

Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

[Том 2]:

**Материалы II Всероссийской конференции
по электрическим машинам
в рамках Международной научно-практической конференции**

Уфа

Аэтерна

2023

УДК 621.3
ББК 65.305
ISBN 978-5-00177-843-1
Э 455

Редакционная коллегия:

В. Е. Вавилов – директор Передовой инженерной школы «Моторы будущего»
(ответственный редактор)

Ф. Р. Исмагилов – зам. директора по науке Передовой инженерной школы
«Моторы будущего» (зам. отв. редактора)

Т. Р. Батраева – инженер Передовой инженерной школы «Моторы будущего».

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ [ТОМ 2]:
МАТЕРИАЛЫ II ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. – УФА: АЭТЕРНА, 2023.
– 388 с.**

Передовая инженерная школа «Моторы будущего». -<https://motorybudushego.ru>

Содержатся статьи, включенные в программу II Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы», состоявшейся в г. Уфе 14 – 15 декабря 2023 г. Основные тематики сборника связаны с электротехническими комплексами и системами, электромеханикой, электрооборудованием, электротранспортом и электрооборудованием летательных аппаратов, перспективными материалами в электротехнике.

УДК 621.3
ББК 65.305
ISBN 978-5-00177-843-1
Э 455

© Коллектив авторов, 2023

© УУНИТ, 2023

© Передовая инженерная школа «Моторы будущего», 2023

© Аэтерна, 2023

Овчинников И.А.¹, Попов И.В.¹, Карелин В.С.¹, Соколов П.В.

¹АО «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ. Электросила, Энергомашэкспорт»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Аннотация: В связи с повсеместной автоматизацией промышленного производства и электроэнергетики с использованием информационных технологий и, в частности, искусственного интеллекта, актуальной становится разработка современной автоматизированной системы мониторинга и предиктивной диагностики электроэнергетического оборудования. Работа данной системы основана на тесном взаимодействии между собой расчетного, предиктивного и экспертного блоков, что позволяет заранее выявлять потенциальные неисправности оборудования и организовать обслуживание оборудования по техническому состоянию. Рассматриваемая система находится на этапе постепенного внедрения и расширения функционала и впервые используется на энергоблоке №2 Ленинградской АЭС-2.

Ключевые слова: АСМПД, турбоагрегат, АСУ ТП, АЭС

I. ВВЕДЕНИЕ

Индустрия 4.0 (четвертая промышленная революция) предлагает новый подход к организации производства, основанный на внедрении информационных технологий в промышленность, автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта. В результате увеличивается оснащенность оборудования КИП, увеличиваются объемы информации и, соответственно, развиваются методы работы с большими объемами данных.

Штатные системы диагностики и АСУ ТП не дают возможность глубоко анализировать показатели работы оборудования и выявлять неисправности на ранних стадиях. Современные Автоматизированные системы мониторинга и предиктивной диагностики (далее – АСМПД) позволяют решить эту задачу. В настоящей статье пойдет речь о АСМПД для энергетического оборудования, такого как турбины и генераторы. Будет представлен пример реализации АСМПД для энергоблока АЭС, разработанной оригинальным производителем оборудования - АО «Силовые машины». При этом будут представлены подходы и принципы диагностики

оборудования, которые учитывают накопленный опыт и экспертизу завода-изготовителя, а также многолетний опыт эксплуатации турбогенераторов АЭС собственно генерирующей компании АО «Концерн Росэнергоатом».

В настоящее время на рынке АСМПД для энергетического оборудования представлено достаточно большое количество систем. Зачастую такие системы используют принцип регрессионного анализа или нейронных сетей для прогнозирования состояния оборудования. Некоторые системы обладают достаточно надёжным математическим аппаратом, который позволяет прогнозировать значения параметров работы оборудования в будущем, время наступления критических отклонений. Однако, такие системы не могут достоверно интерпретировать причину возникновения того или иного отклонения и выдать рекомендации по нормализации того или иного параметра без привлечения экспертов, которые хорошо разбираются в особенностях конструкции и эксплуатации того или иного оборудования.

II. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АСМПД

А. Особенности подхода АО «Силловые машины» к разработке АСМПД собственного производства»

АО «Силловые машины» несколько усовершенствовало вышеописанный подход при разработке собственной АСМПД для выпускаемого оборудования и реализовало систему, в которой прогнозирование развития трендов реализовано как часть общей экспертной системы, пример реализации которой будет показан ниже.

АСМПД АО «Силловые машины» состоит из взаимодополняющих подсистем:

— экспертного блока, в котором за счет интерпретации перечня возможных отклонений в виде диагностических признаков, строящихся на количественной взаимосвязи различных технологических параметров эксплуатации, определяется дефект и его место. Именно в этой подсистеме реализуется опыт и экспертиза конструкторских служб завода-изготовителя;

— прогностического блока, осуществляющего накопление статистики параметров и зависимостей режимов эксплуатации, формирующего эталонные модели и прогнозирующего развитие трендов измеряемых параметров в будущем;

— расчетного блока, реализующего непрерывный алгоритм вычислений основных технологических показателей работы оборудования, не измеряемых напрямую.

Такая система позволяет заводу-изготовителю сопровождать оборудование в течение жизненного цикла и давать своевременные рекомендации по его эксплуатации:

- с одной стороны конвертировать компетенции и опыт, накопленные годами конструкторским бюро и шеф-инженерами, в алгоритмы для автоматической оперативной выдачи рекомендаций эксплуатирующей организации;

- с другой стороны, обеспечить накопление объективной информации о состоянии оборудования для анализа экспертным центром, совершенствования алгоритмов и привлечения широкого спектра специалистов для решения сложных ситуаций.

АСМПД представляют собой аппаратно-программный комплекс, назначением которого является отслеживание состояния оборудования электрических станций (далее – Оборудование), выявление неисправностей на ранних стадиях, прогнозирование развития неисправностей на основании анализа текущих данных, получаемых в режиме реального времени. Данная система предоставляет возможность для перехода от выполнения ремонтов оборудования по графику ППР к ремонтам по техническому состоянию, что позволяет увеличить межремонтный период. Кроме того, АСМПД предоставляет возможность для продления заявленного срока службы оборудования на основании объективных данных.

