигателя. По данному направлению есть исследования, в которых для более точного прогнозирования распределения температур в асинхронном электродвигателе используют программы численного моделирования.

– Разработка новых методов диагностики и контроля состояния асинхронных тяговых электродвигателей. По этому направлению исследуются различные методы диагностики состояния подшипников по анализу собственной вибрации, контролируется уровень нагрева частей машины, электрические параметры и т.д. для определения состояния и прогнозирования отказов электродвигателей.

Как видно из результатов анализа, все еще остается множество направлений для дальнейшего исследования асинхронного тягового электродвигателя.

Литература:

1. Сафин А.Р., Ranjan К.В. Тяговые электродвигатели для электромобилей, не содержащие редкоземельные элементы // Вестник

Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, №1(49). – С. 16–36;

2. Макаров Л.Н., Ястреба С.В. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе частотного регулирования // Электротехника. – 2007. – №11. – С. 15–18;

3. Лазарев Г.Б., Самородов Ю.Н. Особенности электромагнитных и электрофизических процессов в мощных электродвигателях при электрических воздействиях // Энергия единой сети. – 2016. – №6(29). – С. 44–66;

4. Изосимов Д.Б. Некоторые особенности проектирования тяговых асинхронных двигателей. Ч.1 // Электротехника. – 2012. – №3. – С. 36а–43;

5. Zhao N., Schofield N. An improved induction machine design procedure for electric vehicle traction // 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2016, Glasgow, UK, 19-21 april 2016: Proceedings. – Glasgow, 2016. – P. 1–6;

6. Ikeda R., Yusya S., Kondo K. Study on design method for increasing power density of induction motors for electric railway vehicle traction // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, IEMDC 2019, San Diego, USA, 12 – 15 may 2019: Proceedings. – San Diego, 2019. – P. 1545–1550;

7. Смирнов С.С., Новгородов Д.А., Климов А.В., Анисимов В.Р. Конструкционные методы повышения показателей тяговых электродвигателей // Трибуна молодых ученых: Сборник статей II международной научно-практической конференции. – Пенза. – 2023. – С. 85–90;

8. Masuku T.M., Wang R.-J., Botha M.C., Gerber S. Design strategy of induction motors // 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa, SAUPEC/RobMech/PRASA 2019, Bloemfontein, South Africa, 28-30 jan. 2019: Proceedings. – Bloemfontein, 2019. – P. 316–321;

9. Shi Y., Lorenz R.D. Induction machine design for dynamic loss minimization along driving cycles for traction applications // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017, Cincinnati, USA, 01 – 05 oct. 2017: Proceedings. – Cincinnati, 2017. – P. 278–285;

10. Schmidt E., Mullner F., Neudorfer H. Modeling and precalculation of additional losses of inverter fed asynchronous induction machines of traction drives // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, IEMDC 2011, Niagara Falls, Canada, 15–18 may 2011: Proceedings. – Niagara Falls, 2011. – P. 533–538.

ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОНОМНОГО ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А.С. Лобачева

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, lobacheva.2018@stud.nstu.ru

Научный руководитель: Топорков Д.М., к.т.н.

В данной работе представлены технические решения, принятые при проектировании синхронного генератора с постоянными магнитами для работы в дизель-генераторной установке на маневровом тепловозе ТЭМ-23. Построена зависимость выходного напряжения от нагрузки генератора.

This paper presents technical solutions adopted in the design of a permanent magnet synchronous generator for operation in a diesel generator set on a shunting diesel locomotive TEM-23. The dependence of the output voltage on the generator load is plotted.

Для работы в местах, где отсутствует возможность питания электроэнергией от промышленной сети, существует необходимость в автономных источниках питания. Часто в качестве электрогенератора для дизель-генераторных установок используется синхронный генератор с постоянными магнитами (СГМП).

Преимуществами данного типа машин являются простота и надежность конструкции, высокий КПД, улучшенные выходные характеристики, наиболее высокие массогабаритные показатели.

Отсутствие обмотки возбуждения является преимуществом при выборе СГМП в качестве автономного генератора, поскольку ему не нужен сторонний источник питания. Однако СГМП имеет существенный недостаток - невозможность регулирования выходного напряжения машины [1]. Поэтому важно понимание того, как будет меняться напряжение на выводах машины при изменении нагрузки.

Технические решения, принятые в процессе проектирования:

Ротор с постоянными магнитами марки N30УН, намагниченными радиально; обмотка – дробно-зубцовая, имеющая число пазов на полюс и фазу равную 4/11. Главными достоинствами такой обмотки являются укорочение вылета лобовых частей и упрощение намотки.

В целях уменьшения влияния от паразитических гармоник было принято решение увеличить число пазов статора в два раза. [2]

Главные размеры генератора найдены аналитическим методом. Расчет магнитного поля проводился с помощью программы Femm [3]. На рисунке 1 представлена модель магнитного поля генератора.

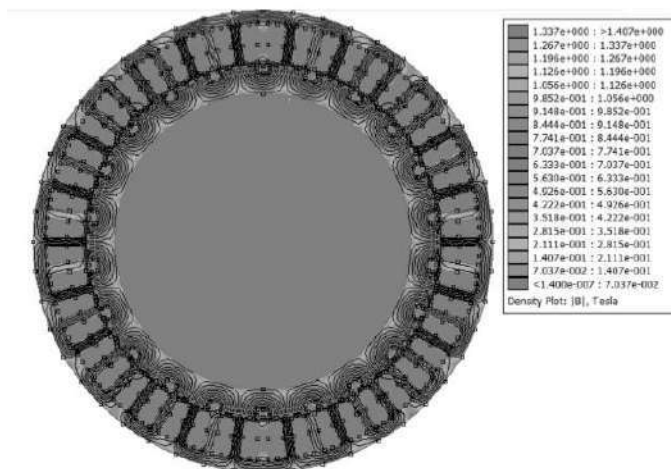


Рис. 1 – Распределение магнитного поля внутри рассчитанного генератора в режиме холостого хода

Было получено распределение магнитной индукции в воздушном зазоре (рис.2). Путем нахождения индуктивностей по продольной и поперечной осям было вычислено суммарное потокоцепление фазы при номинальной нагрузке, что позволило в дальнейшем построить внешнюю характеристику генератора.

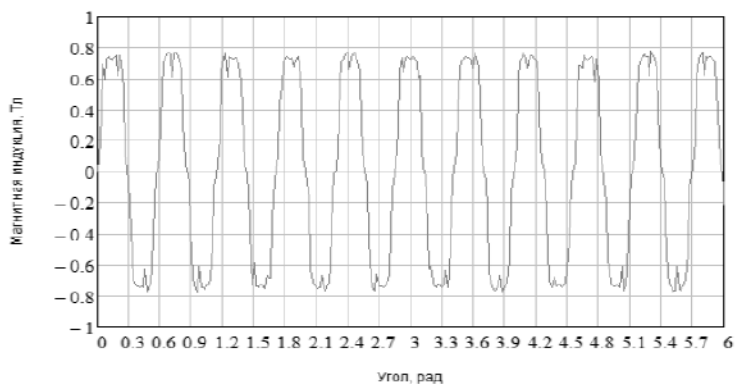


Рис. 2– Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре в режиме холостого хода

Внешняя характеристика генератора - это зависимость напряжения на его выводах от тока, протекающего через нагрузку. Расчет производится соответственно векторной диаграмме на рис.3. При расчете было принято, что нагрузка генератора активная.

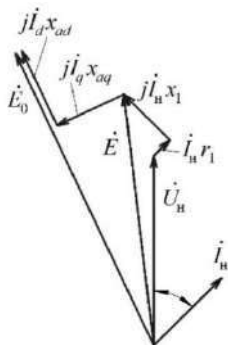


Рис.3 – Векторная диаграмма СГПМ

Результаты расчета внешней характеристики представлены на рис.4.

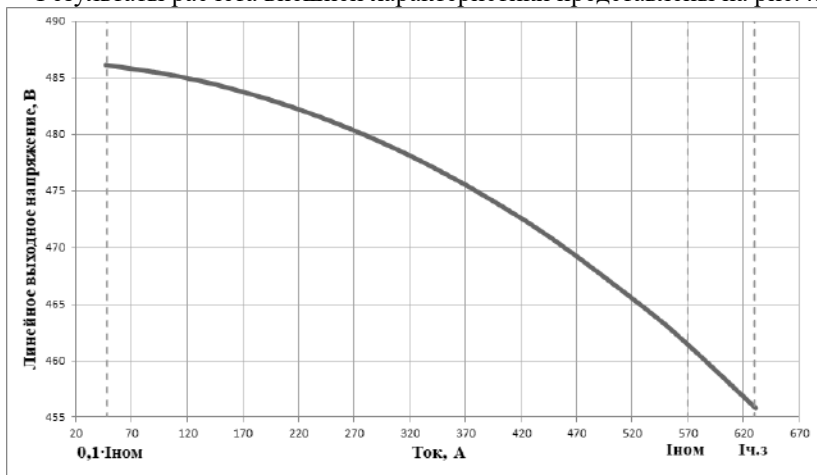


Рис.4 - Зависимость выходного линейного напряжения от тока $U=f(I)$

Из-за отсутствия возможности регулирования выходного напряжения СГПМ существует необходимость в прогнозе поведения генератора при изменении нагрузки. Из-графика видно, что с увеличением нагрузки генератора падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора увеличивается, при этом напряжение уменьшается.

Литература:

1. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64 с.;

2. Бабицкий, Д. Ю. Об улучшении гармонического состава магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток / Д. Ю. Бабицкий, А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2023. – № 5. – С. 29-33. – DOI 10.53891/00135860_2023_5_29. – EDN RBACEH. Gieras J. F. PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review //2012 XXth International Conference on Electrical Machines. – IEEE, 2012. – С. 2573-2579.

3. Моделирование магнитных полей а программе FEMM: учеб. – метод. пособие/А.Г.Приступ, А.В.Червяков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.– 92 с.; Amara Y. et al. Hybrid excitation synchronous machines: Energy-efficient solution for vehicles propulsion //IEEE Transactions on vehicular technology. – 2008. – Т. 58. – №. 5. – С. 2137-2149.

4. В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев / Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.280 с.: ил.;

ДВУХРОТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Н.К. Маломошнов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, demonikada@gmail.com**

Научный руководитель: Приступ А.Г., к.т.н., доцент

В данной работе рассмотрены область применения, требования для изготовления, особенности и разновидности конструкции генератора, разновидности типов роторов генераторов данного типа.

This paper presents the scope of application, requirements for manufacturing, features and types of generator design, and types of generator rotors of this type are considered.

Благодаря высокой плотности крутящего момента и высокой эффективности машины с постоянными магнитами нашли применение в широком спектре применений, таких как электромобили, преобразование волновой энергии и выработка энергии ветра [1-3]. Для дальнейшего повышения эффективности и плотности крутящего момента в последние годы широко исследовались двухроторные машины с постоянными магнитами и двойными воздушными зазорами. Мощность таких двигателей составляет от 0,1 до 10 кВт.

В связи с востребованностью генератора данного типа как компактного мобильного источника питания для нужд геологических экспедиций, туристических баз, вооруженных сил, генератор имеет множество вариаций конструкций таких как конфигурация с радиальным потоком, радиального потока внешнего потока, двойного осевого потока статора, двойного осевого потока ротора, сбалансированного осевого потока одностороннего ротора, и машин с тороидальной обмоткой с осевым потоком.

Большой интерес из всех вышеперечисленных генераторов привлекает двухроторный генератор с постоянными магнитами и радиальный поток. Конструкция такого двигателя достаточно проста – вал, на котором расположены два ротора дискообразной формы, имеющие сердечники из железа, на торцах которых приклеены магниты, обращенные к статору, сердечник которого шихтованный и имеет трехфазную обмотку.

Упрощенная схема конструкции генератора показана на рисунке 1.

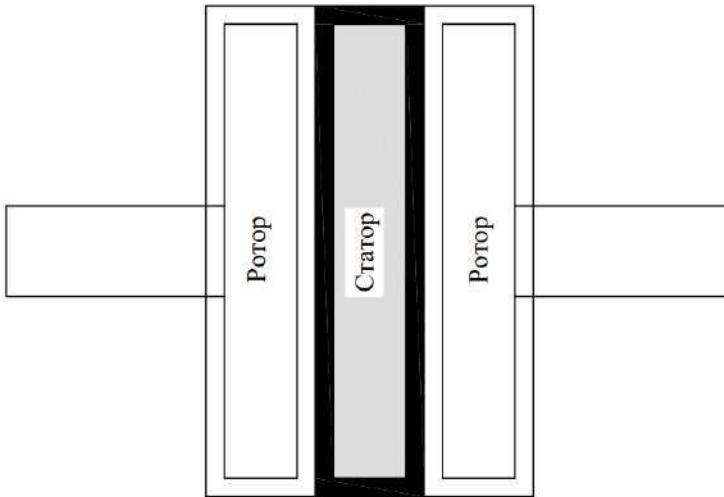


Рис.1 – Общая конструкция двухроторного генератора

К двухроторным генераторам обычно предъявляют следующие требования [4]:

- Простота, надежность, необслуживаемость, технологичность изготовления и малая стоимость;
- Малые потери холостого хода, малый начальный момент;
- Высокий КПД;
- Малые вес и габариты;

- Жесткость внешней характеристики;
- Малое индуктивное сопротивление обмотки при работе на выпрямитель;
- Недопустимость размагничивания постоянных магнитов токами короткого замыкания.

В источнике [5] для обеспечения простоты изготовления, а также уменьшения затрат на изготовления генератора, предложена конструкция генератора осевого потока без сердечника. Конструкция такого генератора показана на рисунке 2.

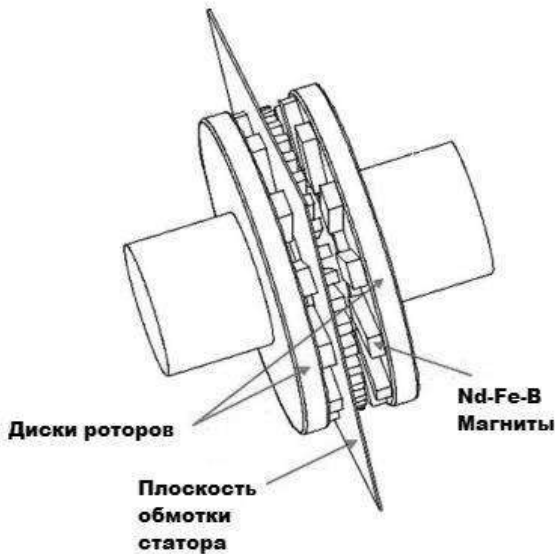


Рис.2 – Структура генератора с осевым потоком без сердечника

В связи с тем, что генераторы такой необычной конструкции были разработаны и начали активно использоваться только в XXI веке, отсутствуют какие-либо методики расчета такого генератора.

Цель исследования данной работы заключается в разработке методики расчета дискового двухроторного генератора с постоянными магнитами. Расчет производится аналитическим методом с применением численного метода – метода конечных элементов.

Литература:

1. Xu P., Liu X., Shi K., Xiao F. Design and analysis of a dual-rotor radial flux permanent-magnet generator // 17th International Conference on

Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014, Hangzhou, China, 22–25 oct. 2014: Conference proceedings. – Hangzhou, 2014 – P. 669–672.

2. *Kutt F., Blecharz K., Karkosiński D.* Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator for a Counter-Rotating Wind Turbine // *Energies*. – 2020 – Vol. 13, N. 11. – P. 2833–2848.

3. *Asefi T., Faiz J., Khan M.A.* Design of Dual Rotor Axial Flux Permanent Magnet Generators with Ferrite and Rare-Earth Magnets // *IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2018, Budapest, Hungary, 26–30 aug. 2018: Conference proceedings*. – Budapest, 2018 – P. 531–538.

4. *Корнилов, Д. С.* Обзор конструкций торцевых генераторов для малых ветроэлектрических установок / Д. С. Корнилов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, Иваново, 29–31 мая 2019 года. Том III. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 181-184. – EDN DVGRHY.

5. *Hosseini S. M., Agha-Mirsalim M., Mirzaei M.* Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2008 – Vol. 44, N. 1. – P. 75–80.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕПНОЙ ЧЕТЫРЕХЗОННОЙ ОБМОТКИ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Е.Д. Меленчук

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, katesergienko.01@mail.ru**

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н., доцент

Работа направлена на определение наиболее рациональных конструктивных решений с точки зрения влияния полей дифференциального и лобового рассеяния электрической машины. Проведены расчеты, сравнение и анализ нескольких видов обмоток в выбранных асинхронных машинах.

The work is aimed at determining the most advantageous design solutions in terms of the influence of the fields of differential and frontal scattering of an electric machine. Calculations, comparison and analysis of several types of windings in selected asynchronous machines are carried out.

Среди устройств, преобразующих электрическую энергию в механическую, большое распространение получил асинхронный двигатель за счет своей простоты и надежности. Таким образом, одно из направлений в развитии промышленности является повышение характеристик асинхронных двигателей. В том числе и за счет модернизации обмотки.

В данной работе стояла цель определить возможность применения цепной четырехзонной обмотки в асинхронном двигателе на примере выбранных двигателей из производимой серии.

Произведено исследование цепной четырехзонной обмотки и реализован матричный анализ обмоток в программной среде Calculator-v1. Также выполнены поверочные расчеты выбранных двигателей, как с двухзонной обмоткой, так и с цепной четырехзонной.

Четырехзонная обмотка имеет четыре катушечные группы на фазу. Фазная зона такой обмотки для случая трехфазной обмотки составляет $\alpha=30^\circ$.

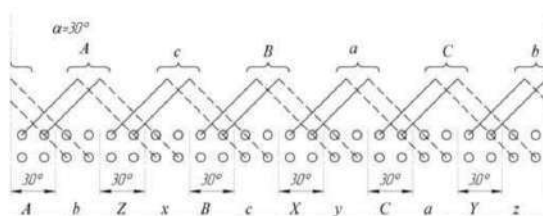


Рис.1 – Принцип образования четырехзонной обмотки на примере двухслойной трехфазной обмотки с фазной зоной $\alpha = 30$

Особенностью цепной четырехзонной обмотки является то, что левые стороны катушек расположены не в четных пазах, а правые в четных. Также выполнение четырехзонной обмотки цепной обеспечивает ее исполнение однослойной с укорочением шага [1-3].

Перед процессом матричного анализа предстоит выбрать конструкции машин, на примере которых будет определяться область применения цепной четырехзонной обмотки. Основным критерием для выбора электродвигателей из серии 4А стало открытость сведений о конструктивных особенностях каждой машины, что позволяет осуществить поверочные расчеты при применении нового типа обмотки. При этом предполагается, что наилучшую эффективность четырехзонная обмотка покажет в машинах с большими лобовыми частями и относительно небольшим обмоточным коэффициентом. Поэтому в диапазон выбора попадают электродвигатели с относительно

малой длиной воздушного зазора, так называемые «короткие» машины, и одной парой полюсов.

Выбор машин произведен по данным справочника «Асинхронные двигатели серии 4А» авторства Кравчика А.Э. [4]. Были отобраны три машины с наименьшими значениями обмоточных коэффициентов и наименьшими отношениями длин к диаметру машин: 4А180S2У3, 4А200М2У3 и 4А250S2У3. Именно на основе данных машин были произведены матричные анализы обмоток [3] и поверочные расчеты как для двухзонной обмотки согласно справочным данным, так и для четырехзонной обмотки с разными шагами по пазам. Результаты сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Анализ двухзонной ($n=2$) и цепной четырехзонной ($n=4$) обмотки для двигателей 4А180S2У3 и 4А200S2У3

Коэффициенты сравнения	$n=2$	$n=4$		
	$y=11$	$y=7$	$y=9$	$y=11$
$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент	0,783	0,551	0,679	0,786
K_{σ} – коэффициент дифференциального рассеяния	0,0027	0,0019	0,0030	0,0036

Таблица 2 – Анализ двухзонной ($n=2$) и цепной четырехзонной ($n=4$) обмотки для двигателя 4А250S2У3

Коэффициенты сравнения	$n=2$	$n=4$	
	$y=14$	$y=13$	$y=15$
$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент	0,758	0,720	0,796
K_{σ} – коэффициент дифференциального рассеяния	0,0026	0,0027	0,0030

Для дальнейших поверочных расчетов было принято решение остановиться на цепных четырехзонных обмотках с шагами $y=11$ для двигателей 4А180S2У3 и 4А200S2У3 и $y=15$ для 4А250S2У3. При этом ряд данных и некоторые формулы требует корректировки, в соответствии уже произведенному матричному анализу и теории о четырехзонной и цепной обмотках [5-7] таблица 3.

Для последующего оценочного сравнения обмоток определим следующие показатели качества: обмоточный коэффициент, коэффициенты полезного действия и мощности, кратности пускового момента, пускового тока, максимального момента (таблица 4).

Таблица 3 – Корректировки для электромагнитного расчета двигателей с цепной четырехзонной обмоткой

Коэффициенты			
Наименование	4A180S2Y3	4A200M2Y3	4A250S2Y3
	y = 11	y = 11	y = 15
$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент	0,786		0,796
$K_{л}$ – коэффициент длины лобовых частей	1,3		
$K_{выл}$ – коэффициент вылета лобовых частей	0,4		
Расчетные величины			
Наименование	Формула		
β_1 – укорочение или удлинение шага обмотки	$\beta_1 = \frac{y}{\tau_{\phi}}$		
$b_{сст}$ – средняя ширина катушки, мм	$b_{сст} = \frac{\pi(D + h_{н1})}{np} \beta_1$		
$\lambda_{л1}$ – магнитная проводимость лобового рассеяния	$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_{\phi}}{l_{\delta}} \left(l_{л1} - 0,64 \beta_1 \frac{\tau}{2} \right)$		

Таблица 4 – Сравнение электродвигателей с двухзонной (n=2) и цепной четырехзонной (n=4) обмотками

Обозначение	Характеризующее свойство	4A180S2Y3		4A200M2Y3		4A250S2Y3	
		n = 2	n = 4	n = 2	n = 4	n = 2	n = 4
		y = 11	y = 11	y = 11	y = 11	y = 14	y = 15
$k_{об1}$	Качество обмотки	0,783	0,786	0,783	0,786	0,758	0,796
η , %	Энергоэффективность	87,63	88,9	89,27	89,06	90,5	90,54
$\cos\varphi$	Энергоэффективность	0,89	0,9269	0,8795	0,8835	0,93	0,9308
M_n^*	Пусковые свойства	1,11	1,38	1,45	1,71	1,07	1,3
I_n^*	Теплонапряженность	5,42	5,5	6,76	7,29	7,6	8,4
M_m^*	Перегрузочная способность	2,42	2,5	2,8	2,96	2,5	3,24

Выводы:

1. Данная обмотка имеет место быть реализованной в двигателях серии 4А, но в силу того, что двигатели серии изготавливаются с очень большим укорочением добиться, уменьшения лобовых частей не удалось, но тем не менее, получилось уменьшить лобовое рассеяние, что в последствии повлияло положительно на характеристики.

2. Энергоэффективность увеличилась только в двигателе с малой высотой оси вращения. С увеличением оси вращения получилось так, что КПД и коэффициент мощности практически не изменяются.

3. При увеличении оси вращения, и соответственно q , перегрузочная способность увеличивается с большей степенью, пусковое свойство увеличивается практически в одном и том же соотношении. Теплонапряженность аналогична с перегрузочной способностью: увеличивается в большей степени с увеличением оси вращения.

4. Технологически цепная четырехзонная обмотка лучше обмотки, представленной в аналогах. Связано это с тем, что исходная обмотка двуслойная, а исследуемая – однослойная.

5. За счет увеличения обмоточного коэффициента есть дальнейший вектор проектирования. В частности, для сохранения магнитной индукции в воздушном зазоре можно уменьшить длину машины, таким образом, уменьшив количество активных материалов, либо уменьшить количество витков в пазу.

В заключении, цепная четырехзонная обмотка требует дальнейшего исследования и развития. Стоит рассмотреть возможность ее применения в специальных машинах, в которых необходима большая перегрузочная способность.

Литература:

1. Патент 215087, МКИ Н02К 3/28 Российская Федерация. Совмещенная обмотка электрической машины переменного тока / Г.А. Шаншуров, Т.В. Честюнина.; патентообладатель: Новосибирский Государственный Технический Университет. Оpubл.28.11.2022, БЮЛ.№ 34

2. Патент 2729971, МКИ Н02К 3/28, 17/14 Российская Федерация. Обмотка электрической машины переменного тока / Г.А. Шаншуров.; патентообладатель: Новосибирский Государственный Технический Университет. Оpubл.13.08.2020, БЮЛ.№ 23.

3. Шаншуров Г.А., Честюнина Т.В., Вяльцев Г.Б. Оценка качества обмоток машин переменного тока на стадии проектирования// Электротехника. - 2022. - № 5. - С. 40-45.

4. Кравчик А.Э. Справочник по асинхронным двигателям серии 4А – М.: Энергия, 1982. – 437 с.

5. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений/ Вольдек А.И. - 3-е изд., переработан - Л.: Энергия, 1978. - с 393.