За счет использования современных методов машинного анализа данных, физических особенностей и расчетных методик оборудования, а также привлечения экспертов удаленного центра мониторинга, данная система позволяет отслеживать состояние оборудования в режиме реального времени, заблаговременно выявлять неисправности и принимать решения по их устранению.

Согласно принятым Правилам организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики (утверждены приказом № 1013 Минэнерго России от 25 октября 2017 года. [1]), рассматриваются следующие виды организации ремонта:

- планово-предупредительный ремонт;
- ремонт по техническому состоянию.

Планово-предупредительный вид организации ремонта энергетического оборудования является традиционным инструментом поддержания надежной и безаварийной работы электростанций РФ. Недостаток такого вида организации

ремонта заключается в том, что при планировании периодичности и объемов ремонта, как правило, не учитываются особенности эксплуатации оборудования и его фактический износ.

Выполнение ремонтов по техническому состоянию позволяет повысить надежность эксплуатации и снизить затраты на обслуживание. При этом, вид организации ремонта по техническому состоянию энергетического оборудования может применяться, если у субъекта электроэнергетики имеются средства технического диагностирования и автоматизированная система контроля за техническим состоянием основного оборудования, представляющая программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий процесс удаленного наблюдения и контроля за состоянием оборудования, его диагностирование и прогнозирование изменения технического состояния на основе собранных и операционных данных, получаемых от систем сбора данных, установленных на оборудовании. Так же данная система применима в условиях планово-предупредительного ремонта, так как помогает выявить элементы оборудования, на которые стоит обратить особое внимание при обслуживании.

Исходными данными для АСМПД являются результаты штатных измерений АСУ ТП, системы контроля вибрации и механических величин (СКВиМ), электрической части системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ), системы контроля частичных разрядов (опционально), а также иные параметры, определенные в соответствии с потребностями Заказчика. Типовая схема АСМПД с внешними взаимосвязями представлена на рис.1.

АСМПД состоит из локальной части, устанавливаемой непосредственно на Ленинградской АЭС-2, а также удаленной части АСМПД – центра мониторинга, находящегося на территории АО «Силловые машины». Локальная часть АСМПД представляет собой серверный шкаф и автоматизированное рабочее место. Данная система полностью автономна и может полноценно функционировать без удаленного подключения к серверу АО «Силловые машины».

Кроме того, аппаратная часть АСМПД обеспечивает сбор, обработку и безопасную передачу данных на сервера Центра удаленного мониторинга АО «Силловые машины». С целью обеспечения безопасной передачи диагностических данных в центр удаленного мониторинга, в объеме поставки программно-технического

комплекса системы предиктивной диагностики будут предусмотрены программно-аппаратные средства для соблюдения требований НТД РФ в части информационной безопасности с учётом передачи информации в экспертно-диагностический центр АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург).

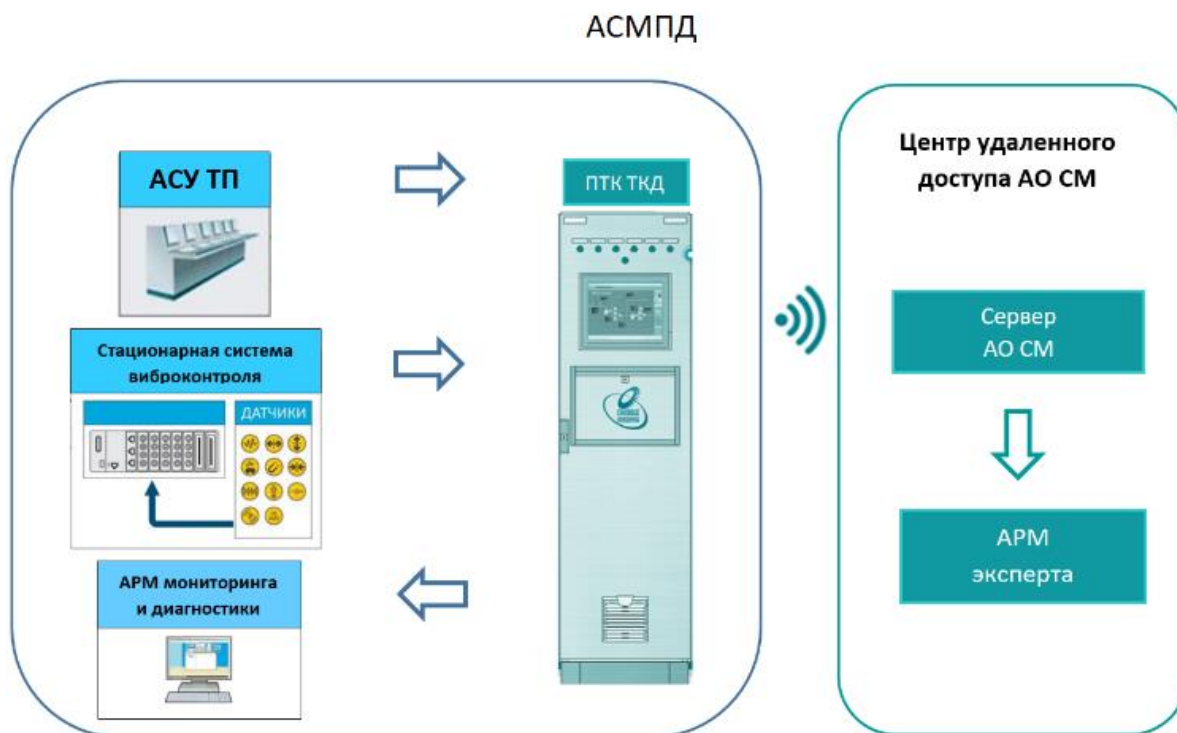


Рис. 1. Типовая схема АСМПД для подключаемого оборудования

Комплекс программно-технический технологического контроля и диагностики (ПТК ТКД) предназначен для применения в составе АСМПД (см. схему на рис.1) в качестве автоматизированного средства среднего уровня и верхнего уровня предиктивной диагностики.

В состав входят:

- промышленный компьютер;
- вторичные источники электропитания;
- панельный монитор;
- коммутационная аппаратура, включающая, при необходимости, межсетевой экран;

ПТК ТКД может выполнять следующие функции (часть функций может быть отключена, если они не требуются в конкретном проекте):

- непрерывное автоматическое получение дополнительных данных от

подключенных систем контроля и мониторинга технологических параметров;

- самодиагностика основных составных частей;
- обработка полученных данных в соответствии с диагностическими алгоритмами, формирование диагностических признаков;
- выработка звуковых, световых и информационных сигналов в соответствии с формируемыми диагностическими признаками;
- сохранение всех полученных данных и произошедших событий в архиве глубиной не менее 3 лет;
- индикация на мониторе отдельных измерений или групп измерений по запросу оператора.

В. Построение АСМПД основного оборудования электростанций на примере системы диагностики турбогенератора ТЗВ-1200

Разработанная система диагностики охватывает основные узлы турбогенератора и возбuditеля, а также наиболее важные ресурсные, режимные показатели, характеризующие работу оборудования, используемые для оценки эффективности работы генератора и эффективности управления генератором. Система диагностики обеспечивает:

- диагностирование режима работы турбогенератора по электрическим величинам (определение режима работы по диаграмме мощности, контроль отклонений по напряжению и частоте, фиксация резких сбросов/набросов нагрузки и пр.);
- диагностирование теплового состояния статора и ротора турбогенератора и возбuditеля (по температуре стержней обмотки и стали сердечника статора, по температуре обмотки ротора, по температуре дистиллята на сливе цепей охлаждения обмотки и активной стали статора для турбогенераторов с водяным охлаждением указанных элементов и пр.);
- диагностирование режима работы и технического состояния газо- и воздухоохладителей генератора (кроме типа ТЗВ с полным водяным охлаждением) и возбuditеля;
- определение режима работы турбогенератора и возбuditеля по тепловому состоянию (фиксация установившегося теплового состояния);
- и пр.

Ниже изложены наиболее важные моменты, общий подход к организации системы диагностики основного оборудования тепловых и атомных электростанций на примере турбогенератора типа ТЗВ с полным водяным охлаждением мощностью 1200 МВт Ленинградской АЭС-2, дано краткое описание нескольких наиболее актуальных диагностических алгоритмов.

Система диагностики турбинного и генераторного оборудования имеет удобный, интуитивно понятный графический интерфейс, построенный с учётом общепринятой иерархии диагностируемого оборудования. Например, турбоагрегат включает в себя паротурбинную установку и турбогенератор. На главном экране турбогенератора представлен общий вид турбогенератора с указанием его диагностируемых элементов. Поскольку расположить весь обрабатываемый массив данных по всем контролируемым элементам генератора на одном экране не представляется возможным, для сжатого представления критически важной информации вводятся обобщающие диагностические признаки, характеризующие состояние соответствующих элементов в составе турбогенератора. Обобщающие диагностические признаки позволяют переработать большое количество информации по отдельным диагностируемым узлам и вывести на общий экран итоговую информацию в компактном, сжатом виде, удобном для последующего анализа оператором системы.

Так, в состав турбогенератора типа ТЗВ-1200 отдельной структурной единицей входит возбудитель. Возбудитель имеет замкнутую систему воздушного охлаждения. В системе охлаждения применяются четыре водяных воздухоохладителя. Воздухоохладители системы замкнутого воздушного охлаждения являются в этой цепочке конечным звеном. Соответствующие экраны системы воздушного охлаждения возбудителя и отдельно взятого воздухоохладителя системы охлаждения приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

На экране системы воздушного охлаждения возбудителя выводится следующая информация:

- общий вид возбудителя с указанием мест установки встроенных воздухоохладителей, напротив которых расположены таблички-виджеты, обобщающие все предупредительные и аварийные сигналы по соответствующему воздухоохладителю;
- продольный разрез возбудителя со схемой вентиляции;

- значения относительной влажности в двух контрольных точках в торцевых зонах возбудителя;
- основные параметры охлаждающей воды: температура воды на входе в охладители, суммарный расход воды через охладители, максимальный разброс температур воды на выходе из охладителей (максимум-минимум);
- основные параметры охлаждающего воздуха в возбудителе: максимальная температура горячего воздуха перед воздухоохладителями, максимальная температура холодного воздуха за воздухоохладителями и минимальная температура холодного воздуха за воздухоохладителями;
- сигнал о наличии жидкости в корпусе возбудителя (по датчику уровня);
- обобщающие признаки, характеризующие техническое состояние воздухоохладителей в целом;
- обобщающие признаки группы самодиагностики, характеризующие возможность функционирования самого диагностического алгоритма в текущих условиях с учётом наличия или отсутствия тех или иных измеряемых параметров.