6. Копылов И. П., Клоков Б. К. Справочник по электрическим машинам. В 2т. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

7. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов/ Копылов И.П. - 4-е изд., переработал и дополнил – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.А. Муращенко

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, murashchenko.artem@gmail.com
Научный руководитель: Приступ А.Г., к.т.н., доцент**

Исследовано влияние расстояния между V-образными пазами для постоянных магнитов на роторе на характеристики электродвигателя и способы увеличения диапазона регулирования частоты вращения при одном и том же напряжении источника питания и крутящем моменте в точке максимального ослабления поля.

The influence of the distance between the V-shaped slots for permanent magnets on the rotor on the characteristics of the electric motor and ways to increase the range of speed control at the same voltage of the power supply and torque at the point of maximum field attenuation was investigated.

Исследованный синхронный электродвигатель с постоянными магнитами на роторе используется в качестве тягового привода легкового автомобиля. Данный тип электродвигателя выбран по причине его меньших массогабаритных характеристик по сравнению с асинхронными электродвигателями аналогичной мощности и более высокого КПД и крутящего момента при относительно малых рабочих токах. Питание электродвигателя осуществляется при помощи высоковольтной аккумуляторной батареи с напряжением 800 В. Именно поэтому важным параметром является максимальная частота вращения при заданном напряжении источника питания и крутящем моменте.

Электромагнитный расчет синхронного электродвигателя с постоянными магнитами выполнен по методике, изложенной в [1,2]. Исследование влияния конструкции ротора на характеристики электродвигателя проводилось в программном обеспечении «Ansys Motor-CAD». Модель исследованного электродвигателя приведена на Рисунке 1.

Для сравнения приводятся 3 исполнения ротора: с минимальным расстоянием между V-образными пазами ($b_1 = 2$ мм) на Рисунке 2, с

максимальным расстоянием между V-образными пазами ($b_1 = 14$ мм) на Рисунке 3 и с воздушным барьером между V-образными пазами на Рисунке 4.

Сравнение зависимостей момента от частоты вращения электродвигателя приведено на Рисунке 5. Результаты проведённого исследования представлены в Таблице 1.

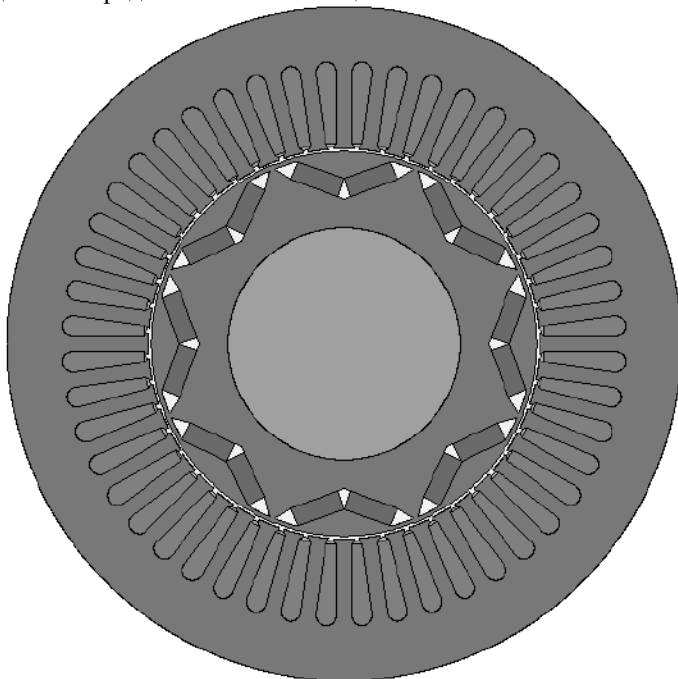


Рис. 1 – Модель исследованного электродвигателя

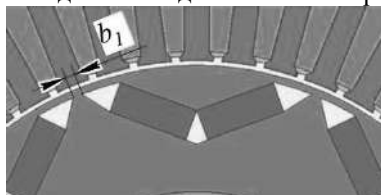


Рис. 2 – Модель №1 исследованного электродвигателя с минимальным расстоянием между V-образными пазами

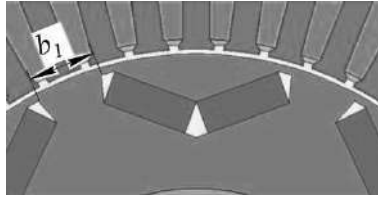


Рис. 3 – Модель №2 исследованного электродвигателя с максимальным расстоянием между V-образными пазами

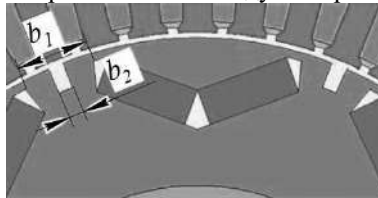


Рис. 4 – Модель №3 исследованного электродвигателя с воздушным барьером между V-образными пазами

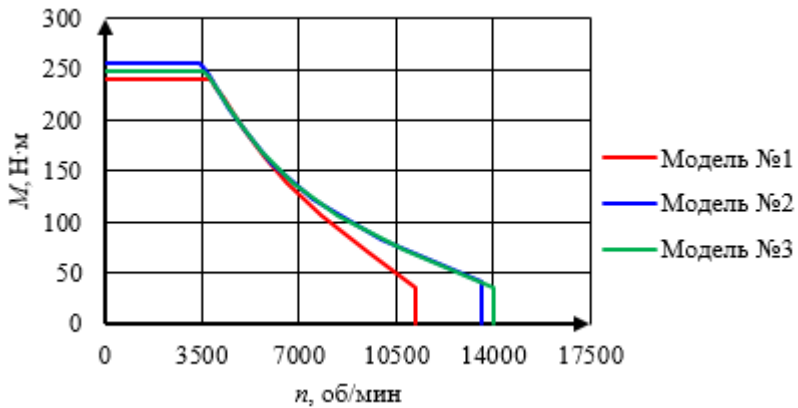


Рис. 5 – Сравнение зависимостей момента от частоты вращения

При увеличении расстояния между V-образными пазами увеличиваются индуктивные сопротивления X_d и X_q . За счет увеличения индуктивного сопротивления X_q увеличивается реактивный момент и, следовательно, возрастает крутящий момент. Из-за увеличения индуктивного сопротивления X_d увеличивается продольно-размагничивающая реакция якоря, которая уменьшает напряжение двигателя в точке максимального ослабления поля. Также уменьшению напряжения двигателя способствует уменьшение ЭДС из-за увеличения потоков рассеяния. При уменьшении собственного напряжения двигателя возрастает запас по напряжению источника питания, следовательно становится возможным разгон электродвигателя до большей скорости.

Таблица 1 – Сравнение параметров электродвигателя

Исполнение ротора	$b_1 = 2$ мм	$b_1 = 14$ мм	Воздушный барьер	
			$b_1 = 14$ мм	$b_2 = 3$ мм
X_d , Ом	1,388	1,544	1,528	
X_q , Ом	3,229	4,09	3,451	
I_d , А	-103,6	-103,6	-103,6	
I_q , А	9,064	9,064	9,064	
I , А	104	104	104	
E , В	226,9	222,4	222,4	
E_d , В	-143,8	-159,9	-158,3	
E_q , В	-29,27	-37,07	-31,28	
U , В	90,63	76,07	74,34	
$M_{реак}$, Н·м	76,19	100,59	89,06	
$M_{полн}$, Н·м	237,28	254,52	248,62	
P_2 , кВт	74542	79958	78107	
$n_{макс}$, об/мин	11181,79	13602,70	14027,38	

Добавление воздушного барьера позволяет уменьшить индуктивное сопротивление X_q , за счет уменьшения которого собственное напряжение двигателя уменьшается еще больше и двигатель можно разогнать до еще большей скорости. При этом наблюдается незначительное уменьшение крутящего момента.

Заключение:

Проведенное исследование позволило установить, что увеличение расстояния между V-образными пазами и добавление воздушного барьера между ними способствует увеличению запаса по напряжению источника питания и, следовательно, увеличению диапазона регулирования частоты вращения. Из этого также можно сделать вывод, что при увеличении расстояния между V-образными пазами для разгона

до определенной скорости электродвигателю требуется меньшее напряжение при одних и тех же массогабаритных характеристиках.

Литература:

1. Шевченко А.Ф., Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ, Ю.Г. Бухгольц, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вьяльцев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 152 с.

2. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяйнов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

И.И. Наймушин, З.С. Темлякова, П.В. Морозов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, ilya.naymushin90@mail.ru
Научный руководитель: Темлякова З.С., д.т.н., профессор

В работе рассмотрено влияние добавочных потерь в стали на энергоэффективность асинхронного электродвигателя. Расчеты выполнены для асинхронных двигателей напряжением до 1000В, приведены результаты расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 30 кВт и частотой вращения 1000 об/мин. Определена доля добавочных потерь в стали и степень ее влияния на коэффициент полезного действия.

The paper considers the effect of additional losses in steel on the energy efficiency of an asynchronous electric motor. Calculations are performed for asynchronous motors with a voltage up to 1000 V, the results of calculation of an asynchronous motor with a closed-loop rotor with a power of 30 kW and a rotation speed of 1000 rpm are presented. The share of additional losses in steel and the degree of its influence on the efficiency are determined.

Асинхронные двигатели нашли широкое применение в электроприводах переменного тока и потребляют значительную долю вырабатываемой электрической энергии. Поэтому вопросы энергоэффективности имеют важное значение при разработке и эксплуатации асинхронных двигателей [1-3]. Электромагнитные расчеты асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

выполнены по методике, изложенной в [4]. К добавочным потерям в стали относят поверхностные и пульсационные потери.

В таблице 1 представлены результаты расчета асинхронного двигателя с обмоткой ротора типа беличья клетка мощностью 30 кВт и частотой вращения 1000 об/мин.

Таблица 1 – Результаты расчета

Z_1	36	54	72	90
$P_{\text{ст.осн}}, \text{Вт}$	553.239	562.362	545	553.239
$P_{\text{эл. статор}}, \text{Вт}$	3063	2135	1994	1993
$P_{\text{эл. ротор}}, \text{Вт}$	1024	742	703	699
$P_{\text{мех}}, \text{Вт}$	125.553	125.553	125.553	125.553
$P_{\text{пов на статоре}}, \text{Вт}$	5.979	10.849	7.442	7.819
$P_{\text{пов на роторе}}, \text{Вт}$	26.589	34.119	30.821	30.193
$P_{\text{пул на статоре}}, \text{Вт}$	6.684	58.361	177.189	481.346
$P_{\text{пул на роторе}}, \text{Вт}$	0.426	4.232	12.852	33.344
$P_{\text{сумм.доб}}, \text{Вт}$	39.677	107.561	228.304	552.703
$\Sigma P, \text{Вт}$	5062	3852	3763	4091
$\eta, \%$	85.6	88.6	90.5	88

Ниже представлены результаты расчета доли добавочных потерь в стали и графические зависимости поверхностных и пульсационных потерь в функции числа зубцов статора.

Результаты расчета доли добавочных потерь в стали:

$$P_{\%36} = 1 - \frac{\Sigma P_{36} - P_{36\text{доб}}}{\Sigma P_{36}} \cdot 100\% = 1 - \frac{5062 - 39.677}{5062} \cdot 100\% = 0.78\%;$$

$$P_{\%54} = 1 - \frac{\Sigma P_{54} - P_{54\text{доб}}}{\Sigma P_{54}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3852 - 107.561}{3852} \cdot 100\% = 2.79\%;$$

$$P_{\%72} = 1 - \frac{\Sigma P_{72} - P_{72\text{доб}}}{\Sigma P_{72}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3763 - 228.304}{3763} \cdot 100\% = 6.067\%;$$

$$P_{\%90} = 1 - \frac{\Sigma P_{90} - P_{90\text{доб}}}{\Sigma P_{90}} \cdot 100\% = 1 - \frac{4091 - 552.703}{4091} \cdot 100\% = 13.51\%.$$

Результаты проведения расчета поверхностных потерь при разном числе пазов приведены в рисунках 1 и 2.

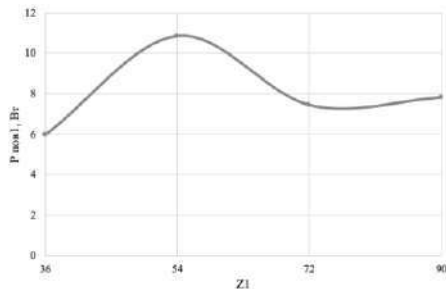


Рис. 1 – Поверхностные потери статора при изменении числа пазов статора

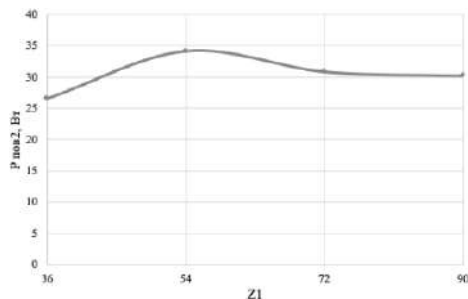


Рис. 2 – Поверхностные потери ротора при изменении числа пазов статора

Результаты проведения расчета пульсационных потерь при разном числе пазов приведены в рисунках 3 и 4.

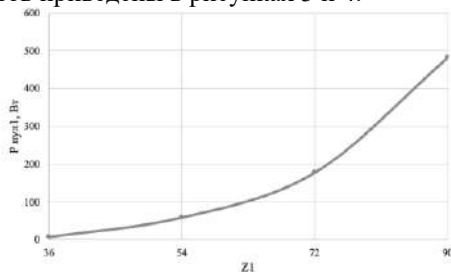


Рис. 3 – Пульсационные потери статора при изменении числа пазов статора

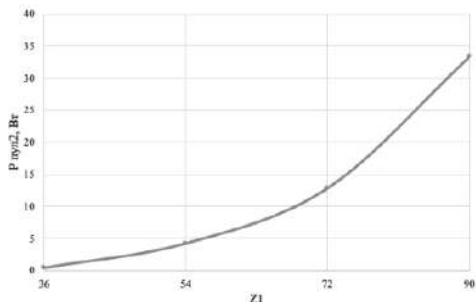


Рис. 4 – Пульсационные потери ротора при изменении числа пазов статора

Заключение

Выполненные расчеты добавочных потерь для различных конструктивных вариантов, при изменении числа зубцов на статоре асинхронного двигателя установили, что доля добавочных потерь в стали сердечника магнитопровода непостоянна. Она варьируется в диапазоне (1-14) %. Определена доля добавочных потерь в стали и степень её влияния на коэффициент полезного действия, который является количественным критерием энергоэффективности электрической машины.

Литература:

1. Бурков А. Ф., Юрин В. Н., Аветисян В. Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. - № 9-10 – С. 92-100.
2. Карх И. С., Ионова Л. В., Полузадов В. Н. Взаимосвязь энергоэффективности масса-габаритных показателей асинхронных двигателей. – Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов Международной научно-практической конференции.–2018. – С.309-310.
3. Романенко И. Г., Данилов М. И. Оценка влияния на энергоэффективность асинхронного двигателя конструктивных изменений без коррекции зубцовой зоны // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. - № 5(65). –С. 19-25.
4. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяйнов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И П. Копылова. - М : Энергия, 1980. - 496 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЕХЗОННОЙ ОБМОТКИ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

А.А. Носиков

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, nosikovaan@icloud.com

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н., доцент

В данной работе приведено исследование применения четырехзонной обмотки в серийных асинхронных двигателях. В процессе выполнения работы, обмотка выбранных двигателей серии 4А заменена на четырехзонную без изменения геометрии зубцово-пазовой зоны двигателя и с сохранением удельных электромагнитных нагрузок за счет изменения длины активной части машины.

This paper presents a study of the use of four-zone winding in serial asynchronous motors. During the work, the winding of the selected 4A series motors was replaced with a four-zone one without changing the geometry of the gear-groove zone of the engine and preserving specific electromagnetic loads by changing the length of the active part of the machine.

В современном мире все больше и больше внимания уделяется энергоэффективности и экологической безопасности. Одним из ключевых элементов в этой области является электроэнергетика, где все большее число потребителей используют современные технологии и оборудование, позволяющие снизить энергопотребление и выбросы вредных веществ в атмосферу.

Одним из таких устройств являются асинхронные машины, которые широко используются в различных отраслях промышленности и в быту. Однако, для достижения максимальной эффективности и снижения энергопотребления, необходимо правильно выбрать данные обмотки этих машин, что позволит улучшить их работу и повысить надежность.

В данном дипломном проекте представлена тема четырехзонных обмоток асинхронных машин. В рамках работы будут рассмотрены практические примеры применения этих обмоток в различных асинхронных машинах, а также их влияние на характеристики двигателя.

Целью данного проекта является определения области применения данного класса обмотки для асинхронных машин, которая, возможно, позволит повысить эффективность их работы и снизить энергопотребление.

Задачи:

- Исследование видов обмоток электрических машин переменного тока

- Выбор исследуемых двигателей
- Анализ вариантов обмоток для выбранных двигателей
- Поверочный электромагнитный расчет
- Выводы, согласно результатам

Под четырехзонной обмоткой в данной работе понимается обмотка, ширина фазной зоны которой $\alpha=30$ электрических градусов, где

$$\alpha = 2 \cdot \pi / m \cdot n ,$$

где n – число фазных зон на полюс и фазу; m – число фаз.

Согласно исследованиям в статьях и литературе, четырехзонная обмотка, по сравнению с двухзонной имеет лобовые части меньшей длины и меньший коэффициент дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\partial} = \frac{x_{\sigma\partial}}{x_m} = \sum_{v=1}^{v_{\max}} \left(\frac{k_{\sigma\partial}}{v \cdot k_{\sigma\partial.1}} \right)^2 ,$$

где x_m – главное индуктивное сопротивление фазы обмотки, а $x_{\sigma\partial}$ – величина индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния, $k_{\sigma\partial.v}$ – обмоточный коэффициент для v -й гармоники магнитного поля [1].

Исходя из этого можно предположить, что наибольший эффект будет достигаться в коротких машинах с небольшим обмоточным коэффициентом, для дальнейших исследований были выбраны двигатели 4A250S2Y3, 4A180S2Y3, 4A100S2Y3.

Сравнение вариантов обмоток будет производиться матричным методом с помощью программы Calculator-v1, в качестве сравнительных критериев обмоток будут выступать коэффициент дифференциального рассеяния, обмоточный коэффициент для первой гармоники и форма диаграммы Гергиса. Обмотки двигателей, которые в оригинальном двигателе были выполнены однослойными, при изменении обмотки на четырехзонную будут оставаться однослойными, а те, что были выполнены в оригинальном двигателе двухслойными, будут выполняться четырехзонными двухслойными со смещением слоев друг относительно друга на разное количество пазов [2].

Для лучшего варианта обмотки двигателя 4A180S2Y3, согласно критериям оценки качества, был произведен электромагнитный расчет по методике [3], а также с помощью программы MotorCAD. Результаты электромагнитного расчета выполненного двумя методами отличаются друг от друга и от справочных данных менее, чем на 5%, поэтому, для уменьшения трудоемкости расчетов, дальнейшее сравнение будет производиться с помощью программы MotorCAD [4].

В таблице 1 приведены результаты расчета с помощью MotorCAD.

Таблица 1 – Результаты расчетов выбранных двигателей

Наименование двигателя		4A180S2Y3		
Параметр сравнения	Оригинальная обмотка	4-хзонная обмотка	Разница между двумя обмотками	
КПД	90%	90,90%	1,00%	
cosφ	0,93	0,9	-3,23%	
Кратность пускового момента	1,137	1,087	-4,44%	
Кратность максимального момента	2,782	3,082	10,77%	
Кратность пускового тока	6,334	6,847	8,10%	
Коб1	0,783	0,676	-13,68%	
Коб5	0,196	0,139	-29,02%	
Коб7	0,061	0,103	67,31%	
Коэффициент дифференциального рассеяния	0,0027559	0,002266	-17,78%	
Длина машины	110	127	15,45%	
Наименование двигателя		4A250S2Y3		
Параметр сравнения	Оригинальная обмотка	4-хзонная обмотка	Разница между двумя обмотками	
КПД	94,53%	94,68%	0,16%	
cosφ	0,9526	0,9426	-1,05%	
Кратность пускового момента	1,271	1,200	-5,61%	
Кратность максимального момента	4,178	4,324	3,50%	
Кратность пускового тока	9,163	9,425	2,87%	
Коб1	0,758	0,676	-10,87%	
Коб5	0,193	0,137	-28,68%	
Коб7	0,018	0,100	441,75%	
Коэффициент дифференциального рассеяния	0,00264616	0,00218357	-17,48%	
Длина машины	200	224	12,00%	
Наименование двигателя		4A100S2Y3		
Параметр сравнения	Оригинальная обмотка	4-хзонная обмотка	Разница между двумя обмотками	
КПД	85,82%	87,90%	2,42%	
cosφ	0,9285	0,8	-13,84%	
Кратность пускового момента	1,488	0,194	-86,97%	
Кратность максимального момента	2,640	1,327	-49,72%	
Кратность пускового тока	5,801	2,446	-57,84%	
Коб1	0,958	0,701	-26,80%	
Коб5	0,205	0,561	173,21%	
Коб7	0,158	0,430	173,20%	
Коэффициент дифференциального рассеяния	0,00253457	0,0334501	1219,76%	
Длина машины	100	143	43,00%	

Литература:

1. Шаншуров Г.А. Двенадцати зонная обмотка машины переменного тока / Шаншуров Г.А., Честюнина Т.В., Вяльцев Г.Б. // – Москва: журнал «Электротехника», 2022. - №5. – С. 40-45.

2. Шаншуров Г.А. Матричная модель обмоток машин переменного тока: учеб.-метод. пособие / Г.А. Шаншуров, А.В. Червяков // – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 82.

3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник/ И.П Копылов, В.П Морозкин, Б.К. Клоков и др. – М.: Изд-во Высшая школа, 2005. – 496 с.

4. Кравчик А.Э. Справочник по асинхронным двигателям серии 4А – М.: Энергия, 1982. – 437 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЮСА РОТОРА СИНХРОННЫХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ЭЛЕКТРОМАГНТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ С ДРОБНОЙ-ОДНОЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ

И.Л. Попов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, select12345@yandex.ru

Научный руководитель: Топорков Д.М. к.т.н., доцент

Конструкцию полюса ротора определяет ряд коэффициентов, которые были получены эмпирически для машин с классической распределенной обмоткой статора, использования которых в машинах с дробной-однозубцовой обмоткой приведет к неудовлетворительной форме ЭДС. В результате исследования были получены оптимальные значения для данных коэффициентов для машин с дробной-однозубцовой обмоткой статора.

The design of the rotor pole is determined by a number of coefficients obtained experimentally for machines with a classical distributed stator winding, the use of which in machines with a fractional slot concentrated winding will lead to an unsatisfactory shape of the EMF. As a result of the study, the optimal values of these coefficients were obtained for machines with a slot concentrated stator winding.

С каждым годом растет популярность синхронных генераторов с постоянными магнитами, однако синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением остаются востребованными и в некоторых областях не имеют аналогов. Отличительной особенностью таких машин является возможность регулировать основной магнитный поток.

Зачастую важным требованием выдвигаемым к синхронным генераторам с электромагнитным возбуждением является невысокая скорость вращения вала. Частота вращения повышается за счет увеличения количества пар полюсов, однако максимальное количество пар полюсов, с которыми возможно спроектировать машину,

ограничивается диаметром расточки статора. Чрезмерное увеличение полюсов машины без увеличения диаметра расточки статора приведет к измельчению зубцово-пазовой зоны, что приводит к перенасыщению зубцов и более высоким значениям плотности тока в обмотке статора.

Однако невысокой частоты вращения вала можно добиться добавлением дополнительной механической передачи или частотного преобразователя. Но добавление дополнительных узлов к общей системе приведет к ряду негативных последствий:

1. Уменьшение КПД;
2. Снижение надежности;
3. Увеличение стоимости;
4. Усложнение обслуживания.

Однако применив особый тип обмотки статора – дробная-однозубцовая обмотка, можно добиться возможности значительно увеличить количество полюсов при относительно малом диаметре расточки статора. Таким образом, применение данного типа обмотки позволяет спроектировать машину с относительно низкой частотой вращения ротора и избавиться от всех вышеперечисленных негативных последствий.

Для синусоидальной формы ЭДС необходимо синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. При проектировании синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением этого добиваются неравномерным воздушным зазором вдоль полюсного наконечника. Для максимального приближения распределения магнитной индукции в воздушном зазоре, величина воздушного зазора вдоль полюсного наконечника должна изменяться по сложному математическому закону, однако технологически обеспечить такую форму полюса сложно, поэтому обычно полюсный наконечник обтачивают по меньшему радиусу. После проведения анализа можно заключить, что однозначно форму полюсного наконечника определяют следующие параметры:

1. Отношение максимального воздушного зазора между краем полюса и статора к минимальному;
2. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия;
3. Высота полюсного наконечника.

Существующие рекомендации по выбору данных параметров получены эмпирическим путем для классических распределенных обмоток и использование их при проектировании синхронного генератора с дробной-однозубцовой обмоткой может привести к неудовлетворительной форме ЭДС. Таким образом, исследование влияния данных параметров полюса ротора на форму распределения

магнитной индукции в воздушном зазоре для явнополюсных синхронных генераторов с дробной-однозубцовой обмоткой является важной и актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи было проведено итеративное моделирование электромагнитного поля методом конечных элементов синхронной машины с различной конфигурацией полюса ротора. Далее, был проведен анализ результатов и получены оптимальные значения вышеперечисленных параметров для синхронных явнополюсных машин с дробной-однозубцовой обмоткой.