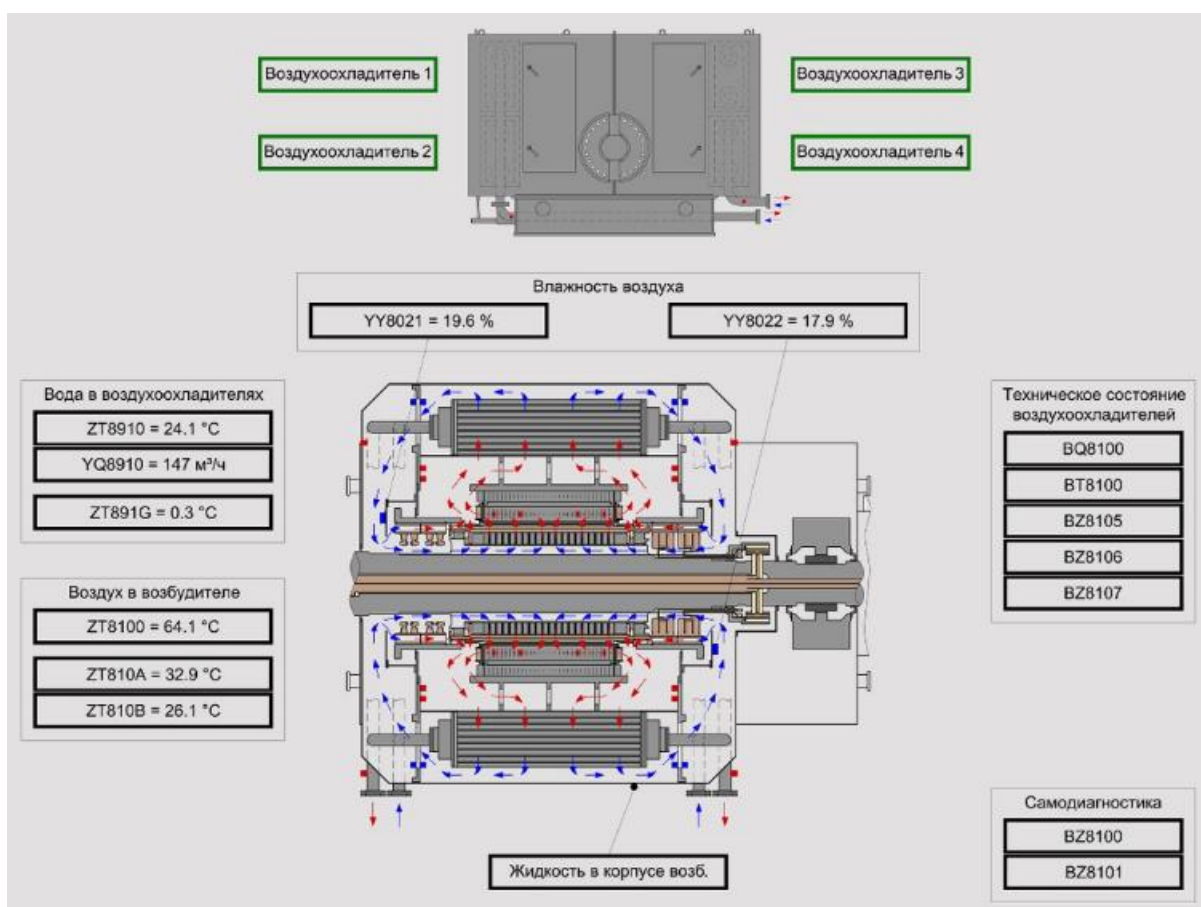


Рис. 2. Экран диагностики системы воздушного охлаждения возбудителя

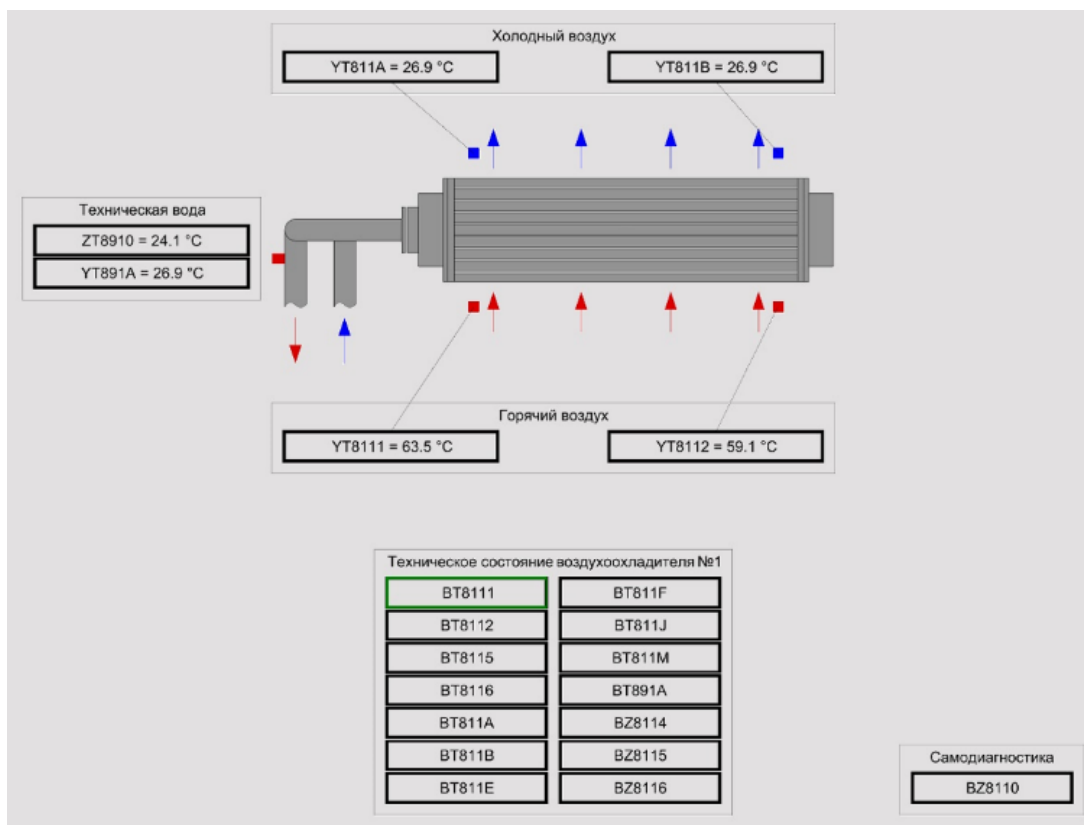


Рис. 3. Экран диагностики воздухоохлаждителя системы охлаждения возбудителя

Обобщающие признаки, характеризующие техническое состояние воздухоохлаждителей в целом, связаны с диагностическим алгоритмом, выявляющим общие проблемы в работе всей группы охладителей. Ниже в таблице 1 приведены дословно формулировки диагностических признаков-сообщений в порядке их следования на экране (см. рис.2) с указанием принятой степени критичности события. При этом степень критичности события определяется в соответствии с требованиями РЭ на поставляемое оборудование следующим образом:

- «П» – предупредительное событие – не требует от оператора немедленных действий;
- «А» – аварийное событие – требует от оператора немедленных действий с целью корректировки выявленного недопустимого состояния оборудования.