Литература:

1. Попов И.Л., Топорков Д.М. Оптимизация геометрии ротора гидрогенератора с дробной однозубцовой обмоткой для нужд ПЭС и малых ГЭС // Электротехника – 2022. – №10. – С. 58-62.
2. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными q меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника – 2007. – №9. – С. 3-9.
3. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 1; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996
4. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 2; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996

ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБНЫХ ЗУБЦОВЫХ ОБМОТОК В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

А.А. Раджапов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, aleksej.radzhapov@bk.ru

Научный руководитель: Топорков Д.М., к.т.н., доцент

На основании анализа научно-технической литературы представлены основные пути улучшения гармонического состава в асинхронных электрических машинах, а также прочие вопросы при использовании дробных зубцовых обмоток в данном типе электрических машин.

Based on the analysis of scientific and technical literature, the main ways to improve the harmonic composition in asynchronous electric machines are presented,

as well as other issues when using fractional slot concentrated windings in this type of electric machines.

Гармоники – это длительно существующие в энергосистеме синусоидальные волны, которые суммируются с основной частотой, искажая исходную форму сигнала всплесками, провалами и постоянным присутствием шумов. Номер гармоники означает во сколько раз её частота выше основной частоты. С физической точки зрения гармоники представляют собой колебания, кратные частоте основного сигнала [1].

В настоящее время в трехфазных асинхронных машинах обычно используются одно- или двухслойные, соединенные внахлестку, распределенные обмотки. Эта обмоточная конфигурация приводит к более синусоидальному распределению магнитодвижущей силы, и, следовательно, хорошей производительности машины. Волна магнитодвижущей силы строго зависит от коэффициента q (число пазов на полюс и фазу), и с увеличением данного показателя она становится более синусоидальной. Однако сложность намотки и производственный процесс также увеличиваются. К дополнительным недостаткам данного типа обмотки относятся: большая длина концов обмотки, низкий коэффициент заполнения паза, что приводит к повышенным омическим потерям и проблемам с укладкой. Альтернативой распределенным обмоткам могут послужить дробные зубцовые обмотки. Преимуществами данных обмоток являются: простое и полное автоматизированное производство, сокращение отношения веса к моменту, высокий коэффициент заполнения паза, высокая эффективность и удельная мощность, высокая фазовая индуктивность (которая ограничивает токи короткого замыкания) и т.д.

В основном дробные зубцовые обмотки обсуждаются в контексте бесщеточных машин с постоянными магнитами. Но недавний интерес применения данного типа обмотки имеет нарастающую тенденцию к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Несмотря на упомянутые ранее преимущества данное решение характеризуется существенным недостатком – высокий гармонический состав низкого и высокого порядка в волне магнитодвижущей силы вдоль воздушного зазора. Эти гармоники распространяются с различными скоростями в противоположные направления.

В литературе [2] методики касательно дробных зубцовых обмоток разделены на 3 категории:

- модификация структуры сердечника с применением барьеров магнитного потока.

- модификация структуры обмотки (катушки с различным числом ветвей на сторону; многослойная, многофазная; двойная многофазная; двухслойная структура паза статора; концепция сдвинутого статора.
- концепция самозапуска.

Некоторые из выше представленных методов используются в асинхронных машинах.

Предлагаемая конструкция обмотки состоит из двух различных систем дробных зубцовых обмоток, которые интегрированы в конфигурацию статора с двумя щелевыми слоями. Первый тип обмотки - это обычная 6-зубцовая / 2-полюсная дробная зубцовая обмотка, которая работает с основной гармоникой, в то время как вторая обмотка - это 12-зубцовая / 10-полюсная обмотка, которая широко используется в машинах с постоянными магнитами. В предлагаемой конфигурации обмотки вторая обмотка использовалась для компенсации (устранения) 5-й и 7-й гармоник МДС, возникающих в результате 6-зубчатой/2-полюсной обмотки. Таким образом, при использовании представленной комбинации наиболее нежелательные высшие гармоники вплоть до 11-й полностью устраняются. Следовательно, его форма сигнала МДС очень синусоидальна [3].

В работе представлены методы использования гармонического состава в электрических машинах. Установлено, что использование дробных зубцовых обмоток в асинхронных электрических машинах возможно и перспективно, но необходимо много исследований по данной теме.

Литература.

1. Геллер, Б., Гамата, В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
2. Dajaku, G., Spas, S. & Gerling, D. Advanced optimization methods for fractional slot concentrated windings. *Electr Eng* 101, 103–120 (2019).
3. G. Dajaku, S. Spas, X. Dajaku and D. Gerling, "An improved fractional slot concentrated winding for low-poles induction machines," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 114-119.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗУБЦОВО-ПАЗОВЫХ ЗОН АКТИВНОГО ОБЪЕМА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА УРОВЕНЬ ЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

А.А. Темляков, В.Ю. Нейман, В.В. Гречкин
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, maksidor@inbox.ru
Научный руководитель: Нейман В.Ю., д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой теоретических основ электротехники

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором находят широкое применение в автоматизированных электромеханических системах и потребляют значительную долю вырабатываемой энергии. В связи с вышеуказанными обстоятельствами совершенствование конструкции и в частности, асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является актуальной задачей.

Работа посвящена анализу влияния на энергоэффективность асинхронного двигателя особенностей конструктивной формы ограничивающих воздушный зазор поверхностей.

Inductions motors with a short-circuited rotor are widely used in automated electromechanical systems and consume a significant proportion of the generated energy. In connection with the above circumstances, the improvement of the design and, in particular, inductions motors with a short-circuited rotor is an urgent task.

The work is devoted to the analysis of the influence on the energy efficiency of an asynchronous motor of the design features of the surfaces limiting the air gap.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенными преобразователями электрической энергии в механическую. Качество, надежность и уровень технической разработки асинхронных двигателей оказывают существенное влияние на уровень реализации производственных процессов в различных отраслях промышленности. Анализ научно-технической литературы [1-4] показывает, что разработка вопросов, касающихся энергоэффективности асинхронных двигателей, является предметом исследования многих специалистов. Разработка вопросов, касающихся энергоэффективности электрических машин, является актуальной задачей. Работа посвящена оценке добавочных потерь в стали магнитопровода асинхронного двигателя, являющегося элементом электромеханической системы.

Основанием для расчета и анализа энергетических показателей (коэффициента полезного действия, коэффициента мощности) является математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым

ротором, ее энергетическая диаграмма, аналитические выражения для расчета пульсационных (1) и поверхностных (2) потерь.

Пульсационные потери определяют по формуле:

$$P_{\text{пульс}(2)} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n_1}{1000} \cdot B_{\text{пульс}(2)} \right)^2 \cdot m_{Z1(2)}, \quad (1)$$

где, $Z_{2(1)}$ - число зубцов ротора (статора); n_1 - частота вращения магнитного поля, об/мин; $B_{\text{пульс}(2)}$ - амплитуда пульсаций магнитного поля статора (ротора), Тл; $m_{Z1(2)}$ - масса стали зубцов статора (ротора), кг.

Поверхностные потери определяют по формуле:

$$P_{\text{пов1}(2)} = P_{\text{пов1}(2)} \cdot (t_{1(2)} - b_{\text{ув1}(2)}) \cdot Z_{1(2)} \cdot l_{\text{см1}(2)}, \quad (2)$$

где, $P_{\text{пов1}(2)}$ - удельные поверхностные потери статора (ротора), Вт/м²; $t_{1(2)}$ - зубцовые деления статора (ротора), м; $b_{\text{ув1}(2)}$ - открытие паза статора (ротора), м; $Z_{1(2)}$ - число зубцов статора (ротора); $l_{\text{см1}(2)}$ - длина сердечника магнитопровода статора (ротора), м.

В выражении (1) и (2) $B_{\text{пульс}(2)}$ и $P_{\text{пов1}(2)}$ определяются по формулам:

$$B_{\text{пульс}(2)} = \frac{\gamma_{\text{статор(ротоп)}} \cdot \delta_{\text{возд}}}{2 \cdot t_{1(2)}} \cdot B_{Z1(2)}; \quad (3)$$

$$P_{\text{пов1}(2)} = 0.5 \cdot k_{01(2)} \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n_1}{10000} \right)^{1.5} \cdot \left(B_{01(2)} \cdot t_{2(1)} \cdot 10^3 \right)^2, \quad (4)$$

где, $k_{01(2)}$ - эмпирический коэффициент, учитывающий влияние марки стали и толщины листов магнитопровода; $\delta_{\text{возд}}$ - величина воздушного зазора; $B_{Z1(2)}$ - расчётная индукция в зубцах статора (ротора), Тл; $\gamma_{\text{статор(ротоп)}}$ - коэффициент воздушного зазора для зубца статора (ротора); $Z_{2(1)}$ - число зубцов ротора (статора); n_1 - частота вращения магнитного поля, об/мин; $B_{01(2)}$ - амплитуда пульсаций индукция на статоре (роторе), Тл; $t_{2(1)}$ - зубцовые деления ротора (статора), м.

В выражении (4) $B_{01(2)}$ определяют по формуле:

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta}, \quad (5)$$

где

$\beta_{01(2)}$ - эмпирический коэффициент, учитывающий открытие паза;

k_{δ} - коэффициент воздушного зазора;

B_{δ} - значение расчетной индукции в воздушном зазоре, Тл.

В соответствии с энергетической диаграммой асинхронный двигатель имеет три группы потерь:

1. Электрические потери.
2. Потери в стали.
3. Механические потери.

Одним из способов влияния на величину суммы потерь, а, следовательно, и коэффициент полезного действия, является уменьшение поверхностных и пульсационных потерь.

Ниже представлен алгоритм расчета:

1. Обосновывается число пазов статора.
2. Определяется соответствующее значение числа пазов ротора.
3. Выполняется полный электромагнитный расчет для каждого сочетания.
4. Результаты исследования представляются в удобном для анализа виде.

В таблице 1 представлены результаты расчета асинхронного двигателя мощностью 45 кВт и частотой вращения 1000 об/мин.

Таблица 1- Результаты расчета коэффициента полезного действия и составляющих потерь

Z_1	Z_2	$P_{пов}$, Вт	$P_{пуль}$, Вт	$P_{сумм.доб}$, Вт	ΣP , Вт	η , %
90	78	44.673	519.268	563.941	3787.979	0.9
72	62	48.669	210.063	258.732	3493.569	0.906
54	44	55.575	59.649	115.224	3457.452	0.91
36	26	68.979	9.249	78.228	3562.07	0.897

В таблице 1 обозначено: $P_{сумм. доб}$ – суммарные добавочные потери в стали, ΣP – суммарные потери в электрической машине, η – коэффициент полезного действия.

Закключение.

В результате выполненных исследований установлено, что доля поверхностных и пульсационных потерь варьируется в диапазоне (2-15%) от суммарных потерь активной мощности. Очевидно, что эта доля зависит от геометрической формы зубцово-пазовых зон статора и ротора асинхронного двигателя. Установлено, что при заданной мощности, напряжении, частоте вращения и условии $D^2 l \delta = const$ (D , $l \delta$ – главные размеры), каждая из модификаций асинхронного двигателя имеет свой спектр потерь мощности при изменении чисел зубцов статора и ротора. Это обусловлено тем, что изменение чисел пазов статора и ротора сопровождается изменением формы пазов, их размеров, что, в свою очередь, влияет на уровень магнитной индукции в зубцах, плотности тока в проводниках обмоток статора и ротора, соответствующее значение потерь и коэффициент полезного действия.

Оптимальной считается модификация двигателя, имеющая наибольший коэффициент полезного действия.

Таким образом, необходимым условием при разработке асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является рассмотрение альтернативных вариантов конструкции зубцово-пазовых зон с целью достижения максимального значения КПД, а, следовательно, энергоэффективной эксплуатации электродвигателей в приводах.

Литература:

1. Бурков А. Ф., Юрин В. Н., Аветисян В. Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. - № 9-10 – С. 92-100.

2. Карх И. С., Ионова Л. В., Полузадов В. Н. Взаимосвязь энергоэффективности масса-габаритных показателей асинхронных двигателей. – Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов Международной научно-практической конференции.–2018. – С.309-310.

3. Романенко И. Г., Данилов М. И. Оценка влияния на энергоэффективность асинхронного двигателя конструктивных изменений без коррекции зубцовой зоны // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. - № 5(65). –С. 19-25.

4. Винтайкина Д. А., Астанаева Ю. Р. Анализ методов повышения энергоэффективности электропривода с асинхронным двигателем // Тенденции развития науки и образования. – 2022. - № 92-12. – С. 74-76.

УЛУЧШЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А.Е. Фоякин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, foynakin2020@mail.ru
Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н., доцент**

Возможность обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии является ключевой задачей как для отдельных компаний, так и на макроуровне для всей мировой экономики. Повсеместное увеличение применения генераторов актуализируют улучшение внешней характеристики синхронных генераторов с постоянными магнитами. В исследовании рассмотрено влияние расположения постоянных магнитов на роторе, а также величины воздушного зазора при неизменной мощности на характер внешней характеристики синхронного генератора.

The ability to ensure an uninterrupted supply of electricity is a key task both for individual companies and at the macro level for the entire global economy. The widespread increase in the use of generators actualizes the improvement of the external characteristics of synchronous generators with permanent magnets. The study examines the influence of the location of permanent magnets on the rotor, as well as the size of the air gap at constant power on the nature of the external characteristics of the synchronous generator.

Основной характеристикой генератора является внешняя – зависимость выходного напряжения от тока при постоянных угловой скорости вращения ротора и характере нагрузки. Внешняя характеристика имеет большое практическое значение – по ней можно судить о том, как изменяется напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и отсутствии регулирования напряжения. В данном исследовании был произведен электромагнитный расчет и построена внешняя характеристика для СГПМ мощностью 30 кВт с радиально расположенными магнитами на роторе (Рис. 1) и для СГПМ с тангенциально расположенными магнитами (Рис. 2) [1].

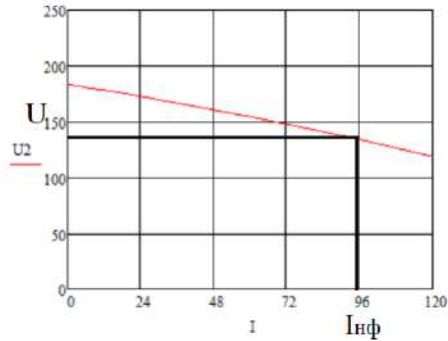


Рис.1 – Внешняя характеристика при радиально расположенных магнитах на роторе.

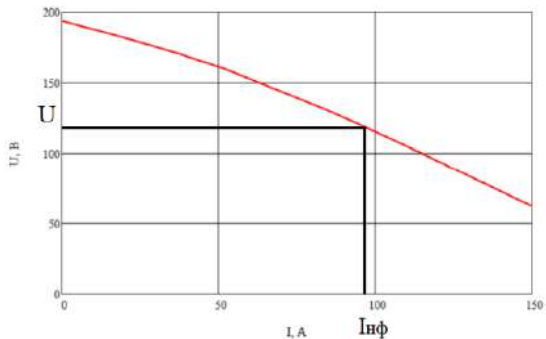


Рис.2 – Внешняя характеристика при тангенциально расположенных магнитах на роторе.

Внешняя характеристика, которая была получена для СГПМ с тангенциально расположенными магнитами на роторе имеет худшие характеристики. Величина падения напряжения составляет 32,5% (Рис.2). Лучший результат имеет СГПМ с радиально расположенными магнитами на роторе. Величина падения напряжения в данном случае составляет 27,5% (Рис.1).

Далее, было исследовано влияние величины воздушного зазора на величину падения напряжения генератора, а также других показателей при неизменной мощности. Результаты исследования сведены в таблицу 1.

При расчете СГПМ воздушный зазор был выбран равным 1 мм, при исследовании, для величины воздушного зазора равной 1,2 мм был использован магнит немного сильнее: марка магнита N35SH, остаточная индукция $B_r = 1,17$ Тл; коэрцитивная сила $H_c = 876$ кА/м. А для меньшего зазора, то есть 0,6 мм, магнит был использован слабее: марка

магнита N28EH, остаточная индукция $B_r = 1,04$ Тл; коэрцитивная сила $H_c = 780$ кА/м [2].

Таблица 1 – Результаты исследования влияния изменения величины воздушного зазора при неизменной мощности

Величина во душного зазора δ , мм	Высота магнитов h , мм	Падение напряжения ΔU , %	Индуктивность по оси d , X_d	Индуктивность по оси q , X_q	Мощность P_n , кВт
0,6	3	30	0,713	0,711	30
1	3	27,5	0,7	0,698	30
1,2	3	26,5	0,673	0,668	30

С увеличением воздушного зазора величина падения напряжения уменьшалась, что имеет положительный аспект для синхронного генератора. Максимальная величина воздушного зазора в данном исследовании соответствует минимальному значению падения напряжения.

В заключении можно отметить, что улучшение внешней характеристики увеличивает ресурс генератор. Его способность более стабильно работать при воздействии каких-либо неблагоприятных факторов. Характеристика становится более «жесткой» при радиально расположенных магнитах на роторе, величина падения напряжения улучшилась на 5%. Также, при изменении величины воздушного зазора можно добиться улучшения важнейших показателей для синхронного генератора.

Литература:

1. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64с.

2. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г., Бухгольц Ю.Г., Честюнина Т.В., Топорков Д.М., Вяльцев Г.Б. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. –146с.

РАЗРАБОТКА АСИНХРОННОГО КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА КОМПРЕССОРА

А.О. Холод, М.А. Тимохина

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kimicold@icloud.com

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н., доцент

В данной работе приведена методика расчета асинхронного конденсаторного двигателя для привода компрессора. Представлена схема включения конденсаторов в цепь вспомогательной обмотки статора. Проведен электромагнитный расчет при симметричном двухфазном питании, представлены рабочие и пусковые характеристики. Осуществлен подбор емкостей конденсаторов для обеспечения требуемых кратностей пускового и максимального моментов при питании от однофазной сети, выбор способа отключения пусковой емкости после разгона двигателя.

This paper presents a method for calculating an asynchronous capacitor motor to drive a compressor. A diagram of the connection of capacitors to the circuit of the auxiliary stator winding is presented. An electromagnetic calculation was carried out for symmetrical two-phase power supply, and the operating and starting characteristics were presented. The selection of capacitor capacities was carried out to ensure the required multiples of the starting and maximum torques when powered from a single-phase network, and the choice of a method for disconnecting the starting capacitance after acceleration of the engine.

Асинхронный конденсаторный двигатель (АКД) является одним из наиболее распространенных типов электродвигателей, который повсеместно используется в домашнем и сельском хозяйстве, в приводах станков, насосов, вытяжных вентиляторов, компрессоров и других отраслях промышленности. АКД обладает рядом преимуществ, которые делают его особенно актуальным для привода компрессора. К наиболее важным преимуществам можно отнести простоту и надежность, возможность работы от однофазной сети.

Целью данной работы является разработка асинхронного конденсаторного двигателя с номинальной мощностью 2,2 кВт при напряжении питания 220 В, асинхронной частотой вращения не менее 2807 об/мин для привода компрессора.

Анализ научно-технической литературы показал, что на сегодняшний день методики по расчету АКД не могут предоставить рекомендации по расчету двигателей, мощностью более 500 Вт [1, 2]. Исходя из этого, были определены дальнейшие пути решения проблемы.

В начале проектирования АКД с заданными характеристиками необходимо было осуществить выбор схемы включения конденсаторов

в цепь вспомогательной обмотки статора и выбор способа отключения пусковой емкости после разгона двигателя. После анализа существующих технических решений, была выбрана схема с двумя конденсаторами – рабочим и пусковым (рисунок 1). Данная схема позволяет улучшить характеристики в рабочей точке режима и при пуске двигателя.

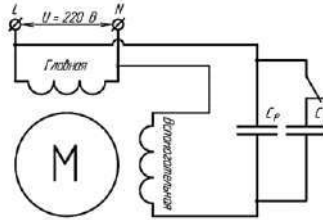


Рис. 1 – Схема включения пускового и рабочего конденсаторов в цепь вспомогательной обмотки

Далее, исходя из схемы включения, выбрано устройство – центробежный выключатель, который будет отключать пусковой конденсатор из цепи питания вспомогательной фазы статора после разгона двигателя.

Электромагнитный расчет конструкции электродвигателя был проведен по методике, которая описана в [3], при условии симметричного двухфазного питания. Необходимые электромагнитные нагрузки были приняты, аналогично нагрузкам трехфазной машины идентичной мощности, выбран класс изоляции обмоток, геометрия пазов статора и ротора, выбраны электроизоляционные материалы для пазов статора. Полученные рабочие и пусковые характеристики изображены на рисунке 2.

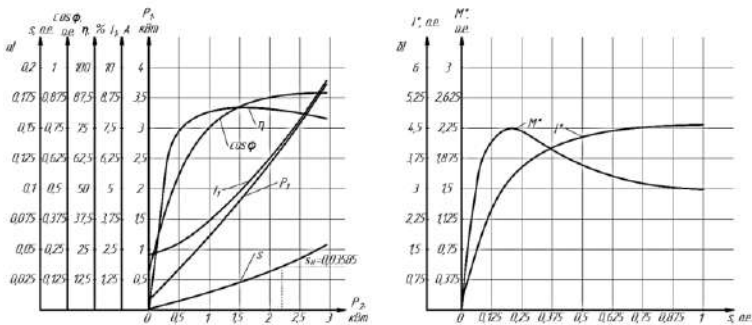


Рис. 2 – Характеристики спроектированного двигателя:
а) рабочие; б) пусковые

Особенностью в проектировании АКД является расчет и выбор требуемых емкостей конденсаторов, так как такой двигатель представляет собой однофазную машину, у которой, без применения конденсаторов, отсутствует пусковой момент из-за того, что магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, является пульсирующим. В данной работе требуемые емкости пускового и рабочего конденсаторов были рассчитаны на основании метода симметричных составляющих, изложенного в [2, 4, 5]. Из условия получения кругового поля в рабочей точке режима, необходимо избавиться от токов прямой последовательности. Добиться этого можно разными способами, но в нашем случае – путем введения коэффициента трансформации, связывающего параметры обмоток статора и включением рабочего конденсатора в цепь вспомогательной обмотки. Требуемое значение коэффициента трансформации было получено из первого уравнения данной системы:

$$\begin{cases} k_{\text{тр}}^2 \cdot r_{A1} - k_{\text{тр}} \cdot x_{A1} = 0 \\ k_{\text{тр}}^2 \cdot x_{A1} - x_C + k_{\text{тр}} \cdot r_{A1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $k_{\text{тр}}$ - коэффициент трансформации, необходимый для обеспечения кругового поля в электродвигателе; r_{A1} и x_{A1} - эквивалентные активное и индуктивное сопротивления главной фазы (А) для заданного скольжения (определяются как действительная и мнимая части комплексного сопротивления схемы замещения фазы А); x_C - емкостное сопротивление фазосдвигающего конденсатора.

Затем, после расчета числа витков и сечения проводников вспомогательной обмотки, значение коэффициента трансформации было уточнено $k_{\text{тр}} = 0,485$.

По второму уравнению системы (1) рассчитывалась емкость рабочего конденсатора, которая равна 174 мкФ, затем, из номинального ряда емкостей конденсаторов [6] выбираем ближайшую по значению емкость. Таким образом требуемая рабочая емкость составляет 150 мкФ. После всех отклонений от расчета, расхождение в МДС составило 6,8 %, поле получилось практически круговое.

Расчет пусковых характеристик с использованием пусковой емкости конденсатора производится аналогично расчету рабочей емкости: коэффициент трансформации принимается равным $k_{\text{тр}} = 0,485$ из расчета рабочей емкости; сопротивления схемы замещения берутся из расчета пусковых характеристик симметричного режима, с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения. Пусковая емкость выбирается

из условия обеспечения требуемой кратности пускового момента. Из опыта использования конденсаторных двигателей, пусковая емкость конденсатора должна быть в 2-3 раза больше рабочей. Поэтому примем пусковую емкость конденсатора из номинального ряда [6]: 350 мкФ.

Также, следует учитывать, что исходя из схемы включения, суммарная пусковая емкость равна сумме емкостей пускового и рабочего конденсатора и составляет 500 мкФ. После этого, необходимо произвести настройку центробежного выключателя, чтобы пусковая емкость отключалась на скольжении меньшем, чем критическое, полученное из пусковых характеристик с рабочей емкостью. Это делается для того, чтобы двигатель, после отключения пускового конденсатора, не был перегружен. С учетом этого, была построена итоговая пусковая характеристика спроектированного двигателя (рисунок 3).