Диагностические признаки критичности «А» в пунктах 1 и 5 таблицы, требующие разгрузки и отключения возбудителя и генератора, отрабатывают соответствующие пункты РЭ на диагностируемое оборудование, предписывающие отключение оборудования в случае возникновения серьёзных проблем с охлаждением, таких как недопустимое снижение расхода охлаждающей воды в целом или отказ части воздухоохлаждителей (обычно двух и более). Диагностические признаки в пунктах 2, 3

и 4 указывают на проблемы в работе воздухоохлаждавателей, позволяющие работать далее, но требующие проведения анализа причин выявленных отклонений в работе и их скорейшего устранения в течение регламентированного срока.

Таблица 1

Признаки-сообщения, характеризующие техническое состояние воздухоохлаждавателей в целом

№	Идентификатор	Критичность события / признак-сообщение	
1	BQ8100	А	Отказ воздухоохлаждавателей возбудителя. Расход воды через охладители ниже предельно допустимого. Отключить турбогенератор от сети
2	BT8100	П	Предельное состояние воздухоохлаждавателей возбудителя. Неравномерный подогрев воды в охладителях
3	BZ8105	П	Предотказное состояние воздухоохлаждавателей возбудителя. Расход и давление воды на входе ниже нормы
4	BZ8106	П	Предотказное состояние воздухоохлаждавателей возбудителя. Расход воды через охладители ниже нормы. Давление воды на входе в норме
5	BZ8107	А	Отказ воздухоохлаждавателей возбудителя. Количество охладителей с недопустимо низкой эффективностью охлаждения воздуха превышает разрешённое. Отключить турбогенератор от сети

Признаки группы самодиагностики характеризуют работоспособность самого диагностического алгоритма с учётом наличия или отсутствия тех или иных измеряемых параметров: температуры воздуха перед и за охладителями, температуры охлаждающей воды на входе в охладитель и на выходе из него, расхода охлаждающей воды и т.п. На экран выводится два признака самодиагностики:

— BZ8100 «Диагностирование воздухоохлаждавателей возбудителя отключено» - обобщающий признак, активируется при отключении диагностирования работы всех воздухоохлаждавателей возбудителя;

— BZ8101 «Диагностирование воздухоохлаждавателей возбудителя частично отключено» - активируется при отключении диагностирования работы только части охладителей. Отключение диагностирования одного или нескольких охладителей может быть связано при этом, например, с отказом всех установленных датчиков

температуры горячего воздуха перед охладителем и/или холодного воздуха на выходе из него.

Причины нарушения работоспособности системы охлаждения кроются в ухудшении рабочих характеристик или отказе одного, или нескольких воздухоохладителей системы охлаждения. Негативные явления, возникающие в процессе эксплуатации оборудования и приводящие к деградации характеристик воздухоохладителей, могут быть разные, например, загрязнение внутренней поверхности или оребрения охлаждающих трубок, снижение расхода воды относительно номинального значения через один охладитель или через всю группу охладителей и пр. Для анализа эффективности работы отдельно взятого охладителя от общего экрана системы охлаждения возбудителя можно перейти к экрану диагностики любого из четырёх воздухоохладителей системы охлаждения – см. рис.3. На экране диагностики воздухоохладителя представлены:

- изображение охладителя со схемой движения воздуха и охлаждающей воды;
- места установки датчиков температуры холодного и горячего воздуха и измеряемые значения температуры воздуха;
- измеряемые значения температуры охлаждающей воды на входе в охладитель и на выходе из охладителя;
- группа признаков, характеризующих техническое состояние диагностируемого охладителя;
- признак самодиагностики «Диагностирование воздухоохладителя № 1...4 возбудителя отключено», характеризующий возможность диагностирования воздухоохладителя.

В группу признаков, характеризующих техническое состояние воздухоохладителя, входят признаки, выявляющие следующие проблемные ситуации:

- отрицательный перепад температур «выход-вход» охлаждающей воды в воздухоохладителе (формально, охлаждение воды в воздухоохладителе, что с высокой вероятностью может означать наличие проблем в системе измерения);
- отрицательный перепад температур холодного воздуха в зоне расположения одного из датчиков и охлаждающей воды в воздухоохладителе (формально, воздух остывает до температуры меньшей, чем температура охлаждающей воды, что также может означать наличие проблем в системе измерения);

- повышенный подогрев воздуха в зоне расположения одного из датчиков температуры;
- отклонение температуры холодного воздуха в зоне расположения одного из датчиков от среднего значения температуры холодного воздуха выше принятой нормы;
- отклонение температуры горячего воздуха в зоне расположения одного из датчиков от среднего значения температуры горячего воздуха выше принятой нормы;
- подогрев воды в воздухоохладителе выше принятой нормы, отдельно отмечается ситуация, когда это происходит одновременно с превышением допустимой электрической мощности;
- разность температур холодного воздуха и охлаждающей воды на входе в охладитель выше принятой нормы, отдельно отмечается ситуация, когда это происходит одновременно с превышением допустимой электрической мощности;
- предотказное состояние воздухоохладителя, пониженная эффективность охлаждения воздуха (из-за загрязнения поверхности охлаждения или снижения расхода охлаждающей воды);
- отказ воздухоохладителя, недопустимо низкая эффективность охлаждения воздуха (из-за сильного загрязнения поверхности охлаждения или критического снижения расхода охлаждающей воды).

Соответственно, при активации любого из диагностических признаков по какому-либо охладителю факт срабатывания данного признака и критичность события выводятся в соответствующие обобщающие виджеты «Воздухоохладитель 1» ... «Воздухоохладитель 4» на экране системы охлаждения возбудителя (рис.2), причём используется правило, что более критичное событие доминирует над менее критичным, т.е. при одновременном диагностировании отказа охладителя с критичностью «А» и повышенного подогрева воздуха с критичностью «П» виджет получает визуальные атрибуты события типа «А», так что наиболее критические события не могут остаться незамеченными. Далее оператор имеет возможность перейти от главного экрана системы охлаждения к экрану диагностики конкретного охладителя и изучить состояние охладителя детально. Аналогичным образом выстроены взаимосвязи и других экранов системы диагностики, обеспечивающих сбор данных по выявляемым отклонениям в работе оборудования от частного к общему, от отдельных диагностируемых элементов, функциональных блоков оборудования к

диагностируемой единице оборудования в целом.

В качестве другого примера можно привести алгоритм диагностирования режима работы турбогенератора по электрическим величинам, в котором диагностируются уже не отдельно взятый функциональный элемент оборудования, а основные режимные параметры работы турбогенератора в целом. Данный алгоритм является одним из наиболее важных алгоритмов, относящихся к турбогенератору, так как служит для предупреждения оператора об отклонении режимных параметров работы турбогенератора от нормы, о переходе режимных параметров из нормальной, длительно разрешённой зоны работы, в зоны, работа в которых ограничена во времени требованиями РЭ или иных нормативных документов, а также фиксации соответствующих событий и длительности работы оборудования в упомянутых режимах, лимитированных по времени требованиями РЭ.

Рабочий экран алгоритма диагностирования режима работы турбогенератора по электрическим величинам представлен на рис.4.

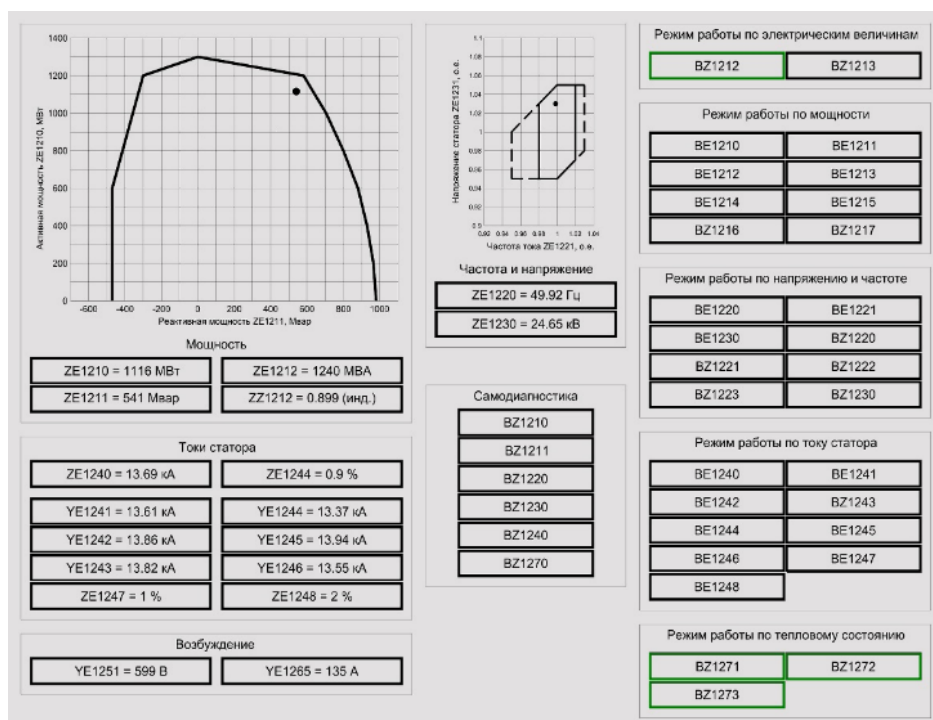


Рис. 4. Экран диагностики работы турбогенератора по электрическим величинам

На экран диагностирования режима работы турбогенератора по электрическим величинам выводится следующая информация:

- диаграмма мощности турбогенератора с изображением текущей рабочей точки, а также сами текущие значения активной, реактивной, полной мощности

турбогенератора и коэффициента мощности;

— текущие значения токов в фазах обмотки статора, а также разность токов трёхфазных составляющих шестифазной обмотки статора турбогенератора и токи обратной последовательности первой и второй трёхфазной составляющей обмотки статора турбогенератора;

— напряжение и ток в обмотке возбуждения ротора;

— диаграмма одновременных отклонений по частоте и напряжению статора, построенная в относительных единицах, с изображением текущей рабочей точки, а также сами значения частоты и напряжения обмотки статора;

— обобщающие признаки группы самодиагностики, характеризующие возможность функционирования самого диагностического алгоритма в текущих условиях с учётом наличия или отсутствия тех или иных измеряемых параметров;

— обобщающие признаки, характеризующие режим работы по электрическим параметрам в целом;

— признаки, характеризующие режим работы по мощности;

— признаки, характеризующие режим работы по напряжению и частоте;

— признаки, характеризующие режим работы по токам фаз обмотки статора;

— признаки, характеризующие режим работы по тепловому состоянию.

К обобщающим признакам группы самодиагностики относятся признаки, указывающие на отключение диагностирования режимов работы турбогенератора по следующим направлениям:

— по активной и реактивной мощности»;

— по частоте тока статора;

— по напряжению статора;

— по току статора;

— по напряжению и току возбуждения;

— также формируется обобщающий признак «Диагностирование режимов работы турбогенератора по электрическим величинам отключено», сигнализирующий о полном отключении диагностирования при отключении диагностирования по всем вышеперечисленным направлениям одновременно.