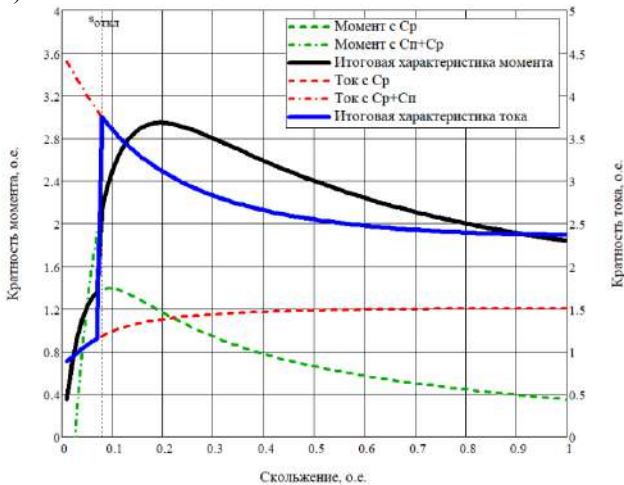


Рис. 3 – Итоговая пусковая характеристика спроектированного двигателя

В работе выполнен расчет одного из возможных исполнений асинхронного конденсаторного двигателя. Спроектированный двигатель полностью удовлетворяет требуемым характеристикам. На основании данной работы можно предложить один из подходов к проектированию подобных двигателей.

Литература:

1. *Арменский Е.В., Фалк Г.Б.* Электрические микромашины: Учеб. пособие для студ. Электротехн. Спец. Вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 231 с., ил.

2. Ермолин Н. П. Электрические машины малой мощности: Учеб. пособие для студ. Электротехн. Спец. Вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1967. – 503 с., ил.

3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.: ил.

4. Приступ А.Г. Асинхронные конденсаторные двигатели. Методические указания к РГЗ по курсу «Электрические машины систем автоматики» для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 16 с.

5. Юферов Ф.М. Электрические двигатели автоматических устройств. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1959. – 227 с.: с ил.

6. Каталог конденсаторов для электродвигателей – <https://asenergi.ru/catalog/kondensatory-puskovye/cd60.html> (дата обращения 31.05.2023)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДЛЯ БПЛА

Г.Н. Чусовитин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, chusovitin.2018@stud.nstu.ru**

Научный руководитель: Топорков Д.М. к.т.н., доцент

В настоящее время промышленности требуется большое разнообразие электродвигателей для беспилотных летательных аппаратов. Целью данной работы является проектирование и исследование синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе, который будет обладать предельными энергетическими показателями для использования в составе гибридного привода БПЛА «Сарма».

Currently, the industry requires a wide variety of electric motors for unmanned aerial vehicles. The purpose of this work is to design and study a synchronous electric motor with permanent magnets on the rotor, which will have ultimate energy performance for use as part of the hybrid drive of the UAV "Sarma".

Сегодня остро стоит вопрос с производством электрических двигателей для БПЛА в России практически нет заводов по их сборке, и производители дронов вынуждены устанавливать на свои продукты зарубежные комплектующие.

При проектировании летательных аппаратов немаловажную роль играет вес компонентов, используемых в создании конструкции.

Когда возникла необходимость в проектировании электрической машины, которая будет выполнять функции генератора, стартера и двигателя на БПЛА «Сарма» в составе гибридного привода была выбрана синхронная машина с постоянными магнитами на внешнем роторе, поскольку она обладает рядом полезных качеств: повышенный КПД в сравнении с другими электрическими машинами, лучшие массогабаритные показатели при равной мощности двигателей, простота конструкции и др.

Также была применена дробно зубцовая обмотка с $q=2/5$, что позволило уменьшить диаметр статора, а также размер лобовых частей обмотки[1,2,3].

При создании ТЗ был введен ряд ограничений и требований, которые необходимо было выполнить при проектировании. Было задано напряжение питания 88-130 В, скорость вращения 9000 об/мин, максимальная мощность: в генераторном режиме 5 кВт, в двигательном режиме 10 кВт. Ограничение массы, которая не должна была превысить 5 кг, а также необходимость вписать габариты в следующие ограничения: диаметр не должен превышать 150 мм, и аксиальная длина должна быть не более 100 мм.

Основываясь на всех этих ограничениях, были произведены электромагнитный[4] и тепловой расчёты. Изначально электромагнитный расчёт был произведен аналитическим методом и для подтверждения был выполнен поверочный расчёт в программном пакете «ANSYS Motor-CAD». В программе были указаны размеры, обмоточные данные, а также заданы используемые материалы. После проверки были произведены корректировки, возникшие с тем, что электрическая машина будет использована и как двигатель и как генератор.

Рабочие модели представлены на рисунках 1 и 2.

Расчётные данные по генераторному, двигательному и стартерному режиму приведены в таблице 1.

При проведении теплового расчёта с помощью программного пакета «ANSYS Motor-CAD» было указано, что при продувании электрической машины воздухом, часть воздуха проходит через паз в межкатушечном пространстве. Это позволило существенно снизить температуру нагрева как обмотки, так и машины в целом. При проведении итерационного расчёта были получены температуры указанные на рисунке 3.

Obj. Type	Obj. Name	Obj. Value	Obj. Units
Motor	Motor	1000	W
Stator	Stator	1000	W
Rotor	Rotor	1000	W
Shaft	Shaft	1000	W
Frame	Frame	1000	W
Winding	Winding	1000	W
Insulation	Insulation	1000	W
Oil	Oil	1000	W
Water	Water	1000	W
Air	Air	1000	W
Environment	Environment	1000	W

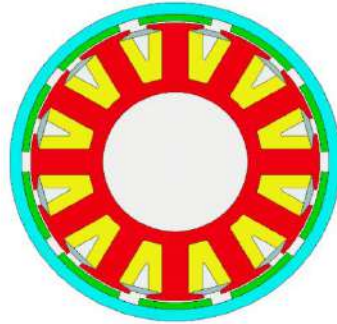


Рис.1 – Рабочая модель исследуемого электродвигателя, вид спереди

Obj. Name	Obj. Value	Obj. Units
Stator	1000	W
Rotor	1000	W
Shaft	1000	W
Frame	1000	W
Winding	1000	W
Insulation	1000	W
Oil	1000	W
Water	1000	W
Air	1000	W
Environment	1000	W

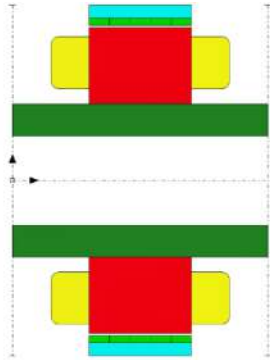


Рис.2 – Рабочая модель исследуемого электродвигателя, вид сбоку

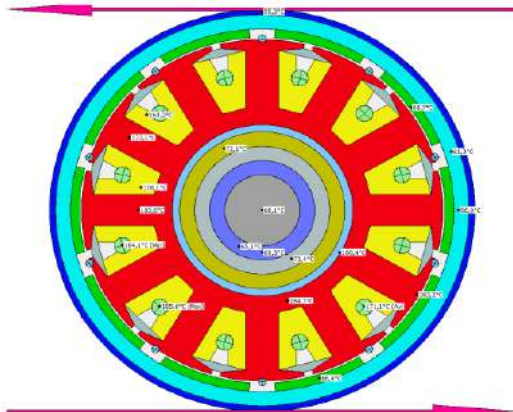


Рис.3 – Результат теплового расчёта

Таблица 1 – Расчётные параметры электрической машины при различных режимах работы

Параметры максимального двигательного режима								
$U_{dc} = 88B$			$I_{dc} = 127A$			kV = 102		
$U_{1\phi}$	<i>B</i>	62,23	$R_{1\phi}$	<i>Ом</i>	0,0062	$t_{обм}$	$^{\circ}C$	
$I_{1\phi}$	<i>A</i>	63,5	L_d	<i>мГн</i>	0,044	$t_{маг}$	$^{\circ}C$	
$\cos\phi$	<i>о/е</i>	0,95	L_q	<i>мГн</i>	0,064	$t_{корн}$	$^{\circ}C$	
P_{inp}	<i>кВт</i>	11,2	P_{cu}	<i>Вт</i>	212	$P_{мех}$	<i>Вт</i>	
P_{out}	<i>кВт</i>	10,5	P_a	<i>Вт</i>	57,3	B_a	<i>Тл</i>	
M_n	<i>Нм</i>	11,2	P_z	<i>Вт</i>	252	B_z	<i>Тл</i>	
η_n	<i>%</i>	94,3	$P_{маг}$	<i>Вт</i>	25,15	$B_{\delta,маг}$	<i>Тл</i>	
ψ	<i>мВб</i>	9,90	n_{max}	<i>об/мин</i>	9798	f_n	<i>Гц</i>	750
N_{max}	<i>об/мин</i>	9000	P_{Σ}	<i>Вт</i>	646	$t_{окр}$	$^{\circ}C$	40
$E_{1л}$	<i>B</i>	57,8		<i>Вт</i>				
Параметры генераторного режима								
$R_{наг}$	<i>Ом</i>	4,8	I_{1dc}	<i>A</i>		P_{out}	<i>кВт</i>	2171
$U_{1л}$	<i>B</i>	58,1	I_1	<i>A</i>	12,07			
M	<i>Нм</i>	2,7	n	<i>об/мин</i>	9000	P_a	<i>Вт</i>	51
η	<i>%</i>	85,3	P_{Σ}	<i>Вт</i>	372	P_z	<i>Вт</i>	239
			P_{cu}	<i>Вт</i>	20,5	$P_{маг}$	<i>Вт</i>	16,5
Параметры пускового режима								
$U_{dc} = 88B$			$I_{dc} = 30,1A$					
			I_{1dc}	<i>A</i>	6,1	P_{out}	<i>кВт</i>	2,4
$U_{1л}$	<i>B</i>	14,7	I_1	<i>A</i>	110	P_{inp}	<i>кВт</i>	2,65
M	<i>Нм</i>	11,48	n	<i>об/мин</i>	2000	P_a	<i>Вт</i>	3,4
η	<i>%</i>	90,7	P_{Σ}	<i>Вт</i>	245	P_z	<i>Вт</i>	15,4
$\cos\phi$	<i>о/е</i>	0,95	P_{cu}	<i>Вт</i>	213	$P_{маг}$	<i>Вт</i>	1,16

В дальнейшем планируется произвести механический расчёт, создать 3D модели и чертежи, которые будут использованы при производстве макетного образца. При сборке макетного образца будут проверены технологии производства деталей и компонентов данной электрической машины, а также произведены испытания генераторного, двигательного и стартерного режимов для сравнения расчётных значений и уточнения чертежей при необходимости.

Литература:

1. Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками. В 2-х ч.: Ч1 – Основы теории и конструкции. – Новосибирск: НГТУ, 1995. – 39 с.

2. Честюнина Т.В. Исследование многополюсных синхронных магнитоэлектрических генераторов с дробнымизубцовыми обмотками. – Новосибирск: НГТУ, 2012 – 18 с.

3. Васичкин М. С. Синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов с дробной зубцовой обмоткой для привода транспортного средства / М. С. Васичкин ; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 61-62.

4. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами : учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ, Ю.Г. Бухгольц, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев ; под общ. ред. А.Ф. Шевченко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 152 с

Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ

ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ
ПРИВодОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТА МОСТОВОГО КРАНА**

А.А. Александрова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, annysandrowa666@mail.ru**

Научный руководитель: Кавешников В.М., к.т.н., доцент

В работе рассматривается оригинальный подход к проблеме синхронизации перемещения моста цехового мостового крана с целью снижения аварийности, потребления электроэнергии и увеличения ресурса работы механических элементов системы передвижения моста.

Original approach to synchronization problem of movement shop bridge crane for accident reduction, energy and work resource saving of movement drives mechanical parts.

Введение. Мостовые краны широко используются в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в топливно-энергетическом комплексе, который в настоящее время обеспечивает значительную часть бюджетных поступлений, энергетическую безопасность и суверенитет страны [1].

Без мостовых кранов не обойтись как на нефтегазовых месторождениях, так и в машиностроении, металлургии.

На рис. 1 приведен общий вид моста мостового крана, состоящего из следующих подсистем: захвата и подъема груза, перемещения тележки по продольным балкам моста, перемещения моста крана по подкрановым путям.

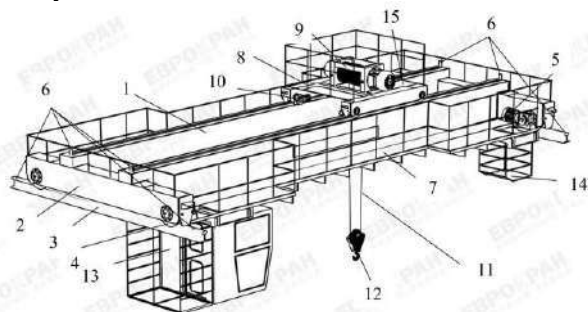


Рис.1 – Общий вид мостового крана

Далее рассматривается наиболее сложная двухдвигательная подсистема перемещения моста, требующая строго синхронного перемещения обеих опор моста для достижения цели работы – снижение аварийности, потребления энергии и сохранения ресурса работы механических устройств приводов моста.

Постановка задачи. Для цехового мостового крана с известными основными параметрами (L – длина моста; $G_{\text{нетто}}$ – вес моста в сборе; $G_{\text{гр}}$ – грузоподъемность моста; v_m – максимальная скорость перемещения моста; a_m – максимальное ускорение моста) предложить функциональную схему системы синхронизации асинхронных электроприводов передвижения моста, обеспечивающую его минимальный перекося. При это общая скорость, ускорение и положение моста во время его движения задается оператором (крановщиком) и контролируется им.

Решение. На рис. 2 предложена функциональная схема системы синхронизации, где ЗУ – задающее устройство величины скорости ведущего привода (джойстик); РСВ – регулятор скорости ведущего привода; АС4 – частотно управляемые электропривода (ведущий и ведомый); ДПС1 – датчик положения и скорости ведущего; ДП2 – датчик положения ведомого; РС – регулятор синхронизации; УС1, УС2 – устройства сравнения; С – сумматор.

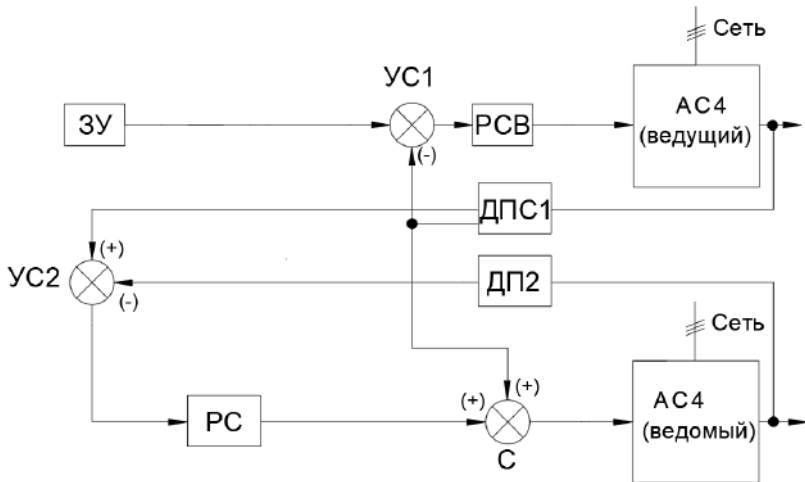


Рис.2 – Функциональная схема системы синхронизации

Схема работает следующим образом. ЗУ задает скорость ведущего привода, который с помощью обратной связи по скорости и РСВ стабилизирует скорость на уровне заданной.

Однако, при воздействии возмущений, анализ которых входит в задачи дальнейших исследований, скорость ведущего (как и ведомого, у которого могут быть свои возмущения) отклоняется от заданной как в статике, так и в динамике, вызывая перекося моста. Для контроля перекося и его устранения производится сравнение положений обеих опор моста на УС2, с выхода которого разница положений подается на РС. При этом знак ошибки по положению положительный при отставании ведомого и отрицательный при его забегании вперед. Ошибка по положению обрабатывается регулятором синхронизации РС и с соответствующим знаком подается на сумматор С, корректируя скорость ведомого для устранения перекося моста.

Заклучение. Решение поставленной задачи позволяет сформулировать задачи дальнейших исследований:

- имитационное моделирование системы с учетом реальных нелинейностей и других особенностей элементов системы;
- расчет конкретных параметров системы с учетом перекося моста;
- анализ возможных возмущений и исследование поведения системы при различной величине возмущающих воздействий;
- уточнение структуры и параметров РС;
- оценка эффективности предлагаемой системы для минимизации перекося моста.

Литература:

1. Малахов В.А., Несытых К.В. О роли топливно-энергетического комплекса в экономике России [Электронный ресурс] // Отрасли и межотраслевые комплексы: электронный журнал. – URL: <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/2017/01/05-rol-toplivno-energeticheskogo-kompleksa.pdf> (дата обращения: 1.11.2023)

АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ И ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИНУС-ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПИТАНИЕМ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

В.И. Анибров

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, anibrov.v@yandex.ru

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

Для повышения энергоэффективности в системах с электроприводом применяется частотное регулирование скорости вращения. Современные технологии частотного регулирования подразумевают питание нагрузки

напряжением несинусоидальной формы из отдельных квази-прямоугольных импульсов. С целью сглаживания фронтов импульсов ШИМ напряжения, подаваемого на клеммы электродвигателей (ЭД) от преобразователей частоты (ПЧ) используются выходные фильтры между ПЧ и ЭД.

To increase energy efficiency in systems with an electric drive, frequency control of the rotation speed is used. Modern frequency control technologies imply the supply of a load with a voltage of a non-sinusoidal shape from separate quasi-rectangular pulses. In order to smooth out the fronts of PWM voltage pulses supplied to the terminals of electric motors from frequency converters, output filters between frequency converters and electric motors are used.

Применение полупроводниковых преобразователей приводит к возникновению отклонений в форме токов и напряжений, как потребляемых электроприводом из сети, так и в форме токов и напряжений, питающих приводные двигатели. Отклонение от синусоидальности и ШИМ выходного напряжения преобразователя частоты являются причинами возникновения гармонических составляющих тока и напряжения, перенапряжений при коммутации, вызывают дополнительные потери электроэнергии, приводят к ускоренному износу электрооборудования. Для высоковольтного электропривода, имеющего в своем составе силовые кабели для питания электродвигателя, указанные недостатки, приводят к повышенному износу и старению изоляции питающего кабеля, вызванных перегревом от гармонических составляющих тока и перенапряжениями при коммутациях силовых ключей преобразователя. С увеличением длины силового кабеля, влияние негативных факторов усугубляется.

С целью недопущения вышеуказанных последствий, применяют сглаживающие устройства, а именно синус фильтры или, как их называют по-другому, LC-фильтры. Синус-фильтры представляют собой пассивные устройства на основе трёхфазного дросселя и батареи конденсаторов [1].

На рисунке 1 представлена топология LC-фильтра.

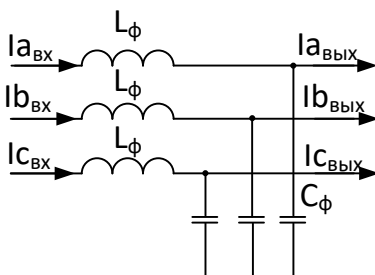


Рис. 1 – Выходной LC-фильтр

Задача LC-фильтра состоит в смещении резонансного пика системы в область низких частот, отстоящую с запасом от частоты ШИМ и собственных резонансных частот системы. Смещение резонансного пика достигается соответствующим выбором параметров фильтра при его настройке на выбранную резонансную частоту f_p . Авторами [2] предлагается выбор резонансной частоты f_p из соотношения:

$$f_p \leq \frac{f_{\text{ШИМ}}}{2}, \quad (1)$$

где $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ.

В общем виде, резонансная частота настройки LC- фильтра определяется выражением:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\phi C_\phi}}, \quad (2)$$

где L_ϕ – индуктивность фильтра; C_ϕ – емкость фильтра.

На рисунке 2 представлена схема выходного RLC-фильтра.

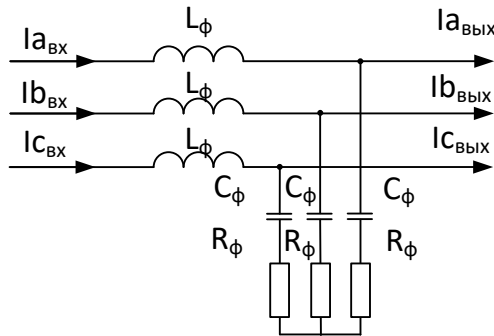


Рисунок 2 – Выходной RLC-фильтр

Для ограничения токовой загрузки элементов фильтра возможен вариант применения активного сопротивления, включенного последовательно с емкостным элементом LC-фильтра. Авторами [3] предлагается применение RLC- фильтра. Подход по расчету индуктивности, емкости, остается аналогичным подходу, представленному выше, расчет активного сопротивления представляется следующей зависимостью:

$$R_\phi = \sqrt{\frac{4L_\phi}{C_\phi}}. \quad (3)$$

Частота резонанса фильтра при этом остается на том же значении, определяемой соотношением (1).

Без применения фильтра в системах высоковольтного ЭП, передающих питание по кабельным линиям возможны режимы работы, не удовлетворяющие требованиям ГОСТ 32144-2013 в области показателей синусоидальности формы напряжений. Применение LC-фильтров (синус-фильтров) различных топологий позволяет достичь требуемых показателей синусоидальности формы напряжений и токов при выполнении условия разнесения собственных резонансных частот в системе с резонансной частотой, на которую выполняется настройка фильтра.

Литература:

1. О синус-фильтре для частотно-регулируемого асинхронного электропривода [Электронный ресурс] // https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/32040/1/eskie_2015_62.pdf (Дата обращения: 28.11.22).

2. X. Liang, N. C. Kar and J. Liu, "Load filter design method for medium voltage drive applications in electrical submersible pump systems," 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 2014, pp. 1-14.

3. Y. Sozer, D. A. Torrey and S. Reva, "New inverter output filter topology for PWM motor drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no. 6, pp. 1007-1017.

НАБЛЮДАТЕЛЬ ЭДС ВРАЩЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА

Н.С. Антипин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kolya1607@mail.ru**

Научный руководитель: Нос О. В., д-р техн. наук, доцент

В работе рассматривается алгоритм бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при питании от автономного инвертора напряжения с ШИМ, реализованный на базе наблюдателя в координатах состояния α , β , работающего в скользющем режиме.

The paper considers a sensorless field-oriented vector control of synchronous motor with permanent magnets supplied by a PWM voltage source inverter based on a sliding mode observer in the state α , β coordinates.

Введение

В настоящее время синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) широко применяются в составе различного рода высокоточных систем позиционирования и слежения в аэрокосмической отрасли, в качестве основного тягового источника энергии в беспилотных летательных аппаратах, в координатных столах металлорежущих станков и т. д. [1], что обусловлено рядом достоинств синхронной электрической машины по отношению к другим типам электромеханических преобразователей энергии, например, асинхронному двигателю с короткозамкнутым или фазным ротором, в число которых входит высокая удельная мощность, КПД и надежность, а также простота конструкции и технологичность в изготовлении [2]. Помимо этого, постоянство магнитного потока обеспечивает высокое быстродействие при формировании электромагнитного момента в темпе переходных процессов по фазным токам статора.

Для высококачественного прецизионного регулирования механических координат СДПМ в рамках векторного управления с ориентацией продольной оси по опорному вектору потокосцепления ротора (СВУ) необходимо иметь текущую информацию об угловом положении магнитной системы вращающейся части электрической машины, которую можно получить за счет установки на валу соответствующего датчика, например, абсолютного или инкрементального энкодера, либо при помощи организации специальной динамической подсистемы оценки переменных состояния. В первом случае требуется применение дополнительных измерительных элементов и соответствующего программного обеспечения для обработки и передачи данных, при этом увеличивается стоимость электропривода, а также снижается его надежность из-за высокой чувствительности измерительного устройства к параметрическим возмущениям вследствие негативного влияния внешней среды, по причине чего последний подход является более предпочтительным.

При технической реализации бездатчикового управления СДПМ применяются два практических способа определения текущих значений углового положения и частоты вращения ротора, в первом из которых используется высокочастотный сигнал, добавляемый в задание на вектор выходного напряжения инвертора, что приводит к росту среднеквадратичных потерь и снижению помехозащищенности, а во втором используются специальные вычислительные алгоритмы определения потокосцеплений или ЭДС статора, содержащих в себе информацию об электрическом угле поворота вала, построенные на базе наблюдателя состояния. При этом, в зависимости от класса законов

получения оценок неизмеряемых координат, представляется возможным осуществлять движение изображающей точки вдоль поверхности разрыва в скользящем режиме, благодаря чему достигается высокое быстродействие и малая чувствительность к проявлению нестационарных и нелинейных свойств объекта [3].

НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ СДПМ В СКОЛЬЗЯЩЕМ РЕЖИМЕ

При общепринятых допущениях и питании неавтономного СДПМ от автономного инвертора напряжения на базе мостовой схемы с IGBT-модулями, векторно-матричное уравнение электрического равновесия напряжений фазных обмоток статора в неподвижной системе координат α, β имеет следующий вид

$$\frac{d\mathbf{I}_s}{dt} = L_s^{-1}(\mathbf{U}_s - R_s \mathbf{I}_s - \mathbf{E}_s), \quad (1)$$

где R_s – активное сопротивление; $\mathbf{U}_s, \mathbf{I}_s$ – двумерные векторы-столбцы напряжений и токов статора соответственно; L_s – диагональная матрица индуктивностей; \mathbf{E}_s – ЭДС вращения статора, определяемая как

$$\mathbf{E}_s = (e_\alpha \quad e_\beta)^T = \frac{d\gamma_e}{dt} \Psi_r \begin{pmatrix} -\sin \gamma_e \\ \cos \gamma_e \end{pmatrix}^T,$$

здесь T – символ транспонирования; $\Psi_r = \text{const}$ – двумерный вектор-столбец потокосцеплений ротора от действия постоянных магнитов;

γ_e – электрический угол поворота ротора.