В группу признаков, характеризующих режим работы турбогенератора по мощности, входят признаки, информирующие о:

- возникновении двигательного режима работы турбогенератора;
- выходе рабочей точки за диаграмму мощности;
- увеличении скорости изменения активной и/или реактивной мощности турбогенератора сверх нормируемых значений;
- обнаружении сброса или наброса активной нагрузки;
- превышении количества сбросов и набросов активной нагрузки за год сверх допустимых годовых значений количества сбросов/набросов.

В группу признаков, характеризующих режим работы турбогенератора по напряжению и частоте, входят признаки, информирующие о:

- недопустимом одновременном отклонении напряжения и частоты тока статора;
- работе турбогенератора вне области длительно допустимых одновременных отклонений напряжения и частоты тока статора;
- длительной работе с частотой тока статора, отличной от номинальной;
- превышении допустимой продолжительности режима работы с частотой тока статора, отличной от номинальной;
- большой суммарной продолжительности работы за всё время эксплуатации с частотой тока статора, отличной от номинальной;
- превышении допустимой суммарной продолжительности работы турбогенератора за всё время эксплуатации с частотой тока статора, отличной от номинальной;
- недопустимом отклонении напряжения статора от номинального значения;
- превышении допустимого значения количества пусков в год.

В группу признаков, характеризующих режим работы турбогенератора по току статора, входят признаки, информирующие о:

- повышенном значении тока обратной последовательности;
- повышенном значении тока обратной последовательности с одновременным превышением номинального значения тока в одной из фаз обмотки статора;
- повышенном значении разности токов трёхфазных составляющих шестифазной обмотки статора;
- превышении нормального значения тока статора при пониженном напряжении статора.

Таким образом, данный алгоритм способен оперативно и безошибочно, в режиме реального времени выявлять большое количество возможных аномалий, отклонений от нормального режима работы оборудования. Очевидно, что в случае ручного анализа электрических режимных параметров работы оператором ожидать столь же эффективного, своевременного обнаружения возможных отклонений в работе генератора одновременно по всем перечисленным направлениям было бы излишне оптимистично. И только внедрение автоматизированной системы диагностики позволяет добиться должного результата – непрерывно получать достоверную оценку о текущем состоянии оборудования в режиме реального времени и без возможных негативных эффектов, связанных с влиянием человеческого фактора.

Для взаимодействия с вышестоящими экранами системы диагностики предусмотрены обобщающие признаки. К обобщающим признакам, характеризующим режим работы по электрическим величинам, относятся два признака:

- «Нормальный режим работы турбогенератора по электрическим величинам»;
- и «Ненормальный режим работы турбогенератора по электрическим величинам».

Первый становится активным, если ни одного из ранее перечисленных возможных отклонений от нормального режима работы по мощности, напряжению и частоте, или по току статора не выявлено и все диагностические признаки соответствующих групп пассивны. В противном случае, если обнаруживается хотя бы одна из проблем, активизируется второй признак. Эти обобщающие признаки совместно с признаками, указывающими на отключение диагностирования, выносятся также на обобщающие экраны-мнемосхемы турбогенератора и турбоагрегата в целом, что изначально даёт оператору представление о наличии или отсутствии каких-либо проблем с турбогенератором в составе турбоагрегата. И далее, получив предупредительный сигнал о ненормальном режиме работы турбогенератора, оператор имеет возможность перейти к экрану диагностики турбогенератора и детально разобраться в сути проблемы и причинах появления обобщающего сигнала.

С. Использование в АСМПД алгоритмов с неявной логикой. Область применения и настройка алгоритмов

Выше были рассмотрены принципы построения системы диагностики и дан

краткий обзор двух диагностических алгоритмов – системы воздушного охлаждения возбудителя турбогенератора и режима работы турбогенератора по электрическим параметрам. Диагностируемые данными алгоритмами аномалии, отклонения от нормальной работы, определяются с использованием явно выраженных аналитических зависимостей и диагностических правил, разработанных экспертами в данной области.

Но встречаются и другие ситуации, когда теоретических представлений о каком-либо сложном, плохо изученном процессе, явлении, взаимосвязях между измеряемыми или рассчитываемыми параметрами рабочего процесса оказывается недостаточно, либо производительность имеющихся вычислительных средств и существующие методы решения не позволяют осуществить моделирование физического процесса в режиме реального времени. В таких ситуациях строить систему диагностики с использованием аналитических моделей не представляется возможным, и на помощь приходят методы моделирования с неявной логикой – нейросетевые и т.п. методы.

Одной из типовых задач, в которой целесообразно использование такого подхода, является диагностика вибросостояния статора, в частности, контроль уровня вибрации лобовых частей обмотки и выводных шин. На вибрацию указанных элементов статора влияет очень много различных факторов, достоверно учесть которые при построении аналитической модели практически невозможно, к тому же всегда присутствует некоторый разброс вибрационных характеристик конструктивных элементов от машины к машине. В то же время, контроль вибросостояния и своевременное выявление проблем, связанных с усилением вибрации элементов статора и ослаблением креплений, необходимы. Постепенное ослабление креплений токоведущих частей, усиление уровня их вибрации может привести к негативным последствиям, в конечном итоге возможно физическое разрушение токоведущего элемента, что означает серьёзную аварию генератора с аварийным остановом и выводом в ремонт, зачастую на длительный срок.

В такой ситуации наиболее эффективным решением представляется построение эталонной диагностической модели с использованием методов машинного обучения. Если аналитически описать нормальное вибросостояние всех диагностируемых элементов обмотки статора и её крепёжных элементов от многомерного массива входных данных, влияющих на это вибросостояние, не представляется возможным, то найти эту взаимосвязь с использованием нейронной сети является уже вполне

посильной задачей, разумеется, при условии грамотного выбора входных параметров, оказывающих влияние на вибросостояние данных элементов. И в этом смысле, эффективность работы такой эталонной модели, точность, с которой нейросетевая модель имитирует исправно работающее оборудование и точность выявления аномалий в вибрации элементов обмотки и её креплений, будет определяться квалификацией эксперта, определяющего входные и выходные диагностируемые параметры, характеризующие работу оборудования, а также полнотой данных, доступных для обучения модели. Для АСМПД АО «Силовые машины» эталонные модели строятся с привлечением широкого круга специалистов завода-изготовителя, конструкторов, испытателей, специалистов в области надежности и качества. Кроме того, осуществляется постоянная консультация эксплуатирующей организацией.