Воспользовавшись дифференциальным уравнением (1) в α, β -координатах состояния [3], представим математическую модель наблюдателя алгебраического вектора токов статора как

$$\frac{d\hat{\mathbf{I}}_s}{dt} = L_s^{-1}(\mathbf{U}_s - R_s \hat{\mathbf{I}}_s - \mathbf{E}_s) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\varepsilon}), \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{I}_s - \hat{\mathbf{I}}_s$ – ошибка наблюдения; $\mathbf{G}(\boldsymbol{\varepsilon})$ – стабилизирующая добавка, предназначенная для отработки ненулевых начальных условий с желаемым качеством, которая выбирается как

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{H} \text{sign}(\mathbf{I}_s - \hat{\mathbf{I}}_s), \quad (3)$$

где \mathbf{H} – диагональная матрица коэффициентов передачи; $\text{sign}(\bullet)$ – кусочно-постоянная функция знака вещественного аргумента, принимающая дискретные значения ± 1 , откуда после подстановки (3) в (2) окончательно получаем

$$\frac{d\hat{\mathbf{I}}_s}{dt} = L_s^{-1}(\mathbf{U}_s - R_s \hat{\mathbf{I}}_s - \mathbf{E}_s) + \mathbf{H} \text{sign}(\mathbf{I}_s - \hat{\mathbf{I}}_s) \quad (4)$$

Для достижения конечной цели наблюдения, заданной в виде предельного требования

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{\varepsilon}(t) = 0, \quad (5)$$

проанализируем уравнение динамики наблюдателя Люенбергера по ошибке, которое получается путем вычитания из математической модели СДПМ (1) уравнения (4)

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(t) = -L_s^{-1} R_s \boldsymbol{\varepsilon}(t) - \mathbf{H} \text{sign}(\boldsymbol{\varepsilon}) + \mathbf{E}_s. \quad (6)$$

Как нетрудно заметить из (6), для асимптотической устойчивости процессов (2) и соблюдения (5) требуется, чтобы ошибка и ее первая производная имели обратные знаки [3], в результате чего становится справедливым

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{H} \text{sign}(\hat{\mathbf{I}}_s - \mathbf{I}_s),$$

т. е. оценка ЭДС статора численно равна обратной по знаку стабилизирующей добавке, в результате чего электрическое угловое положение находится как

$$\hat{\gamma}_e = -\text{tg}^{-1}(\hat{e}_\beta^{-1} \cdot \hat{e}_\alpha),$$

а угловая скорость ротора получается при помощи дифференцирования

$$\hat{\omega} = z_p^{-1} \frac{d\hat{\gamma}_e}{dt},$$

здесь z_p – число пар полюсов СДПМ.

Для исключения пульсационной составляющей в сигналах оценки \hat{e}_α и \hat{e}_β на выход динамической подсистемы (4) устанавливается фильтр низких частот (ФНЧ) с передаточной функцией вида

$$W_{\text{ФНЧ}}(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f},$$

где s – оператор Лапласа; ω_f – частота сопряжения ФНЧ,

на основании чего окончательно вектор ЭДС вращения статора вычисляется по следующей формуле

$$\hat{\mathbf{E}}_s = W_{\text{ФНЧ}}(s) \cdot \mathbf{H} \text{sign}(\hat{\mathbf{I}}_s - \mathbf{I}_s).$$

В работе рассмотрены вопросы построения наблюдателя алгебраического вектора ЭДС вращения СДПМ в скользящем режиме, предназначенного для получения текущей информации о не измеряемых координатах механической части электропривода, которые

используются для построения системы векторного управления частотой вращения ротора без датчика на валу.

Литература

1. Избранные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие / В. В. Панкратов, О. В. Нос, Е. А. Зима. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 223 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

2. The simplified control technique for PMSM torque ripple reduction [Electronic resource] / O. V. Nos, D. A. Shtein, G. S. Leus, N. I. Nos, E. E. Abramushkina, E. A. Ignatev // 21 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): proc., Altai Republic, 29 June – 3 July 2020. – Novosibirsk: IEEE, 2020. – P. 475–481. Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9153527>. – Title from screen DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153527.

3. Nos O. V. The sliding-mode observer for PMSM sensorless control with adaptive complex-coefficient filter and PLL / O. V. Nos, T. V. Pudkova, S. A. Kharitonov. – DOI 10.1109/TSCZh58792.2023.10233364. – Text: direct // 20 Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh): proc., Moscow, 13–14 Apr. 2023. – Moscow: IEEE, 2023. – P. 44–49. – ISBN 979-8-3503-2407-5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ УГЛА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА АВТОНОМНУЮ ЭНЕРГОСИСТЕМУ

Д.Н. Белкова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, belkova34diana@gmail.com**

Научный руководитель: В.Н. Аносов, д.т.н., профессор

Данное исследование посвящено анализу воздействия пульсаций угла управления в системе тиристорного электропривода на работу автономной энергосистемы с газотурбинной установкой (ГТУ). Тиристорные электроприводы широко применяются в различных областях, включая промышленность и энергетику. Однако изменения в угле управления в результате неправильно синтезированных регуляторов или цифровых фильтров могут влиять на стабильность и эффективность работы энергосистемы. В работе проведено моделирование автономного энергорайона с тиристорным выпрямителем с имитацией низкочастотных колебаний угла

управлений. Анализируются изменения токов и напряжений в электрической сети, а также возможное губительное влияние на элементы энергосистемы.

This study is dedicated to the analysis of the impact of control angle pulsations in a thyristor electric drive system on the operation of an autonomous energy system with a gas turbine unit (GTU). Thyristor electric drives are widely employed in various sectors, including industry and power generation. However, variations in the control angle due to improperly synthesized controllers or digital filters can affect the stability and efficiency of the energy system. The study involves modeling an autonomous energy area with a thyristor rectifier simulating low-frequency oscillations of control angles. Changes in currents and voltages in the electrical network are analyzed, along with potential detrimental effects on the elements of the energy system.

Электроприводы с тиристорным выпрямителем имеют свои преимущества и недостатки, и выбор такого вида преобразователей зависит от конкретных требований проекта, бюджета, и условий эксплуатации системы. И к настоящему времени теория и схемотехника вентильных преобразователей электроэнергии с фазовым управлением полностью сложилась [1]. Ввиду того, что все преобразователи работают на стабилизацию выходного напряжения, то при изменении нагрузок УВ на тиристорах способен создавать субгармонические колебания входного тока выпрямителя с частотой, которая способна «плавать» в некоторых пределах, т.к. преобразователь вносит в систему дополнительный фазовый сдвиг из-за несоответствия между входным и выходными сигналами [2].

Для возможности анализа режимов работы при различных возмущающих воздействиях, а также разработки дополнительного силового оборудования была разработана имитационная математическая модель автономной энергосистемы с ГТУ и тиристорным выпрямителем (Рис.1) в программе российского производства для динамического моделирования SimInTech.

В модели представлена ГТУ мощностью 25 МВт с упрощенной системой автоматического регулирования напряжения (АРН) с интегральным регулятором. Линейные нагрузки представляют собой активно-индуктивные нагрузки с суммарной мощностью 6 МВт. Также для уменьшения реактивной мощности от линейных нагрузок установлен блок устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ). Нелинейная нагрузка мощностью примерно 650 кВт моделируется как тиристорный выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой с С-фильтром для поддержания напряжения в звене постоянного тока, что может служить упрощенной версией тиристорного электропривода. Для уменьшения обратного влияния тиристорного выпрямителя на входе установлен LC-фильтр.

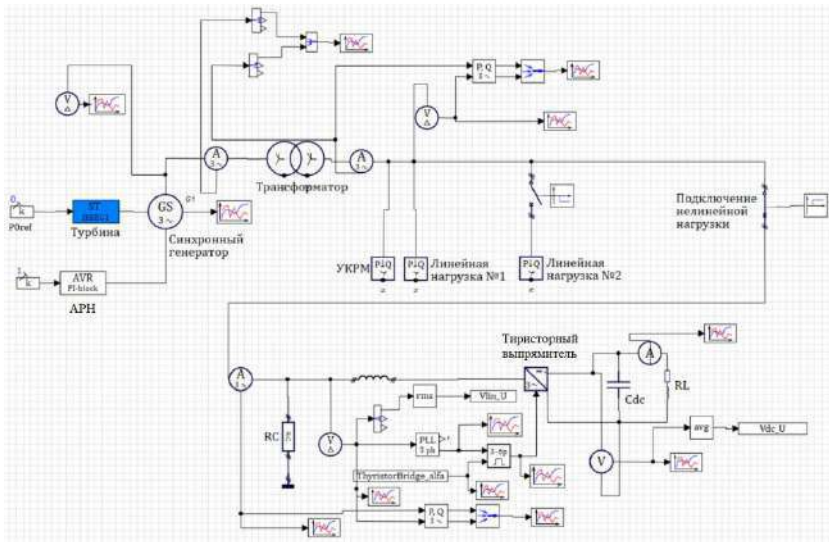


Рис. 1 – Имитационная модель автономной энергосисты с ГТУ и тиристорным выпрямителем в SimInTech

В рамках первого этапа исследования была создана упрощенная система регулирования угла управления α (Рис. 2) с обратной связью по напряжению в звене постоянного тока и имитацией колебаний угла α , как возмущение в результате сброса нагрузки.

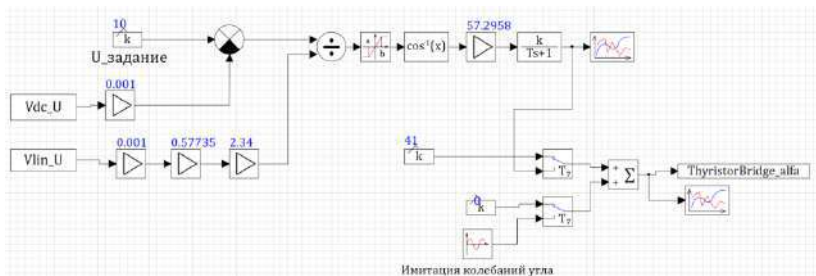


Рис. 2 – Упрощённая система регулирования угла управления тиристорным выпрямителем

На Рис. 3 представлены действующие значения напряжения и тока на выходе генератора, скорость вращения ротора (соответствующие 1500 об/мин) на времени моделирования $t = 250$ с.

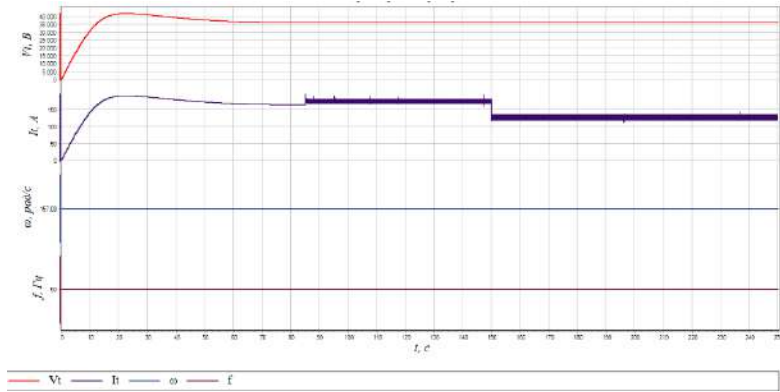


Рис.3 – Параметры генератора

В момент времени $t = 150$ с моделируется сброс нагрузки мощностью 3 МВт с колебанием угла примерно 7% от задания. На Рис. 4 после сброса нагрузки низкочастотные колебания действующего значения тока проявляются, но в малом процентном соотношении (1%). Более явно влияние колебаний угла управления сказывается на потребляемую мощность (Рис. 5).

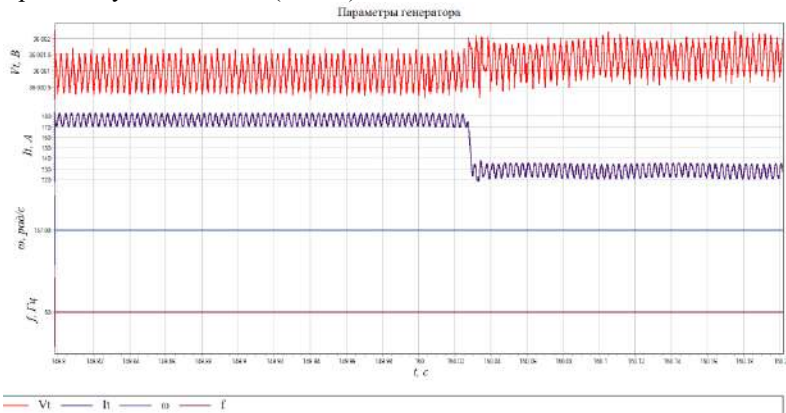


Рис.4 – Параметры генератора в момент сброса нагрузки

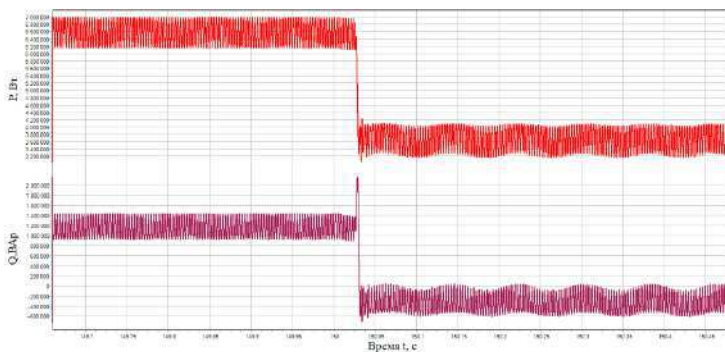


Рис.5 – Графики мощностей с наличием низкочастотной составляющей

Заключение

Данная имитационная модель в дальнейшем позволит также исследовать более детально влияние алгоритмов управления тиристорным выпрямителем и соотношения линейных и нелинейных (частотно-регулируемых приводов) нагрузок на возникновение таких аварийных событий, как субсинхронный резонанс [3].

Литература

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Изд. 4-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 672 с.
2. Шипилло В. П. Автоматизированный вентиляльный электропривод. М.: Энергия, 1969 – 400 с.
3. Трунин Е. С., Тараканов В. М., Бойкин С. П. [и др.]. Крутильные колебания на ГТУ и возможность распада изолированной энергосистемы // Электрические станции. 2017. № 1 (1026). С. 20–24.

ИНТЕГРАЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ И СОРТИРОВОЧНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ

Э.В. Дегтяренко, А.А. Иванов, С.Е. Бузин
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, deg1907@mail.ru
Научный руководитель: Попов Н.С., к.т.н.,
доцент кафедры ЭАПУ, зам. Декана ФМА

Сортировка является одним из первоначальных этапов многих технологических процессов создания какого-либо изделия в рамках производственной линии. Поскольку на большинстве производств, процесс сортировки выполняется вручную, то в условиях общей автоматизации данная операция часто является «узким местом», что актуально для большинства производств.

Работа посвящена исследованию методов автоматической сортировки с использованием различных технических решений на базе 6-ти осевого робота манипулятора.

Sorting is one of the initial stages in most technological processes for producing any product within a production line. Since in many manufacturing settings, the sorting process is often done manually, it becomes a bottleneck in the overall automation, which is relevant for most industries.

This work is dedicated to the investigation of methods for automatic sorting utilizing various technical solutions based on a 6-axis robotic manipulator.

Использование 6-ти осевого робота-манипулятора в процессе автоматической сортировки является универсальным решением, позволяющее решать широкий спектр задач. Помимо сортировки, робот-манипулятор может выполнять смежные задачи на одном участке, тем самым, сокращая временные затраты на перемещение деталей, что позволяет сократить издержки.

Универсальность в сортировке достигается следующими решениями:

1. Использование различных захватов;
2. Применение системы технического зрения;
3. Внедрение дополнительных модулей;
4. Алгоритмы с использованием нейронных сетей.

Применение различных типов захватов позволяет адаптировать робот-манипулятор к разнообразным формам и размерам сортируемых объектов, обеспечивая высокую гибкость в производственных задачах. Использование мягких захватов представляет собой еще один ключевой аспект улучшения гибкости и эффективности процесса сортировки. Мягкие захваты, выполненные из гибких материалов или

оборудованные сенсорами, позволяют роботу бережно и безопасно обращаться с различными типами продукции, включая хрупкие или нестандартные объекты.

Эти захваты способны адаптироваться к различным формам и поверхностям объектов, обеспечивая более надежное и стабильное схватывание. Такой подход особенно полезен в условиях переменных параметров продукции, где требуется быстрая реконфигурация системы для обработки разнообразных деталей. Этот аспект подчеркивает не только эффективность, но и безопасность использования робота-манипулятора в промышленных сценариях, где минимизация потерь и повреждений имеет стратегическое значение для оптимизации производственных процессов.

Интеграция системы технического зрения позволяет роботу "видеть" и распознавать объекты, что оптимизирует точность сортировки и повышает эффективность процесса благодаря адаптивному поведению в реальном времени.

Одним из ключевых преимуществ такого подхода является способность робота к адаптивному поведению в реальном времени. Система технического зрения обеспечивает непрерывный мониторинг и анализ окружающей обстановки, позволяя роботу быстро реагировать на изменения в производственной среде. Это особенно важно при сортировке объектов с переменными параметрами, такими как размер, форма или цвет.

Точность распознавания объектов системой технического зрения существенно улучшает эффективность сортировки, поскольку робот может точно определить положение и характеристики каждого объекта. Это снижает количество ошибок сортировки и повышает общую производительность системы [1]. Кроме того, возможность быстрой адаптации к новым объектам или изменениям в производственном процессе делает такую систему технического зрения важным элементом для роботизированных систем сортировки в динамичных промышленных условиях.

В условиях реальных технических задач, процесс сортировки требует внедрение совокупности различных систем, тем самым, образуя робототехнический комплекс (РТК) [2]. РТК представляет собой инновационное решение, основанное на модульном принципе, что позволяет эффективно адаптировать систему к различным производственным задачам. Модульность комплекса обеспечивает гибкость в выборе и комбинировании компонентов в зависимости от конкретных требований производства.

Совместное использование 6-ти осевого робота-манипулятора, системы технического зрения и применение нейронных сетей позволяет достигнуть высокую эффективность сортировки, за счет высокой точности и универсальности[3].

Наиболее распространённая проблема производства заключается в широкой номенклатуре деталей, часть которых заказывается у стороннего производителя. Для дальнейшего следования деталей по технологическому маршруту, требуется сортировка, при этом входные и выходные параметры данной операции являются различными. Таким образом, за счет использования РТК, можно добиться универсального решения[4].

Благодаря использованию мягкого захвата, производитель может избежать возможных дефектов при манипулировании деталями, тем самым снизив процент брака. Использование нейронных сетей, позволит РТК быстро производить перенастройку в зависимости от входных и выходных параметров, а использование системы технического зрения увеличивает степень точности и простоту получения входных и выходных параметров.

Заключение:

Представленная работа освещает значимость интеграции робототехники и сортировочных систем для создания интеллектуальных производственных линий. Использование 6-ти осевого робота-манипулятора в автоматической сортировке представляет собой универсальное и эффективное решение, способное справляться с разнообразными задачами. Работа подчеркивает важность универсальности в сортировке, достигаемой за счет различных захватов, системы технического зрения, дополнительных модулей и алгоритмов на основе нейронных сетей.

Литература:

1. Nikolaus Correll, Bradley Hayes. Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms. – 2022. – С. 74-96.
2. Bruno Siciliano, Lorenzo Sciacicco, Luigi Villani ,Giuseppe Oriolo Robotics: Modelling, Planning and Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).–2008. – С.309-310.
3. Артем Демиденко. Машинное обучение. Погружение в технологию . – 2023. –С. 19-25.
4. Mikell P. Groover, Mitchell Weiss, Roger N. Nagel , Nicholas G. Odrey. Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. – 1986. – – С. 363-378.

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

М.В. Зеленин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, propik22@mail.ru

Научный руководитель: Попов Н.С. – к.т.н., доцент каф. ЭАПУ

Электродвигатели широко используются во многих отраслях промышленности, и их выход из строя может привести не только к повреждению оборудования, но и к множеству других проблем, таких как финансовые потери, травмы работников и т.д. В результате появляется значительный простор использования искусственного интеллекта для диагностирования неисправностей. В последние годы были задокументированы интересные результаты исследований по диагностике неисправностей электродвигателей. Машинное обучение при обнаружении неисправностей электрооборудования показало сравнительно лучшие результаты, чем традиционные подходы, благодаря более сложным алгоритмам оценки показателей с датчиков.

Electric motors are widely used in many industries, and their failure can lead not only to equipment damage, but also to many other problems such as financial losses, worker injuries, etc. As a result, there is significant scope for using artificial intelligence to diagnose faults. In recent years, interesting research results on fault diagnosis of electric motors have been documented. Machine learning in detecting faults in electrical equipment has shown comparatively better results than traditional approaches, thanks to more complex algorithms for assessing indicators from sensors.

Электрический асинхронный двигатель является наиболее распространенной электрической машиной в современном производстве и повседневной жизни. Поэтому отказ или остановка электродвигателя несет не только вред самому оборудованию, но также приводит к значительным экономическим потерям, риску жизни работников, загрязнению окружающей среды и т.д.

Технология диагностики неисправностей позволяет обнаруживать дефекты двигателя на ранних стадиях их развития, что позволяет проводить быстрый ремонт, экономить время и деньги на устранение неисправностей, а также увеличивать экономическое преимущество, избегая остановок производства в будущем. Традиционные подходы к диагностике неисправностей требуют искусственного извлечения значительного количества данных о характеристиках частотно-временной области, температуры, вибрационных характеристик.

Решение поставленных задач можно осуществить путем построения функциональной схемы, разработки аппаратно-программного комплекса диагностики технического состояния электродвигателя, алгоритмов комплексного многопараметрического диагностирования электродвигателя, оценки технического состояния электродвигателей, поиска неисправностей трехфазных асинхронных электродвигателей.

При разработке средств, методов и алгоритмов диагностирования целесообразно использовать методы идентификации, компьютерного моделирования, программирования и теории нечёткой логики, надежности, технического диагностирования и прогнозирования.

Построение искусственной нейросети.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) пытается смоделировать нейронную сеть биологического мозга в математической модели. Это набор простых процессоров, соединенных друг с другом, соединениям которого присвоены веса. В соответствии с правилом обучения можно изменить эти веса, поэтому ИНС можно обучить распознавать шаблон с учетом обучающих данных. Существует несколько передаточных функций, таких как \tanh , \sinh и т. д. В литературе предлагается несколько типов структур нейронных сетей. Наиболее используемой структурой является сеть прямой связи. В сети, может быть, несколько скрытых слоев. На рисунке 1 показаны два скрытых слоя. В этой сети количество входных узлов и количество выходных узлов определяется количеством идентифицируемых шаблонов. Количество узлов скрытого слоя выбирается для приложения, как правило, методом проб и ошибок. Нейронную сеть необходимо обучить так, чтобы она могла идентифицировать выходные шаблоны, соответствующие входному шаблону. В литературе предлагается несколько типов алгоритмов обучения. Обратное распространение ошибки — один из самых популярных алгоритмов.

Нечеткая логика

Понятие нечеткой логики было введено Заде для представления неопределенности в лингвистических терминах и естественного выражения человеческих знаний. С помощью FL можно для устройств управления оценивать такие неизмеримые понятия, как тепловые ощущения (горячее, теплое, холодное и т. д.). С другой стороны, FL является расширением булевой логики, которое допускает промежуточные значения между ЛОЖЬ (0) и ИСТИНА (1), например, МОЖЕТ БЫТЬ (0,5). Это означает, что нечеткое значение — это любое значение в диапазоне от 0 до 1. На практике нечеткая система может получать определенные знания, которые позволяют ей принимать решения с высоким процентом точности. Эти знания, выраженные в

правилах и функциях принадлежности, получены в результате изучения, в данном случае асинхронного двигателя, посредством инженерного опыта. В качестве основных трудностей представлены отсутствие надлежащей обработки нечетких входных данных и построения функций и правил принадлежности.

Сложность модели машинного обучения связана с ее разработкой и процедурами обучения. Несмотря на то, что существует много литературы по реализациям в системах диагностики неисправностей, они требуют предварительного понимания архитектуры. Глубокое обучение в настоящее время разрабатывается с использованием различных компьютерных языков, включая MATLAB, R и Python. Диагностические характеристики программного модуля могут различаться из-за разных типов кодирования и процедур обучения. Архитектура модели глубокого обучения оказалась сложной в обучении в течение предыдущих нескольких десятилетий. Процесс обучения зависит от характеристик входных данных (т. е. процесса сегментации, размера набора данных, параметров и гиперпараметров алгоритма глубокого обучения). Реализация системы реального оборудования является еще одной серьезной проблемой при диагностике неисправностей электродвигателей.

В экспериментальной установке (рисунок 1.) использовался Трехфазный электродвигатель BA160S8 (1), два вибродатчика (2.3) модель 8315D Брюль и Кьер, датчик температур (4) DS18B20, аналого-цифровой преобразователь NI 6251 и ПК.



Рис. 1 Экспериментальная установка

Заранее неисправности занесены в двигатели, в качестве системы нагрузки используется генератор, питающийся от банка сопротивлений для вариаций тока возбуждения. Случайным образом было собрано более 500 вибрационных сигналов, температурных измерений при различных токах. Для сбора данных использовалось устройство сбора

данных NI-6251. Для реализации алгоритма сбора данных использовалось программное обеспечение MATLAB.

С помощью языка программирования python 3.11 будет разработана нейросеть которая способна будет анализировать двигатели на неисправности опираясь на базу данных полученную в предыдущих опытах.

Выводы

В ходе проведенных испытаний и применение полученный базы данных для разных токов, мы получили выводы, что для обучения нейронной сети нужно более масштабные испытания и алгоритм обучения НС. Ожидается, что будущие улучшения в теоретических исследованиях ускорят развитие глубокого обучения и предоставят более подробные инструкции как по улучшению, так и по использованию теорий глубокого обучения. В этом исследовании кратко представлена методологическая структура наиболее часто используемых моделей глубокого обучения, включая их применение для диагностики неисправностей асинхронных двигателей, которые используются в обрабатывающей промышленности.

Литература:

1. *Dang, Z.; Lv, Y.; Li, Y.; Wei, G.* A fault diagnosis method for one-dimensional vibration signal based on multiresolution tIsDMD and approximate entropy. *Shock Vib.* **2019**, 2019, 1–32.
2. *Петухов В. С.* Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // *Новости электротехники.* 2008. No 1 (49).
3. *Бахарев А. В., Умурзакова А. Д.* Проблемы, связанные с отказом электрооборудования, на примере трехфазного асинхронного электродвигателя // *Россия молодая: материалы X Всерос.науч.практ.конф. молодых ученых.* Кемерово: Изд.во Кузбасского гос. техн. ун-та, 2018. 5 с.
4. *Богданов Е. А.* Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006. 279 с.
5. *Петухов В. С., Соколов В. А.* Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // *Новости электротехники.* 2005. No 1 (31). С. 50–52.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С 6 И 8 НЕСУЩИМИ ВИНТАМИ

А.С. Нагорный

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, andrey-s-n2016@yandex.ru

Научный руководитель: Нос О.В., д.т.н., профессор

В статье рассмотрены беспилотные летательные аппараты с электродвигателями в качестве силовой установки с точки зрения их энергетической эффективности. Рассмотрена зависимость времени полета таких летательных аппаратов от их веса. Проведен сравнительный анализ энергетической эффективности гексакоптера и октокоптера.

The article discusses unmanned aerial vehicles with electric motors as a power plant from the point of view of their energy efficiency. The dependence of the flight time of such aircraft on their weight is considered. A comparative analysis of the energy efficiency of a hexacopter and an octocopter is carried out.

Основным недостатком Беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), использующих в качестве метода приведения в движение исключительно электрическую тягу, то есть электродвигателя, питаемые от аккумуляторов, является сравнительно очень малое время полета, и как следствие его дальность [1]. Второй же основной тип БПЛА, который использует в качестве источника энергии жидкое топливо в качестве источника энергии, а именно БПЛА с тягой от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) имеет значительно большее время полета [2]. Помимо этих двух основных типов БПЛА, существуют так же гибридные варианты, включающие, БПЛА с жидким топливом и электрическими двигателя и БПЛА с водородными ячейками и электрическими двигателя. Дополнительно такие БПЛА могут снабжаться солнечными панелями для ещё большей дальности полета, но качественно работает такая доработка на больших высотах, от 10 километров.

Следовательно, возможность повысить время и дальность полета для БПЛА на электрической тяге является важным аспектом для исследования. Одним из уязвимых мест такого рода БПЛА являются твердотельное топливо – аккумуляторы. Энергетическая эффективность литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов, которые в основном и используются для БПЛА с электрической тягой в 10-ки раз меньше, чем у жидкого топлива, бензина или же дизельного топлива [2]. Литий-воздушные и щелочные аккумуляторы имеют в несколько раз большую энергетическую эффективность [2], но при этом являются

фактически одноразовыми, некоторые модели можно перезаряжать не более 20 раз, поэтому данные варианты экономически не целесообразны. Поэтому уйти от использования стандартных аккумуляторов БПЛА возможно только в исключительных случаях для редкого использования, например, экстренно доставить медикаменты в немного более удаленный регион [3], нежели способен стандартный БПЛА, но зачастую в таких случаях используют уже БПЛА на жидком топливе, поскольку их дальность полета значительно выше.

Так же помимо непосредственного повышения времени полета, в некоторых случаях, возможно оптимизировать маршрут. Такой метод применяется в основном для инспекций и мониторинга [4]. В этом случае подбираются точки мониторинга, на которых БПЛА будет останавливаться для проведения инспекции. Точки подбираются так, чтобы охватить всю площадь инспекции. Затем подбирается маршрут и количество БПЛА для инспекции. Следовательно, от качества такого подбора зависит общая длина маршрута, что является крайне важным, поскольку дальность полета БПЛА с электрической тягой крайне ограничена. Правильно подобранный маршрут позволяет уменьшить количество используемых БПЛА, или если БПЛА один, количество его вылетов. Постепенно для использования БПЛА в этих целях и не только начинают внедрять нейронные сети [4, 5]. Применение нейросетей позволяет быстро и эффективно работать со сложными и запутанными задачами, а также применять одну готовую нейросеть для любого количества схем инспекций. При этом нейросети подготовленные для работы с БПЛА имеет высокое качество и точность [4, 5].

Но время и дальность полета во многом определяется весом БПЛА с тягой на основе электродвигателей. Экспериментальные данные показывают, что расход заряда батареи нелинейно возрастает с увеличением веса БПЛА [1, 5, 6]. В источнике [1] в качестве примера используется БПЛА на электрической тяге весом 10кг. И экспериментально показано, что после увеличения веса БПЛА в полтора раза посредством добавления полезной нагрузки, его время полета снизилось более чем в два раза. Эти данные и отражают нелинейную зависимость времени полета от веса БПЛА. А с учетом того, что аккумуляторы имеют низкую энергетическую эффективность и в среднем занимают 35-40% от всего веса БПЛА [1] важно понимать эту зависимость более подробно. Что бы корректно оперировать данным типом БПЛА с точки зрения его веса.

В источнике [1] продемонстрирована зависимость времени полета от веса для гексакоптера, то есть БПЛА с шестью несущими винтами, DJI Matrice 600. Основные характеристики данной модификации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики БПЛА DJI Matrice 600

№	Характеристики БПЛА	Модель	Показатели
1.	Вес, кг		9,8
2.	Электродвигатель	DJI 6010	
3.	Пропеллер	DJI 2170	
4.	Количество электродвигателей/пропеллеров		6
5.	Аккумулятор, емкость, МАч	TB48S	5700
6.	Вес аккумулятора, кг		0,68
7.	Количество аккумуляторов		6
8.	Время полета без полезной нагрузки, мин		40

Как видно из данных таблицы 1, аккумуляторы составляют 42% от всего веса БПЛА без учета полезной нагрузки. Связано это с низкой энергоэффективностью аккумуляторов. Октакоптер, то есть БПЛА с восьмью несущими винтами, на платформе предыдущего гексакоптера будет в среднем на 22-23% тяжелее своего аналога [1]. За счет двух дополнительных электродвигателей и пропеллеров, двух несущих балок конструкции, расширенного корпуса, а так же двух дополнительных аккумуляторов, на каждый из двигателей. Но при этом летный контроллер остается неизменным, и ширина корпуса изменяется не столь значительно. С учетом того, что вес конструкции уже значительно больше, использовать аккумуляторы увеличенной емкости, а соответственно и увеличенного веса нецелесообразно. Поэтому за счет дополнительных аккумуляторов общая итоговая емкость аккумуляторов на борту БПЛА увеличится на 25%. Так как у оксакоптера два дополнительных двигателя, расход энергии на каждом несколько меньше [1].

Зная все вышеперечисленные параметры и зависимость времени полета от веса [1] можно рассчитать, насколько будет отличаться время полета октакоптера от времени полета гексакоптера на одной и той же базе по формуле 1:

$$T_8 = T_6 \cdot \frac{K_A \cdot K_{FT}}{K_w \cdot K_D} \quad (1)$$

Где T_8 – время полета октакоптера, T_6 – время полета гексакоптера, $K_A = 1,25$ – коэффициент емкости аккумулятора, $K_{FT} = 0,73$ – коэффициент значения времени полета от веса [1], $K_D = 0,88$ – коэффициент расхода энергии электродвигателем, $K_w = 1,22$ – коэффициент веса.

Следовательно, время полета оксакоптера относительно гексакоптера DJI Matrice 600 на одной и той же платформе равно:

$$T_8 = 40 \cdot \frac{1,25 \cdot 0,73}{1,22 \cdot 0,88} = 34 \text{ (мин)} .$$

Теоретические расчеты по формуле (1) показывают, что при условии одной и той же базы октокоптер будет иметь приблизительно на 15% меньшее время полета без использования полезной нагрузки. Эти расчеты подтверждаются данными о нелинейном возрастании расхода энергии при увеличении веса [1]. Так как двигателя и аккумуляторные батареи являются самыми тяжелыми элементами БПЛА, то несмотря на прибавку в мощности за счет двух дополнительных двигателей, избыточный вес отрицательно сказался на времени полета. Следовательно, теоретически БПЛА с 6 несущими винтами (гексакоптеры) энергетически более выгодны, чем БПЛА с 8 несущими винтами (октокоптеры).

Литература:

1. Matthew Stuart, Scot Martin Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations // Nova Science Publishers, 2021.
2. *Schroth F.* Drone Energy Sources – Pushing the Boundaries of Electric Flight [Electronic resource] // Drone Industry Insights, Hamburg, June 2017. – Hamburg, 2017. – URL: <https://www.droneii.com/drone-energy-sources/> (accessed: 20.08.2020).
3. Kristin Flemons, Barry Baylis, Aurang Zeb Khan, Andrew W. Kirkpatrick, Ken Whitehead, Shahab Moeini, Allister Schreiber, Stephanie Lapointe, Sara Ashoori, Mishal Arif, Byron Berenger, John Conly, Wade Hawkins The use of drones for the delivery of diagnostic test kits and medical supplies to remote First Nations communities during Covid-19 // American Journal of Infection Control, Vol. 50 Iss. 8, August 2020.
4. Yamin Yan, Yongtu Liang, Haoran Zhang, Wan Zhang, Huixia Feng, Bohong Wang, Qi Liao A two-stage optimization method for unmanned aerial vehicle inspection of an oil and gas pipeline network // Petroleum science, 458 – 468 pp., March 2019.
5. R. Santos, D. Ribeiro, P. Lopes, R. Cabral, R. Calçada Detection of exposed steel rebars based on deep-learning techniques and unmanned aerial vehicles // Automation in Construction, Vol. 139, July 2022.
6. P.G. Martina, S. Kwong, N.T. Smith, Y. Yamashiki, O.D. Payton, F.S. Russell-Pavier, J.S. Fardoulis, D.A. Richards, T.B. Scott 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 52, October 2016.

ИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» В ЛИФТОВЫХ МЕХАНИЗМАХ

М.С. Осипов

Новосибирский государственный технический университет,

Новосибирск, flatterpat@gmail.com

Научный руководитель: Попов Н.С., к.т.н.,

доцент кафедры ЭАПУ, зам. декана ФМА

Применение системы "Преобразователь частоты – асинхронный двигатель" в лифтовых механизмах представляет собой современный и эффективный подход к электроприводу лифтов. В данной тезисе рассматриваются основные преимущества этой системы, такие как высокая энергоэффективность, широкие возможности динамического управления, адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации, а также снижение затрат на обслуживание благодаря меньшим механическим износам. Обсуждаются технологические особенности и эксплуатационные преимущества, делающие эту систему предпочтительным выбором для современных лифтовых систем, где важны эффективность, точность управления и надежность в долгосрочной перспективе.

The application of the "Frequency Converter – Asynchronous Motor" system in elevator mechanisms represents a modern and efficient approach to elevator electric drives. This thesis explores the key advantages of this system, including high energy efficiency, extensive dynamic control capabilities, adaptability to changing operational conditions, and reduced maintenance costs due to lower mechanical wear. Technological features and operational benefits are discussed, making this system a preferred choice for contemporary elevator systems where efficiency, precise control, and long-term reliability are crucial.

Лифтовое строительство в нашей стране активно развивается, поскольку этажность современных строений увеличивается. Отсутствие лифта сложно представить в любом высотном здании, сооружении, жилом доме и т.д. Строительные организации в лифтовом хозяйстве ставят перед собой несколько задач, самые важные – это повышение роста качества, комфорта и совершенствование жилищных условий.

Лифт состоит из кабины, противовеса, каната, который связывает кабину и противовес, силовой части, системы управления и системы электропривода лифтовой установки.

Система электропривода необходима для того, чтобы обеспечить такие показатели как высокая производительность и минимальные энергетические и материальные затраты.

Сегодня распространены несколько видов электропривода:

1. Преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ – АДКЗ);
2. Управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока (УВ – ДПТ);
3. Привод с реостатным регулированием скорости [1].

Выбирая между первой и второй системой (выше приведены 3), чаще всего выбор падает на вторую по следующим причинам:

Энергоэффективность: преобразователи частоты в сочетании с асинхронными двигателями обеспечивают более высокую энергоэффективность за счет возможности эффективного управления частотой вращения.

Динамическое управление: для ограничения ускорения и замедления (рывка) необходимо ограничить динамические нагрузки в механической передаче во время переходных характеристик и улучшить комфортные условия для пассажиров [2]. Система «ПЧ – АДКЗ», по сравнению с системой «УВ – ДПТ», обеспечивает более широкие возможности динамического управления, что позволяет точно регулировать скорость движения лифта, обеспечивая более плавный и точный ход.

Адаптивность: Преобразователи частоты позволяют легко адаптироваться к изменяющимся условиям работы и требованиям, что делает систему более гибкой и масштабируемой.

Также, есть еще одна проблема. Известно, что в нашей стране превышен срок эксплуатации от 50 до 70 процентов всех лифтовых установок, а именно, износ подвижных частей лифта.

Именно поэтому вопрос о ремонте и замене лифтовой установки также является актуальным. Существует две основных способа модернизации: частичная и полная замена лифта. В обоих случаях внедрение частотно-регулируемого электропривода оправдано и окупается в минимальные сроки ввиду того, что система "преобразователь частоты - асинхронный двигатель" обычно требует меньших затрат на обслуживание, что важно для обеспечения долгосрочной надежности и экономии операционных расходов.

Эти преимущества делают систему "преобразователь частоты - асинхронный двигатель" более привлекательной для применения в лифтах, особенно в условиях, где важны эффективность, точность управления и снижение затрат на обслуживание.

Литература:

1. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.4.Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.

Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Попов) – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002.

2. СанПиН 2.1.2.1002-00. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям /Требования к лифтам. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.2.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ ШТАНГОВЫМИ НАСОСАМИ В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПРИ ПОМОЩИ PLC-ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ

В.Д. Скотников

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vladskotnikov2003@yandex.ru
Научный руководитель: Попов Н.С., к.т.н.**

В статье рассматриваются технико-экономическая целесообразность и обоснованность применения тех или иных технологий и оборудования передачи данных при различных способах добычи углеводородов в сложных геолого-технических условиях, в связи с необходимостью постоянного планомерного снижения себестоимости добычи углеводородов для скважин, оснащенных штанговыми глубинными насосами (ШГН).

The article considers the technical and economic feasibility and validity of the application of certain technologies and equipment for data transmission in various methods of hydrocarbon production in complex geological and technical conditions, in connection with the need for continuous systematic reduction in the cost of hydrocarbon production for wells equipped with rod depth pumps (RDP).

В нашей стране для промышленной добычи нефти широко используются штанговые глубинные насосы (ШГН), на их долю приходится около 10% всей добываемой нефти и газа.

При этом, уровню автоматизации добывающих установок с ШГН уделяется крайне мало внимания, в том числе в части оптимизации процесса добычи и мониторинга состояния электропривода.

Это связано в том числе с относительно невысокой удельной долей добываемых с помощью ШГН ресурсов в общем объеме и отсутствием мотивации создавать сложные дорогостоящие системы АСУТП для каждого ШГН.

Сложные системы АСУТП строятся на основе промышленного контроллера для сбора и обработки данных в обогреваемом шкафу с

прибором учета, модемом, Wi-Fi модулем либо радиостанцией с антенной.

Подобная комплектация дорогостоящая и сложная в обслуживании из-за наличия множества перечисленных компонентов.

Выход из строя любого из компонентов приводит к прекращению сбора или передачи данных, как о рабочем состоянии электропривода, так и о состоянии различных датчиков.

Основные неисправности при мониторинге ШГН это увеличение или снижение динамического уровня жидкости, попадание газа, образование эмульсии, удар о приемный клапан или удар о верхнюю гайку, утечка в приемном или нагнетательном клапане, запарфинивание, кроме того, электродвигатель непосредственно связан с самым глубинным насосом, как правило, ременной передачей, а приводные ремни подвержены износу и рвутся [1].

Эти неисправности можно фиксировать по основным рабочим параметрам асинхронного электродвигателя – напряжению, току, потребляемой из сети мощности, коэффициенту мощности, так как нагрузка на валу асинхронного электродвигателя практически равна сумме всех механических усилий, приложенных к движущимся частям ШГН, в частности к штоку насоса [2].

Для ШГН достаточно осуществлять контроль рабочего или неисправного состояния электропривода, расхода электрической энергии и самых необходимых датчиков на установке – датчиков охранно-пожарной сигнализации.

Диспетчер получит представление о состоянии каждого насоса на том или ином «кусте» ШГН и направит специалистов для поиска и устранения неисправностей на определенный ШГН.

Для реализации простой и дешевой схемы мониторинга и, в том числе, управления ШГН предлагается использовать технологию Power Line Communication (PLC), которая использует электрическую сеть для передачи данных [3].

При помощи технологии PLC создается канал передачи данных для мониторинга состояния электропривода ШГН и дистанционного управления им с высоким уровнем надежности, так как к любому ШГН подведена электрическая питающая сеть 0,4 кВ, гораздо более устойчивая в отношении различных помех, чем беспроводные сети связи в сложных геолого-технических условиях.

Около каждого ШГН установлен силовой электрический шкаф ввода питания, в котором может быть установлен PLC модем или прибор учета со встроенным PLC модемом.

Затраты на данное оборудование с применением PLC составят несколько десятков тысяч рублей на одну точку, в то время как оборудование каждого ШГН системой АСУТП на базе контроллера, модема, радиостанции и антенны, будет стоить несколько сотен тысяч рублей плюс дорогостоящее обслуживание и наличие в штате высококвалифицированных специалистов.

Литература:

1. G. Guluyev, A. Pashayev, F. Pashayev, A. Rzayev, E. Sabziev Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit // Problems of Cybernetics and Informatics (PCI): IV International Conference. – IEEE. – 2012. – pp. 1–3.

2. Артыкаева Э.М. Определение параметров работы станков-качалок нефти в режиме энергосбережения // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3 – С. 181–187. рдеева Т. А., Жегина И. П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: «Машиностроение», 1978. – 200 с.

3. Компания ТелЛинк [Электронный ресурс] // URL: <https://plcmodem.ru/> (дата обращения: 10.05.2023).

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА В РЕЖИМАХ СНИЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.В. Стоянова, М.С. Попов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск,**

Научный руководитель: Домахин Е.А., к.т.н., доцент

В работе рассматривается имитационная модель для анализа аварийных режимов работы электропривода центробежного насосного агрегата с питанием от сети. Разработанная имитационная модель позволяет проводить анализ влияния показателей качества электрической энергии на устойчивость работы механизма.

The paper considers a simulation model for analyzing emergency operating modes of the electric drive of a centrifugal pumping unit powered from the network. The developed simulation model makes it possible to analyze the influence of electrical energy quality indicators on the stability of the mechanism.

Электропривод центробежных насосных агрегатов (ЭП ЦА) на базе асинхронных электродвигателей (АД) – представляет собой один из наиболее распространенных типов механизмов. На ряду с этим данные механизмы являются наиболее крупными энергопотребителями [1].

Как известно, показатели качества электроэнергии строго нормируются по многим параметрам. К примеру, нормируется максимальная величина и длительность провалов и (или) прерываний напряжения, число провалов и др. параметры. ЭП ЦА как технологическая установка обладает набором технологических защит, в частности для защиты НА от таких режимов работы как сухой ход, срыв подачи, кавитация, помпаж и др. аварийные режимы работы установок. Некоторые из указанных режимов могут являться прямым следствием снижения параметров качества электроснабжения установки.

Технологические защиты выполняются с применением датчиков давления, расхода и др. датчиков физических величин. Как известно [2], выходные параметры НА (Q-H характеристика насоса) находятся в зависимости от частоты вращения вала НА. Пересчет напора (давления), расхода (производительности) при различных скоростях может быть выполнен с применением законов подобия (пропорциональности). Следовательно, в случае возникновения провала (прерывания) напряжения происходит пропорциональное снижение расхода и квадратичное снижение напора НА.

При выходе напора и (или) расхода НА за пределы уставок технологических защит происходит их срабатывание, которое может приводить к аварийному останову. Повторный запуск установки, остановленной по сигналу аварии, может занимать достаточно длительный период времени до нескольких часов.

Для исключения длительных простоев оборудования, требуется проведение анализа поведения установки в аварийных режимах работы. Анализ в работе выполнялся на базе разработанной имитационной модели насосного агрегата с приводом от асинхронного электродвигателя.

Нагрузка на валу АД при его работе с НА может быть учтена в виде «вентиляторной» характеристики. Типовой вид данной характеристики приведен на рисунке 1.

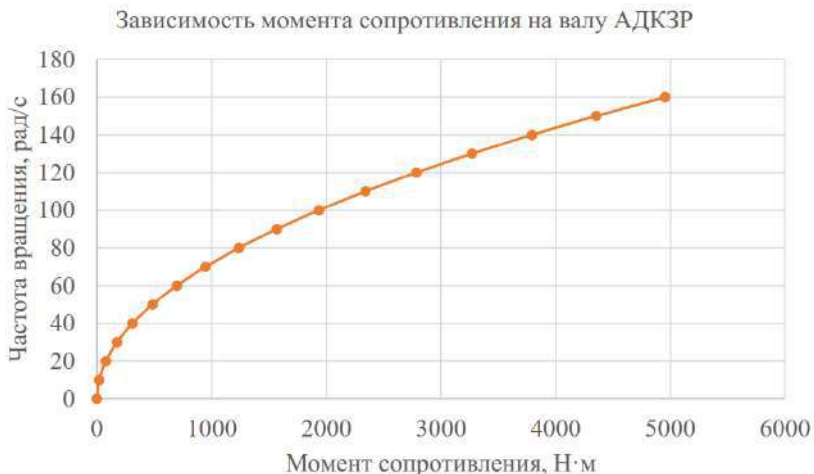


Рис. 1 – Типовой вид «вентиляторной» характеристики сопротивления на валу АД

Для анализа процессов в ЭП НА была разработана имитационная модель, приведенная на рисунке 2.

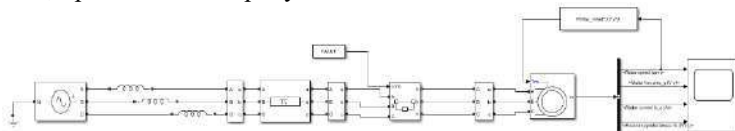


Рис. 2 – Имитационная модель для анализа аварийных процессов в системе сеть – АД – НА

Анализ переходных процессов выполнялся для следующего режима работы АД: возникает провал напряжения и АД находится в режиме выбега торможением, при этом потокосцепление АД уменьшается, последующее восстановление напряжения вызывает самозапуск АД, в случае, если на этапе самовыбега не произошло срабатывания технологических аварийных защит.

Переходные процессы при провале напряжения приведены на рисунках 3 – 4.

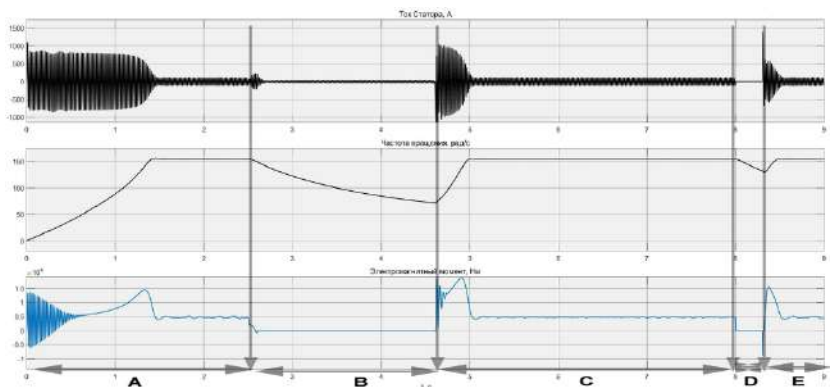


Рис. 3 – Переходные процессы в АД при провале напряжения питания

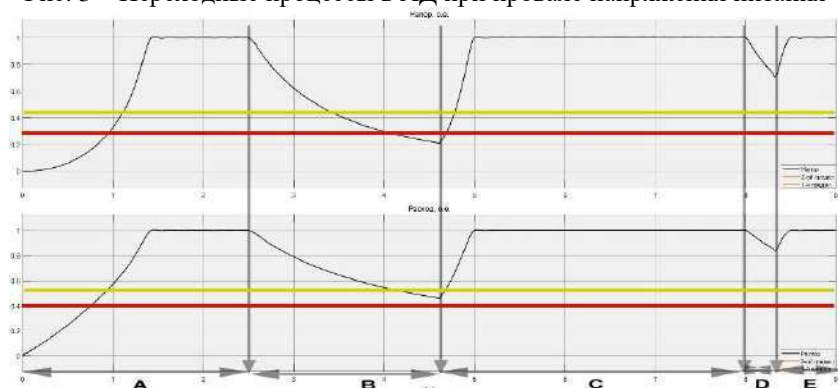


Рис. 4 Переходные процессы для выходных параметров НА и уставки технологических защит

Анализ приведенных процессов показывает, что для рассмотренного случая провал напряжения не приводит к срабатыванию аварийной технологической защиты, самозапуск двигателя при появлении напряжения – успешный. При этом кратность бросков тока совпадает с кратностью пусковых токов.

В работе была реализована имитационная модель электропривода насосного агрегата для анализа аварийных режимов работы. Анализ показывает, что при определенной длительности провалов напряжения возможен успешный повторный запуск электродвигателя, при этом технологическая аварийная защита не работает.

Литература:

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.- 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2001 . - 704 с.: ил
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов /Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. - 4-е изд., стереотипное, перепечатка со второго издания 1982 г. - М: «Издательский дом А льян с», 2010. - 423 с.: ил.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ОДНОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Е.В. Стужук

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, eva.stuzhuk03@mail.ru

Научный руководитель: Нос О. В., д.т.н., доцент

В данном докладе рассмотрены вопросы технической реализации двуканальной системы управления силовым преобразователем на базе H-моста во вращающейся системе координат d, q , применяемого для электропитания однофазных потребителей переменного тока произвольного вида.

The paper presents the implementation of the double-channel control strategy of a power converter based on an H-bridge in a rotating reference frame d, q used for power supply of different AC load.

На сегодняшний день возобновляемая энергетика широко применяется как в распределительных сетях централизованного типа, так и при электропитании удаленных локальных объектов, в том числе несимметричных и нелинейных. Если, например, говорить о стандартном комплекте электрооборудования данного класса систем электроснабжения, то в его состав входят как сами солнечные панели или ветрогенераторы, выступающие в качестве первичного источника, так и устройства силовой электроники для генерации электрической энергии гарантированного качества, включая контроллеры и аккумулирующие накопители. При этом в однофазной конфигурации от силового преобразователя требуется сформировать на нагрузке гармоническое напряжение без каких-либо искажений в мгновенной форме, за счет, например, организации дополнительного канала управления по поперечной оси двумерной синхронно-вращающейся

системы координат d, q , технической реализации которой посвящен данный доклад.

Основной функциональной задачей однофазного мостового инвертора с ШИМ с силовым LC -фильтром на выходе в составе автономной системы генерации электрической энергии, изображенной на рисунке 1, является преобразование входного напряжения постоянного тока, получаемого от регенеративного источника, в гармоническое напряжение v фиксированной частоты и нормированной амплитуды

$$v = u_m \cos \omega t,$$

где $u_m = \text{const}$ – максимальное мгновенное значение; $\omega = 100\pi$ – угловая частота.

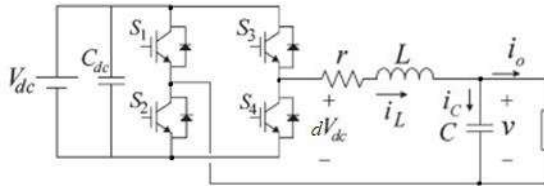


Рис. 1 – Схема однофазного мостового инвертора напряжения

В соответствии с рисунком 1, дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в силовой цепи, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} L \frac{di_{inv}}{dt} = dV_{dc} - v - i_{inv}r, \\ C \frac{dv}{dt} = i_{inv} - i_o, \end{cases} \quad (2)$$

где L, r – индуктивность и активное сопротивление дросселя LC -фильтра; C – емкость конденсаторной батареи LC -фильтра; i_L – выходной ток H-моста, представляющий собой алгебраическую сумму токов конденсатора i_C и нагрузки i_o ; d – коммутационная функция переключений полупроводниковых ключей S_1 – S_4 инвертора с ШИМ, принимающая три разрешенных дискретных состояния $-1, 0, +1$, или в векторно-матричной форме с использованием метода пространства состояний [1]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Mf}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx}, \end{cases}$$

где \mathbf{x} – двумерный вектор состояния,

$$\mathbf{x} = (i_{inv} \quad v)^T, \quad (2)$$

где T – верхний символ транспонирования; $u = dV_{dc}$ – управляющее воздействие; $f = i_0$ – скалярное сигнальное возмущение; $y = v$ – управляемая (выходная) переменная; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{M} , \mathbf{C} – собственная матрица, матрица по управлению, матрица по возмущению и матрица по выходу соответственно

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} V_{dc} \\ L \\ 0 \end{pmatrix}; \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{pmatrix}; \mathbf{C} = (0 \quad 1).$$

В практических приложениях используются различные алгоритмы управления H-мостом [2], зависящие от конкретных требований к быстродействию восстановления гармонической мгновенной формы v при отработке внешних возмущений со стороны нагрузки и качеству вырабатываемой электрической энергии, одним из которых является подход, основанный на использовании вращающейся системы координат d, q , широко распространенный в трехфазных цепях переменного тока [3]. Применение двумерных векторов, изменяющих свое угловое положение синхронно с взаимно перпендикулярными осями плоскости d, q , приводит к тому, что гармонические переменные в статическом режиме работы становятся постоянными величинами, вследствие чего представляется возможным обеспечить нулевую статическую ошибку регулирования при использовании в законе управления интеграла отклонения выхода от желаемого состояния. Однако для организации второго канала по оси q необходимо иметь текущую информацию о данной проекции, которая получается за счет первоначального фазового смещения напряжения на стороне потребителя на электрический угол 90° с последующим ортогональным преобразованием R. Н. Park [4].

Самый простой способ практической реализации продольной составляющей заключается в программной задержке исходного сигнала на четвертую часть периода основной гармоники 50 Гц или его дифференцирования, что иллюстрирует рисунок 2, на котором в качестве s обозначен оператор Лапласа [5]

$$v_\beta = -\omega^{-1} \frac{dv}{dt} = u_m \sin \omega t.$$

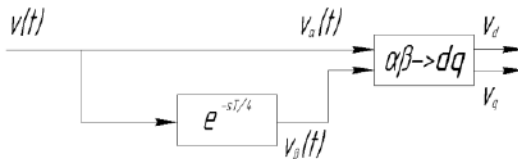


Рис. 2 – Программная задержка исходного гармонического сигнала

Другой подход базируется на различного рода динамических подсистемах фильтрации, а именно фильтре Р. Калмана [6], полосовом фильтре второго порядка, получаемого путем охвата резонансного звена с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k\omega_0}{s^2 + \omega_0^2},$$

где ω_0 – резонансная угловая частота; k – коэффициент передачи, единичной отрицательной связью [7], откуда

$$W(s) = \frac{ks}{s^2 + ks + \omega_0^2},$$

в результате чего происходит сдвиг начальной фазы входной гармоники на угол 90° , или фазосдвигающего фильтра [8], который обеспечивает пропускание всех частот без амплитудного искажения, но со смещением на угол 90° и, в случае первого и второго порядка, описывается следующими передаточными функциями соответственно

$$W_1(s) = \frac{\omega - s}{s + \omega},$$

$$W_2(s) = \frac{-s^2 + \omega s + a}{s^2 + \omega s + a},$$

где $a = 0,5\pi$.

В данной работе описаны различные подходы к формированию поперечной составляющей двумерных алгебраических векторов, необходимых для построения быстродействующей системы управления однофазным мостовым автономным инвертором с силовым LC -фильтром на выходе во вращающейся системе координат d, q , предназначенной для электропитания однофазных нагрузок переменного тока гармоническим напряжением.

Литература:

1. Нос О.В. Теория автоматического управления. Теория управления особыми линейными и нелинейными непрерывными системами: учебное пособие / О.В. Нос. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 166 с.
2. M. Monfared, S. Golestan, J. M. Guerrero. Analysis, design, and experimental verification of a synchronous reference frame voltage control for single-phase inverters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61, iss. 1. – P. 258–269.
3. A. Roshan, R. Burgos, A. C. Baisden, F. Wang, and D. Boroyevich. A D-Q frame controller for a full-bridge single phase inverter used in small distributed power generation systems // Proc. IEEE APEC. – 2007. – P. 641–647.

4. *R. H. Park*. Two-reaction theory of synchronous machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1929. – Vol. 48, iss 3. – P. 716–727.

5. *Renata Carnieletto, Diego B. Ramos, Marcelo G. Simões, Felix A. Farret*. Simulation and analysis of DQ frame and P+Resonant controls for voltage source inverter to distributed generation // IEEE Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) Proc. – 2009. – P. 104–109.

6. *A. A. Girgis, W. B. Chang, E. B. Makram*. A digital recursive measurement scheme for on-line tracking of power system harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1991. – Vol. 6, iss. 3. – P. 1153–1160.

7. *K. De Brabandere, T. Loix, K. Engelen, B. Bolsens, J. Van den Keybus, J. Driesen, and R. Belmans*. Design and operation of a phase-locked loop with Kalman estimator-based filter for single-phase applications // Proc. IEEE Industrial Electronics Society Conference. – 2006. – P. 525–530.

7. *Hauck Matthias, Späth Helmut*. Control of a Three Phase Inverter Feeding an Unbalanced Load and Operating in Parallel with Other Power Sources // 10th International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2002. – P. 1–10.

8. *G.-Myoung Lee, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok*. Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – Vol. 51, iss. 1. – P. 132–139.

Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

РАСЧЁТ СРОКА СЛУЖБЫ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С УЧЁТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

С.А. Внуков

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, abakan.1998@mail.ru**

Научный руководитель: Щуров Н. И., д.т.н., профессор

Оптимизация конструкции и удельная мощность электродвигателей во многих случаях определяются температурой двигателя и сроком службы его изоляции. В частности, для тяговых электродвигателей электромобилей температура двигателя является переменной составляющей и зависит от фактической эксплуатации транспортного средства. В данной работе представлен метод, позволяющий рассчитать срок службы двигателя с учётом периодически изменяющейся температуры. Температура определяется на основе предполагаемых периодических циклов движения.

Design optimization and power density of electric motors are in many cases determined by motor temperatures and life expectancies of the motor insulation. Especially for electric vehicle traction motors, the motor temperature is variable and dependent on the actual usage of the vehicle. This paper presents a method that allows for a calculation of motor life expectancies with regard to variable periodic motor temperatures. The temperatures are derived from assumed periodic driving cycles.

Постоянный режим работы

Неисправности и старение низковольтных электродвигателей могут иметь совершенно разные причины [1]. Тепловое старение изоляции (нагрев) является одним из важнейших параметров срока службы. Скорость её старения эквивалентна химическому закону Аррениуса [2] и может быть выражена следующим образом:

$$L = B \cdot e^{\frac{\varphi}{kT}}, \quad (1)$$

где $B = \text{const}$, φ – энергия химической активации, эВ, T – абсолютная температура, К, k – постоянная Больцмана. Для расчётов рекомендуется использовать производную формулу (1):

$$L(v_c) = L_0 \cdot 2^{\frac{T - v_c}{TIC}}, \quad (2)$$

где v_c – постоянная температура горячей точки обмотки машины, °С, TIC – температурный индекс (эталонная температура), °С, L_0 – эталонный

срок службы, ч (как правило, устанавливается равным $L_0 = 20000$ ч), HIC – индекс снижения температуры, °С (соответствует правилу Монцингера и принимается от 8 °С до 10 °С). Показатели PI и HIC являются специфическими с точки зрения свойств изоляционной системы и могут быть точно определены только путём эмпирических испытаний на длительное старение и перегрузку. Температура горячей точки принимается за критическую температуру, определяющую разрушение рассматриваемой изоляционной системы. Температура горячей точки может быть измерена только косвенно, а также подвержена оценочному анализу. Выражение (2) справедливо только для режима постоянной нагрузки, т.е. постоянной температуры. На рисунке 1 представлена диаграмма кратковременного превышения температуры (t_1, t_2) в течение периода T .

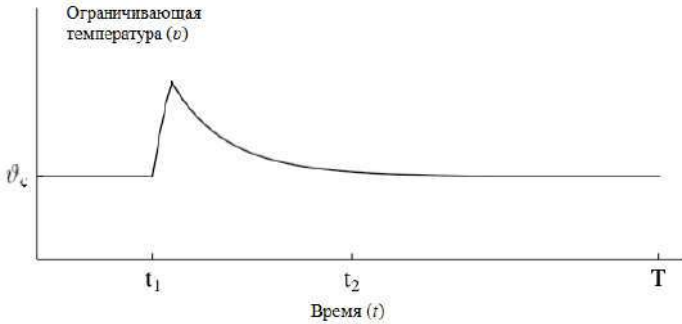


Рис. 1 – Интервал кратковременного превышения температуры (t_1, t_2) в течение периода T

Согласно выражению (2), срок службы L представляет собой единичное значение времени, обозначаемое через h . Выражение (2) не позволяет сделать какое-либо утверждение о реальном распределении отказов изоляционной системы вследствие теплового старения. Однако существует вероятность обнаружения отказов в районе расчётного срока службы L .

Динамический режим работы

Тепловые повреждения приводов и трансформаторов также вызваны кратковременной перегрузкой и превышением температуры. В этом подходе предполагается, что химическое разрушение под воздействием температуры не зависит от времени и является аддитивным. Коэффициент процентного старения или остаточного ресурса определяется как:

$$p(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{L(v)} dt = \frac{1}{L_0} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{v(t)-T}{HIC}} dt. \quad (3)$$

Тогда потери времени жизненного цикла на интервале превышения температуры (t_1, t_2) может быть рассчитана по формуле:

$$l_{1,2} = p(t_1, t_2) \cdot L(v_c). \quad (4)$$

Потеря срока службы $l_{1,2}$ – это время старения (ч) по сравнению с фактически прошедшим временем интервала (t_1, t_2) . Этот показатель даёт наглядное представление о том, насколько сильно необычные кратковременные тепловые нагрузки снижают срок службы изоляции, и может быть использован для расчёта остаточного срока службы изоляции электродвигателей [3]. Однако для использования срока службы в качестве расчётного параметра при изменяющихся температурах двигателя более целесообразным представляется другой подход. С этой целью рассматривается срок службы L_p , основанный на предполагаемом периодическом рабочем режиме и температурном цикле. Под периодом T понимается интервал времени превышения температуры при постоянном режиме работы, как показано на рисунке 1. Все периоды времени превышения температуры $n(t_2-t_1)$ заменяются соответствующим временем потери ресурса жизненного цикла $n \cdot l_{1,2}$ в связи с выражением:

$$L_p = L(v_c) + n(t_2 - t_1) - n \cdot l_{1,2} \rightarrow n \approx \frac{L_p}{T}, \quad (5)$$

где n – количество периодов T в пределах срока службы L_p . Если интервал времени превышения температуры (t_1, t_2) увеличить до периода T и преобразовать выражение (5), то срок службы может быть рассчитан как:

$$L_p = \frac{T}{p_T}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет рассчитывать срок службы не только на основе простых экспоненциальных температурных функций, как показано на рисунке 1, но и учитывать произвольно изменяющиеся температуры двигателя в течение периода T . Согласно выражению (3), изменяющиеся значения температуры могут быть численно проинтегрированы на основе фактических температурных данных или результатов моделирования. В отличие от этого фактора, общепринятые стандартные сроки службы, обозначаемые во времени, характеризуют неизменную стабильную эксплуатацию. Кроме периода ездового цикла, срок службы L_p дополнительно учитывает все периоды времени, когда электромобиль фактически не эксплуатируется. Величина L_p определяется параметрами изоляции, специфическими компонентами

привода, такими как система охлаждения, потери и тепловые режимы, а также фактической функцией использования (рисунок 2).

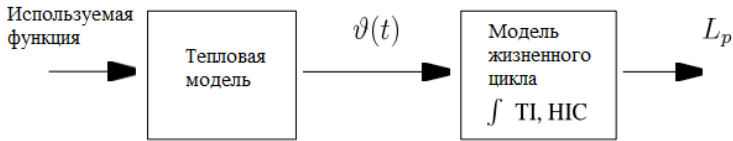


Рис. 2 – Алгоритм расчёта ожидаемого жизненного цикла

Вывод: Простые предположения о постоянной рабочей температуре электродвигателей недостаточны, если ожидаются значительные температурные циклы, которые могут привести к ошибкам в оценках и неправильному проектированию двигателей. Вместо того, чтобы проектировать двигатели с учётом фиксированной допустимой температуры, необходимо учитывать данные о фактической эксплуатации, что может позволить оптимизировать конструкцию двигателя.

Литература:

1. Бирюков В. В., Щуров Н. И., Штанг А. А. Основы электрической тяги: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 332 с.
2. Порсев Е. Г., Малозёмов Б. В. Электрические и электронные аппараты: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 718 с.
3. Ярославцев М. В. Эксплуатация и ремонт электрического транспорта: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 116 с.

КОНФИГУРАЦИЯ СИЛОВЫХ ТЯГОВЫХ УСТАНОВОК ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Д.Ю. Доценко

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, danil.dotsenko0308@gmail.com

Научный руководитель: Нос О. В., д.т.н., доцент

Данный доклад посвящен описанию различных типов двигательных установок автономных транспортных средств, включая подробный анализ конфигурации и составных элементов гибридной структуры с указанием ее достоинств и недостатков.

This paper is devoted to propulsion systems of standalone vehicles, including a detailed analysis of the configuration and building blocks of the hybrid structure its advantages and drawbacks.

Введение. В настоящее время одной из мировых тенденций развития автотранспортной индустрии является все большее применение электрических машин (ЭМ) постоянного и переменного тока в качестве основного или вспомогательного источника механической мощности автономных транспортных средств. В данном докладе рассматриваются различные подходы к построению гибридных тяговых систем, совмещающих в себе двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и ЭМ, благодаря чему повышается энергоэффективность процесса преобразования энергии, например, за счет рекуперативного торможения.

Типы тяговых систем гибридных транспортных средств. Среди широкого многообразия различного рода силовых энергетических установок, предназначенных для приведения в движение передвижных транспортных средств в автономном исполнении [1], наиболее распространенным является ДВС, который имеет камеру сгорания для преобразования химической энергии в тепловую и кинетическую. В силу того, что ДВС имеет низкий коэффициент полезного действия, загрязняет окружающую среду и относится к классу не возобновляемых источников, то более перспективным техническим решением является включение в тяговую систему ЭМ и переход к гибридной структуре (ГЭ), которая в зависимости от компоновки подразделяется на шесть типов, что иллюстрирует рисунок 1, где используются следующие обозначения: ТБ – топливный бак; Т – трансмиссия; Г – генератор; СП – полупроводниковый силовой преобразователь; НЭ – накопитель энергии; ЗУ – зарядное устройство.

1. Конфигурация первого типа (рисунок 1, а) состоит из ЭМ мощностью 7-12 кВт при рабочем напряжении 140В–150 В, которая механически связана с ДВС, что в конечном итоге позволяет снизить потребление сгораемого топлива до 30% в совокупности с существенным уменьшением габаритных размеров силовой установки.

2. Во второй схеме используется раздельная схема питания, т. е. в качестве источника механического движения может выступать как ДВС, так ЭМ по отдельности, либо их совместная комбинация, что определяется конкретным типом построения тяговой системы, которая подразделяется на последовательную (рисунок 1, б), параллельную (рисунок 1, в), последовательно-параллельную (рисунок 1, г) и комплексную (рисунок 1, д) [2].

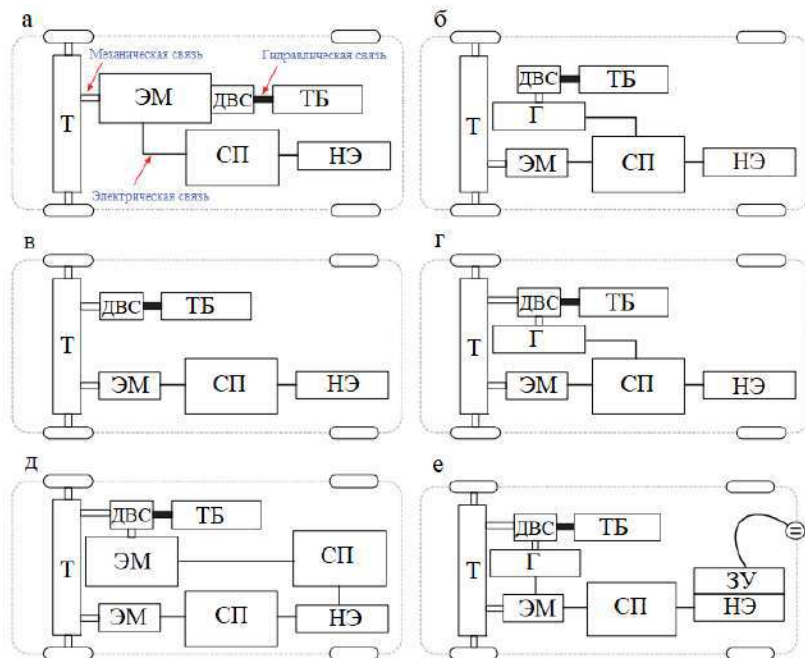


Рис. 1 – Конфигурация силовой установки типа мягкий гибрид, полный гибрид и плагин гибрид

3. В третьей структуре, изображенной на рисунке 1, е, отбор механической мощности производится как от ДВС, так и ЭМ, причем электромеханический преобразователь запитывается от аккумуляторов, подключаемых к внешнему регулируемому источнику тока.

Если полностью отказаться от ДВС, то можно перейти к чисто электрическому транспортному средству, получающему питание от:

- аккумуляторной батареи, например, свинцовой или литий-ионной;
- топливных элементов, использующих для генерации энергии процесс электролиза;
- возобновляемых источников, таких как, например, солнечные панели.

Накопитель энергии. Как видно из рисунка 1, в энергетическую установку входит НЭ, предназначенный для хранения и передачи электрической энергии, как правило, реализуемый на базе аккумуляторов или суперконденсаторов. Последний электронный компонент имеет схожую конструкцию с обычным конденсатором, но при этом обладает гораздо большей емкостью. Помимо этого, в качестве НЭ может

выступать маховик с большим моментом инерции, осуществляющий накопление кинетической энергии за счет вращения ротора.

Системы управления гибридным автотранспортным средством. Как было указано ранее, конструкция ГЭ подразделяется на 4-е типа: последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комплексный, первый из которых является наиболее простым. Механическая мощность от ДВС первоначально с помощью генератора Г преобразуется в электрическую, а затем через силовой преобразователь СП используется для питания ЭМ, приводящей в движение колеса через трансмиссию Т. При небольшой нагрузке электрическая энергия также используется для зарядки аккумулятора, а при торможении или замедлении ЭМ выступает в качестве генератора.

В случае параллельной конфигурации, в процессе разгона или изменяющейся скорости потребляемая мощность распределяется между ДВС и ЭМ, а при равномерном движении транспортного средства ЭМ в работе не участвует. В свою очередь системы управления последовательно-параллельной схемой разделяются на две группы с ведущей ЭМ или ДВС, каждый из которых вырабатывает большую мощность, чем ведомый, а при комплексной компоновке передняя и задняя колесные оси приводятся в движение отдельно.

Каждая из описанных выше систем управления ГЭ, имеет свои преимущества и недостатки. В частности, последовательная схема, хоть и проста, но имеет повышенный расход топлива, параллельная структура требует одновременной работы ДВС и ЭМ независимо друг от друга, причем ЭМ функционирует только в паре с ДВС, а последовательно-параллельная конфигурация сочетает в себе достоинства двух предыдущих, что в ряде режимов позволяет полностью отказаться от использования ДВС.

Конфигурации электрических силовых установок. В зависимости от конструктивного исполнения механической передачи, выделяют следующие компоновки тяговой системы, а именно мотор-колесо, мотор-ось и смешанная схема [3], что иллюстрирует рисунок 2. Первая конфигурация состоит из четырех двигателей с независимым приводом на каждое из колес (рисунок 2, а), вторая включает в себя две ЭМ, соединенных с колесами через трансмиссию (рисунок 2, б), а третья представляет собой комбинацию первых двух, т. е. задние колеса автомобиля приводятся в движение одной ЭМ, а передние двумя (рисунок 2, в).

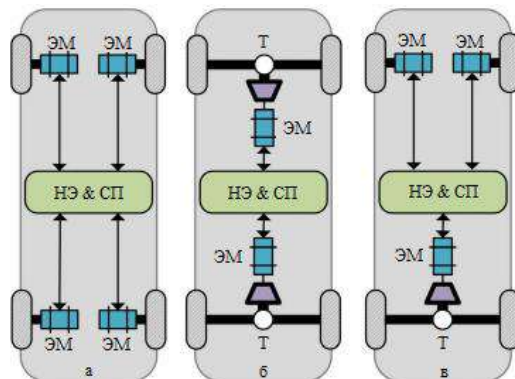


Рис. 2 – Возможные конфигурации электромобилей: а – мотор-колесо, б – мотор-ось, в – смешанная схема

Заключение. Как показывает выполненный в докладе краткий обзор, гибридные транспортные средства набирают все большую популярность среди производителей транспортных средств, что обусловлено значительной экономией топлива в ГЭ по сравнению с традиционной схемой на основе ДВС, которая может достигать 30%, в результате чего повышается энергоэффективность в совокупности со снижением выбросов загрязняющих газов.

Литература:

1. Siang, Fui Tie A review of energy sources and energy management system in electric vehicles / Fui Tie Siang, Wei Tan Chee // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – № 20. – С. 82-102.
2. Chau, K.T. Overview of power management in hybrid electric vehicles / K.T. Chau, Y.S. Wong // *Energy Conversion and Management* : электронный журнал. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890401001480>. – Дата публикации: 14.08.2001.
3. Comparative study of different electric propulsion system configurations based on IPMSM drive for battery electric vehicles // *IEEE Xplore*: сайт. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7837160> (дата обращения: 07.12.2022)

ДИАГНОСТИКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ОТ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Петровский, Д.С. Моисеев, И.П. Петров
Самарский государственный технический университет,
г. Самара, petrovski@rambler.ru

В работе рассматривается диагностика электромагнитной совместимости различных устройств, что дает возможность оценить уровень электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля по отношению к другому электрооборудованию, находящемуся внутри и снаружи автомобиля. Данная оценка производится, при помощи интеллектуальных датчиков, входящих в состав интеллектуальных информационных систем.

The work examines the diagnostics of electromagnetic compatibility of various devices, which makes it possible to assess the level of electromagnetic interference from the car's ignition system in relation to other electrical equipment located inside and outside the car. This assessment is made using smart sensors that are part of intelligent information systems.

Введение

Технические и экологические характеристики современных двигателей внутреннего сгорания требуют, чтобы производители автомобилей совершенствовались, а затем разрабатывали новые, методы и средства диагностики и управления. В настоящее время двигатели внутреннего сгорания (ДВС) управляются микропроцессорными системами, которые используют физические датчики, измеряющие различные входные и выходные параметры ДВС (например, расход воздуха, давление во входном коллекторе, температура, и так далее). Помимо этого, интеллектуально-информационные системы (ИИС) учитывают множество параметров, из которых ключевыми является режимы работы двигателя и сопутствующий этому уровень электромагнитных помех (ЭМП) [1, 2, 4].

Возможности использования интеллектуальных датчиков (ИД) внутри системы управления ДВС наряду с доступностью микропроцессорных систем, в том числе в составе систем зажигания и внутри других исполнительных устройств современных автомобилей, создаёт благоприятную среду для использования интеллектуальных информационных систем [3, 5].

В этой работе основной фокус сосредоточен на разработке ИИС для определения величины ЭМП от систем зажигания, где под ИИС понимается система, объединенная программным обеспечением (ПО), а также информационным процессом совместной работы технических

устройств автомобиля. ИИС работает как автономно, так и совместно с человеком, при этом обладает способностью на основе входных данных при наличии мотивации синтезировать цель, вырабатывать решение о действии и находить рациональные способы достижения сформулированной цели [4]. Однако в число задач данного исследования синтез цели не входит, по этой причине блок генерации цели исключен из дальнейшего рассмотрения, а соответствующая обобщенная структура ИИС может быть представлена следующим образом (смотри рисунок 1):

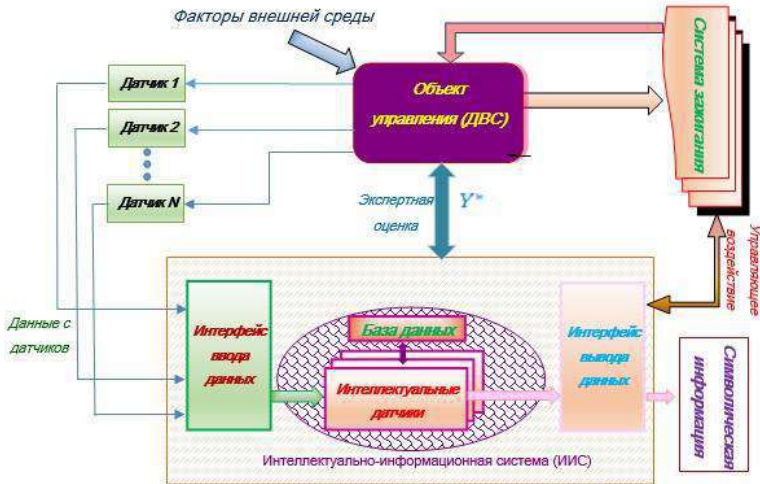


Рис. 1 - Интеллектуально - информационная система на базе системы зажигания

Указанная ИИС вырабатывает экспертную оценку Y^* , на базе которой принимается решение к управляющему воздействию по изменению уровня генерируемых ЭМП, при этом данное воздействие требуется для достижения поставленной изначальной цели - выработка управления, далее прогнозируется значение результата действия (экспертная оценка), которые сопоставляются с реальными результатами и представляются в виде символьной информации. То есть для корректировки экспертной оценки самым реализуется обратная связь для управления уровнем ЭМП, при возникновении такой необходимости.

Управление ИИС может осуществляться на базе бортовой системы контроля (БСК), которая на основании текущих сведений по уровню электромагнитных помех (ЭМП) и другим параметрам объекта управления, осуществляет оценку работы ИИС, затем полученная оценка преобразуется этой системой в физический сигнал и поступает на

исполнительные устройства. Далее объект управления получает сигнал от исполнительных устройств, после чего производится требуемое действие, которое поступает в бортовые системы контроля по цепи обратной связи, где и происходит его сравнение с исходными результатами.

Исходя из вышеизложенного БСК представляет собой комплекс, который способен определять состояние объекта измерения и среды, сравнивать параметры реального и желаемого результатов, а также вырабатывать решение о характере работы объекта и генерировать в соответствии с данным решением управляющее воздействие по изменению уровня ЭМП. Для достижения этой цели от БСК требуется иметь запас знаний, которые будут храниться в базе данных.

Диагностическая ИИС, разработанная в этой статье, представляет собой комплекс, который показывает важность и необходимость предложенного ниже подхода к управлению и соблюдению требований по уровню ЭМП для системы зажигания.

Показанные в работе данные обрабатываются при помощи классификационных алгоритмов, которые производятся в программной среде ВЕКА для интеллектуального анализа данных. При этом используются различные методы вычислительного эксперимента, который применяет метод опорных векторов, сформированный в другой среде - ENCOG Workbench. По итогам сравнения всех этих алгоритмов можно сказать, что лучший результат дает метод опорных векторов (МОВ), с погрешностью классификации данных 5.9% [6, 7].

Одним из базовых блоков ИИС является интеллектуальный датчик, который на основании текущих сведений об окружающей среде и состоянии объекта управления, в данном случае это система зажигания ДВС, осуществляет оценку комплексных характеристик диагностируемой системы. Важно отметить, что данные об окружающей среде мы получаем с физических датчиков (Датчик 1, Датчик 2, ... Датчик n), таких как датчик массового расхода воздуха, датчик положения коленчатого вала, датчик измерения уровней электромагнитных полей, датчик скорости, и так далее. Важно отметить, что таких датчиков может быть несколько, из которых мы в этой работе выбираем ИД по методу МОВ. В итоге полученные ИД экспертная оценка преобразуется БСК в физический сигнал, а затем поступает на вход системы зажигания, являющейся исполнительным устройством, которая реагирует на этот сигнал.

Таким образом, ИИС быстро и точно оценивает состояние системы зажигания, с которой она работает в связке. Исходя из этих данных от ИИС требуется, чтобы она имела возможность в процессе своего

функционирования приобретать и сохранять диагностические знания, сфокусированные на решение важнейшей задачи любой диагностической системы – обнаружение и классификацию неполадок (ОКН) [5, 7]. Эти методики формируют базу математического моделирования (ММ) для указанных процессов, при том что данные алгоритмы чрезвычайно важны для реализации этой диагностики.

В связи с этим для упрощения контроля за данными ИИС внутри вышеуказанных подходов находят всё более широкое применение методы искусственного интеллекта, основанные на разнообразных моделях обнаружения и классификации уровня ЭМП. По этой причине интеллектуальный подход, реализуемый нашей системой, используется для апробации задач в различных технических областях, например, в диагностике уровня ЭМП. Некоторые ИИС были разработаны и применены в области диагностики для улучшения работы распределенных диагностических устройств. Помимо этого, единственным вариантом обнаружения ранее не встречавшихся неисправностей остается диагностика при помощи ИД [4, 5].

Вывод. Указанные функциональные и программные возможности интеллектуально - информационной системы, апробированной на интеллектуальных датчиках, дают возможность диагностировать превышение уровня ЭМП, при величине погрешности классификации данных в методе опорных векторов 5.9%.

Литература:

- 1 Кечиев Л.Н. ЭМС: стандартизация и функциональная безопасность. / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: МИЭМ, 2001 – 82 с.
- 2 Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. / А.Д. Князев– М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
- 3 Николаев П.А. Электромагнитная совместимость современных автомобильных систем зажигания: монография [Текст] / П.А. Николаев. - Тольятти.: ПВГУС, 2011. – 224 с.
- 4 Петровский С.В., Николаев П.А. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля // Научные труды V международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Том 1, Томск. ТПУ 2014. С. 355-359.
- 5 Petrovski S., Kozlovsky V., Vakhnina V., Skripnuk D. Determination of the Causes of the Excess of the Level of Electromagnetic Interference from the Ignition System Using an Intelligent Diagnostic System / 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic

Engineering (EIconRus), 28-31 Jan. 2019, ISBN 978-1-7281-0339-6. DOI: 10.1109/EIconRus.2019.8657322 pp. 569-573

6 Dhar V., Stein R. Intelligent Decision Support Methods : The Science of Knowledge Work. Prentice Hall, 1997

7 Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. — San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. — 302 p. — ISBN 1-5586-0238-0.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ

Н.И. Сингизин, И.И. Сингизин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск,**

Научный руководитель: Щуров Н.И., д.т.н., профессор

В работе рассматриваются перспективы применения подходов машинного обучения и нечеткой логики на основе данных описывающих параметры движения электрического транспорта.

The paper examines the prospects for using machine learning and fuzzy logic approaches based on data describing the movement parameters of electric transport.

Электрический транспорт набирает всё большую популярность, а уровень технологий позволяет предлагать потребителям как личный электротранспорт, так и обновление парка общественного электротранспорта. В нашей стране процесс перехода только начинается и сейчас есть возможность подробно проанализировать сложившуюся за долгие годы транспортную систему и режимы движения.

Зачастую для проведения исследований в качестве модели описывающей движение транспортного средства используют один из стандартных ездовых циклов. Для моделирования ездовой цикл подбирается таким образом, чтобы его основные параметры были максимально приближены к параметрам движения объекта исследования. От выбора цикла движения в момент исследования и разработки зависит эффективность разработанных решений при внедрении на реальный объект.

Предлагается внедрение общественные электрические транспортные средства Machine Data Collection систем, которые позволяют собирать конкретную структурированную информацию систематическим образом и в последствии производить ее обработку [1]. Предполагается только сбор информации о процессе движения, без обеспечения управления им

в реальном времени. Структурированная информация дает возможность объективно оценивать показатели эффективности такие как: зависимость мощности от времени; параметры процессов разгона и торможения, описываемые ускорением, величиной тока и потребляемой либо генерируемой мощностью, и энергией; выявить баланс энергопотребления подвижного состава, установив расход энергии на тягу и на собственные нужды; выбрать параметры и подтвердить достоверность моделей, используемых для расчета энергопотребления ТС [2].

Использование накопленных данных позволит применять современные подходы анализа данных и синтеза систем управления основанных на методах машинного обучения и нечеткой логики. Так, например, после обработки цикла движения может быть получена карта распределений мгновенной скорости и ускорения цикла, представленная на рисунке 1.

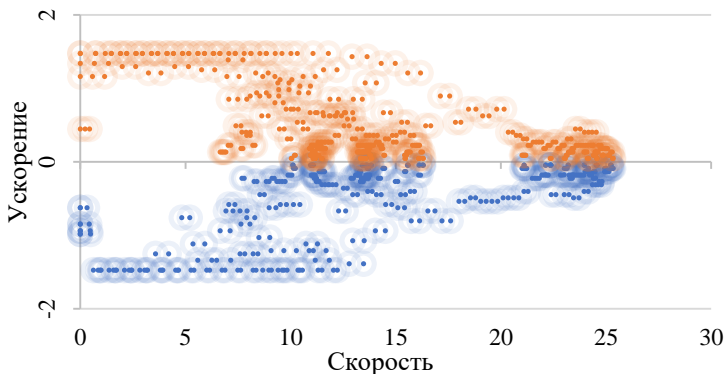


Рис. 1 – Карта распределений мгновенной скорости и ускорения цикла движения в условных величинах

С помощью алгоритмов машинного обучения точки могут быть разделены на кластеры, а уже на основании полученного разбиения можно формировать таблицу правил для систем управления на базе нечеткой логики, которые будут разработаны для конкретных ситуаций.

Таким образом в работе предлагается подход для работы с данными характеризующими электрический транспорт. В будущем накопленные данные могут стать основой для построения высокоточных моделей и систем управления.

Литература:

1. Никишечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С., Никич А.Н. Кроссплатформенная система сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 1 (40). – С. 94-98.

2. Щуров, Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта : дисс. На соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.09.03 / Н. И. Щуров. – Новосибирск, 2003. – 385 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ САЛОНА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДПУСКОВОГО ОТОПИТЕЛЯ

В.Э. Царегородцев, Е.А. Спиридонов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vlad42kem@gmail.com**

Научный руководитель: Спиридонов Е.А., к.т.н., доцент

Рассмотрена концепция использования автономного отопителя для обогрева салона электромобиля. На основе разработанной имитационной модели показано, что применение такого решения позволяет повысить пробег электромобиля на одной зарядке в зимнее время на величину до 30% в сравнении с традиционными системами отопления. Расчеты показали, что техническое решение окупается за 2,3года.

The concept of using an autonomous heater to heat the interior of an electric vehicle is considered. Based on the developed simulation model, it is shown that the use of such a solution can increase the range of an electric vehicle on one charge in winter by up to 30% compared to traditional heating systems. Calculations showed that the technical solution pays for itself in 2.3 years.

Система отопления современных электромобилей существенно отличается от системы отопления автомобилей с двигателями внутреннего сгорания: источником тепловой энергии в автомобиле служит сам двигатель, за счет своих тепловых потерь. Поскольку в электромобиле тепловые потери незначительные, используются сторонние источники тепловой энергии, которые потребляют электрическую энергию из тяговой батареи, что существенно сокращает запас хода транспортного средства. Различные исследования показывают, что запас хода в холодное время года может сокращаться на 30-50%.

Электромобили имеют различные варианты исполнения системы отопления, но все системы можно разделить на воздушные и жидкостные. В воздушных отопительных системах воздух, подаваемый в салон, нагревается с помощью различных нагревательных элементов. В жидкостных системах используется хладагент, который также нагревается нагревательными элементами и с помощью жидкостного насоса циркулирует по контуру отопительной системы, передавая тепло внутреннему теплообменнику. Широкое применение получили трубчатые электронагреватели (ТЭН) и тепловые насосы. Распространенным вариантом является совмещение этих двух обогревательных приборов в одной отопительной системе. При этом система климат-контроля может управлять работой отдельных элементов с возможностью увеличения интенсивности работы одного прибора и уменьшения другого. Также в доступных источниках рассматриваются альтернативные нагревательные элементы.

PTC-элементы (позисторы). В качестве нагревательных элементов могут быть использованы PTC-элементы (позисторы) — терморезисторы с положительным температурным коэффициентом, сопротивление которых возрастает с ростом температуры, состоящие из легированной поликристаллической керамики на основе титаната бария.

Инфракрасные обогреватели. Эти устройства нагревают не окружающий воздух, а предметы и людей, находящихся в радиусе действия излучения. Конструкция представляет собой металлический корпус, покрытый порошковой краской. Внутри корпуса располагается алюминиевый отражатель и нагревательный элемент. Под действием тока ТЭН нагревается и греет теплоизлучающую пластину, которая, в свою очередь, испускает направленный инфракрасный свет [1].

Предпусковой отопитель. Данные устройства устанавливаются в моторном отсеке автомобиля и могут работать на дизеле или бензине. В работе рассматриваются предпусковые подогреватели Webasto и AVTOTEPLO, которые получили широкое распространение и начали устанавливаться на современные электромобили в базовых комплектациях, например: Evolute i-JOY [2]. При использовании Webasto на дизеле расход топлива немного больше, но из-за разницы по цене бензина и солянки на стоимости это никак не скажется. При этом максимальная производительность у дизеля выше.

Главным плюсом данной системы отопления является то, что на работу данной системы отопления требуется 32 Вт электрической мощности, это очень низкий показатель, по сравнению с другими нагревательными элементами [3]. При этом при сгорании топлива

образуется достаточное количество теплоты для установления комфортной температуры в салоне автомобиля.

Для сравнения описанных выше систем отопления была собрана имитационная модель в ПО Matlab Simulink. Модель включает в себя несколько подсистем: модель тягового привода для проведения тягового расчета, модель определения тепловых потерь, которая учитывает коэффициент теплоотдачи различных материалов салона и корпуса транспортного средства, модель системы отопления и климат-контроля. В качестве входных данных используются характеристики реального транспортного средства (мощность тягового двигателя, емкость аккумуляторной батареи, габаритные размеры деталей корпуса и салона). Так же в качестве исходных данных используется заданный цикл движения, то есть зависимость скорости от времени. По результатам моделирования фиксируются значения энергии, затрачиваемой на тягу и энергии, необходимой для обогрева салона, запас хода, который транспортное средство способно проехать на одной зарядке при заданной температуре окружающей среды.

Данная модель не учитывает дополнительное потребление энергии, связанное с обеспечением температурных режимов самой тяговой батареи, этот вопрос является довольно комплексным и представляет собой задачу для будущих исследований.

На рисунке 1 показан результат обработки серии модельных экспериментов, отражающий зависимость пробега на одной зарядке (L , км) от температуры окружающей среды при использовании системы климат-контроля на базе различных отопителей мощностью 5 кВт.

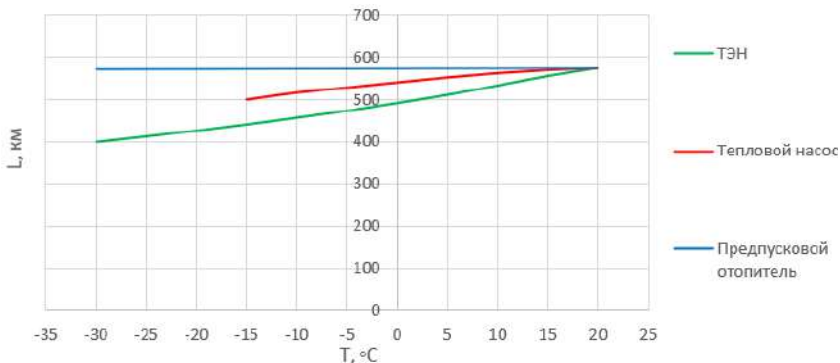


Рис. 1 – Результат эксперимента с разными типами отопительных устройств мощностью 5000 Вт

По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что при температуре -30°C запас хода при использовании предпускового отопителя больше на 30%, чем при использовании классического ТЭНа. С увеличением температуры воздуха разница сокращается, поскольку требуется меньше энергии на обогрев салона. Стоит отметить, что при использовании предпускового отопителя запас хода практически не меняется в зависимости от температуры.

Использование автономных отопителей позволит не только снизить расходы на зарядку тяговой батареи, но и повысить срок ее службы за счет уменьшения количества зарядных циклов на единицу пробега.

Для расчета годовых затрат на зарядку электромобиля принималось среднее значение годового пробега автомобиля в России, которое составляет 18700 км [4]. При использовании ТЭНа в качестве основного источника тепловой энергии, годовые затраты на зарядку электромобиля составят 63210 рублей. При использовании предпускового отопителя годовые затраты составят 48510 рублей (затраты на электрическую энергию и дизельное топливо), что на 24% меньше, чем при использовании ТЭНов. Средний срок окупаемости автономного отопителя на электромобиле составляет около 2,4 года.

Следует отметить, что данное решение обладает существенным недостатком: продукты горения топлива, которые проходят через систему фильтрации и выбрасываются в окружающую среду. Такое решение противоречит концепции «чистого транспорта». Однако, этот вопрос также требует дополнительных исследований, поскольку современная энергетика России обладает довольно высоким уровнем «карбонизации», т.е. высокой долей выбросов CO_2 при производстве электрической энергии.

Можно выдвинуть гипотезу о том, что снижение выбросов парниковых газов, вызванное экономией энергии, получаемой при использовании автономных подогревателей, оказывается выше, чем количество дополнительных выбросов, связанных с работой системы.

Таким образом, дальнейшие исследования в этой области связаны с решением следующих задач:

- Оценка экологического аспекта применения автономных подогревателей с учетом уровня «карбонизации» энергетики;
- Оценка увеличения ресурса тяговой батареи за счет снижения количества зарядных сессий;
- Повышение точности определения расходов энергии путем учета энергозатрат, связанных с поддержанием температурных режимов тяговой батареи в зимнее время.

Литература:

1. Дарья Рыжкова. Инновации в теплоснабжении – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 64 с.
2. Evolute i-JOY [Электронный ресурс] // ООО «Моторинвест». URL: <https://www.evolute.ru/models/i-joy> (дата обращения 07.11.2023).
3. Webasto Thermo Top Evo Comfort+ (5кВт, дизель, 12В) [Электронный ресурс] // ООО «Вебер». URL: <https://www.webasto-novosibirsk.ru/podogrevateli-dvigatelya/805.wsa> (дата обращения 07.11.2023).
4. Назван средний пробег автомобиля по России в год [Электронный ресурс] // ДРОМ – автомобильный интернет-портал. URL: <https://news.drom.ru/88757.html?ysclid=li1uqgco8b231127596> (дата обращения 07.11.2023).

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Секция ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Андреев М.Н.	Новосибирск	3
Мельников А.С., Быркин Ю.С., Рябов К.А.	Санкт-Петербург	7
Васильев В.О., Кислов А.П.	Новосибирск, Павлодар	12
Винтер Э.Р., Первухин М.В.	Красноярск	16
Золотарев В.В., Сериков В.А.	Новосибирск	19
Кузнецов В.А.	Новосибирск	23
Мироненко А.А.	Новосибирск	27
Чмиленко Ф.В., Парменов В.Е., Ци Чжан, Перевалов Ю.Ю.	Санкт-Петербург	30
Мельников А.С., Рябов К.А., Быркин Ю.С.	Санкт-Петербург	34
Сафонов И.С., Парменов В.Е., Масленников Н.В.	Санкт-Петербург	38
Сизганов Н.В., Хацаюк М.Ю.	Красноярск	40

Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Андреев М.Н.	Новосибирск	45
Бабицкий Д.Ю., Гейнрих Г.О.	Новосибирск	49
Галеев Р.Г.	Новосибирск	53
Гейнрих Г.О., Бабицкий Д.Ю.	Новосибирск	57
Жилин О.А.	Новосибирск	61
Лобачева А.С.	Новосибирск	65
Маломошнов Н.К.	Новосибирск	68
Меленчук Е.Д.	Новосибирск	71
Муращенко А.А.	Новосибирск	76
Наймушин И.И., Темлякова З.С., Морозов П.В.	Новосибирск	80

Носиков А.А.	Новосибирск	84
Попов И.Л.	Новосибирск	87
Раджапов А.А.	Новосибирск	89
Темляков А.А., Нейман В.Ю., Гречкин В.В.	Новосибирск	92
Фонякин А.Е.	Новосибирск	96
Холод А.О., Тимохина М.А.	Новосибирск	99
Чусовитин Г.Н.	Новосибирск	103

**Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Александрова А.А.	Новосибирск	108
Аниброев В.И.	Новосибирск	110
Антипин Н.С.	Новосибирск	113
Белкова Д.Н.	Новосибирск	117
Дегтяренко Э.В., Иванов А.А., Бузин С.Е.	Новосибирск	122
Зеленин М.В.	Новосибирск	125
Нагорный А.С.	Новосибирск	129
Осипов М.С.	Новосибирск	133
Скотников В.Д.	Новосибирск	135
Стоянова А.В., Попов М.С.	Новосибирск	137
Стужук Е.В.	Новосибирск	141

**Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

Внуков С.А.	Новосибирск	146
Доценко Д.Ю.	Новосибирск	149
Петровский С.В., Моисеев Д.С., Петров И.П.	Самара	154
Сингизин Н.И., Сингизин И.И.	Новосибирск	158
Царегородцев В.Э., Спиридонов Е.А.	Новосибирск	160

НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ

**XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых
г. Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г.**

Сборник научных трудов в 11 частях

Часть 5

Под редакцией Соколовой Д.О.

Подписано в печать 29.01.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 9,76. Печ. л. 10,50. Тираж 100 экз. Заказ № Р-02881

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20