В целом, процесс построения эталонной нейросетевой модели выглядит следующим образом:

- экспертно выбираются измеряемые и вычисляемые параметры работы турбогенератора, оказывающее влияние на вибросостояние диагностируемых элементов, и здесь очень важна роль эксперта;

- после ввода генератора в эксплуатацию происходит обучение модели – на заведомо исправном оборудовании выстраивается многомерная эталонная зависимость вибрации в различных контрольных точках статора турбогенератора от режимных параметров (активная и реактивная мощность и пр.), параметров охлаждающих сред (температура, расход дистиллята) и других влияющих на вибрацию параметров;

- в процессе дальнейшей эксплуатации диагностический алгоритм непрерывно рассчитывает теоретически ожидаемые (эталонные) значения вибрации в контрольных точках в зависимости от текущих значений входных режимных параметров и сравнивает рассчитанные эталонные значения с фактическими значениями вибрации. При появлении расхождений, превышающих некоторую экспертно назначенную уставку, диагностический алгоритм формирует сообщение об обнаружении аномалии.

Данная эталонная модель основывается на рекуррентных нейронных сетях типа LSTM (сети долгой краткосрочной памяти), имитируя эксперта, способного одновременно анализировать 1000 и более параметров системы и выявлять неявные зависимости.

Процедура аналитики включает в свой состав следующие основные алгоритмы:

- модели подсистем оборудования, имитирующие состояние при отсутствии неисправностей;
- расчет интегральных показателей технического состояния оборудования на основе разности между результатами моделирования идеального состояния и фактическими данными эксплуатации;
- классификатор дефектов для определения и классификации событий, выявленных на объекте;
- модель прогнозирования технического состояния подсистем оборудования.

Такая процедура позволяет качественно диагностировать оборудование в условиях отсутствия отказов в исторических данных. Для её работы достаточно иметь данные за период не менее 1 года. Исключением в данном случае является классификатор дефектов, работа которого обеспечивается путём написания экспертных диагностических правил, устанавливающих взаимосвязь между различными сочетаниями разладок контролируемых параметров и дефектами, вызывающими данные разладки. Точность выявления того или иного дефекта при этом будет зависеть от квалификации, опыта эксперта, разрабатывающего данные правила.

D. Опыт внедрения АСМПД на Ленинградской АЭС-2

С целью реализации функции «глубокой» диагностики отклонений в работе турбогенератора на энергоблоке № 2 Ленинградской АЭС-2 в 2021 году блоком по вводу в эксплуатацию АЭС АО «Концерн Росэнергоатом» принято решение об опытной эксплуатации автоматизированной системы мониторинга и предиктивной диагностики оборудования турбогенератора (ПТК ТКД ТГ).

В январе 2022 года на энергоблоке №2 Ленинградской АЭС-2 специалистами АО «Силовые Машины» при участии руководителей электрического цеха, цеха тепловой автоматики и измерений Ленинградской АЭС выполнен монтаж, подключение и ввод в опытную эксплуатацию стойки ПТК ТКД ТГ. В настоящий момент осуществляется опытная эксплуатация ПТК ТКД ТГ, ведутся работы по поэтапному внедрению и расширению функционала АСМПД. Осуществляется имплементация, настройка и валидация алгоритмов диагностики оборудования.

Завершение опытной эксплуатации запланировано на 2023 год.

ВЫВОДЫ

Таким образом, система мониторинга и диагностики турбинного и генераторного оборудования электростанций была успешно адаптирована для диагностики турбогенератора типа ТЗВ-1200 Ленинградской АЭС-2. В ходе выполнения работы были успешно выполнены следующие этапы:

- разработана аппаратная и программная части АСМПД, включая комплекс программно-технический технологического контроля и диагностики (ПТК ТКД), предназначенный для использования в качестве автоматизированного средства среднего уровня и верхнего уровня предиктивной диагностики;
- проработаны научно-теоретические основы, созданы диагностические алгоритмы для выявления аномалий в работе наиболее ответственных функциональных элементов оборудования и для обнаружения отклонений в его основных режимных параметрах, разработаны программные модули – автоматизированные средства технического диагностирования (АСТД), реализующие данные алгоритмы.
- реализованная система мониторинга и диагностики в настоящий момент проходит внутреннюю проверку и пусконаладочные работы, в ближайшее время она будет введена в эксплуатацию на Ленинградской АЭС-2.

Оснащение основного генерирующего оборудования на объектах электрогенерации разработанной системой мониторинга и диагностики позволит Заказчику получить следующие принципиально важные преимущества:

- контроль соблюдения требований РЭ на оборудование, заблаговременная выдача предупредительных сигналов и фиксация нарушений (превышение допустимых температур, выход за границы диаграммы мощности и пр.);
- контроль регламентируемых рабочих параметров и скорости их изменения при переходных процессах пуска и останова оборудования, набора или сброса нагрузки и пр., выдача предупредительных сигналов и фиксация нарушений;
- определение вида дефекта, причин его возникновения и рекомендаций по его устранению.
- минимизация негативного влияния человеческого фактора в процессе эксплуатации оборудования за счёт мероприятий вышеизложенных пунктов;
- ведение журнала событий, помощь в установлении причин возникновения

неисправностей (при наличии таковых) и ответственной стороны;

- корректный учёт количества пусков оборудования, сбросов/набросов нагрузки, своевременное планирование и проведение технического обслуживания, повышение надёжности и минимизация расходов на выполнение внеплановых ремонтов, вызванных отказом оборудования;

появление в руках Заказчика эффективного инструмента, позволяющего выявлять случаи нарушений требований руководящих документов во время эксплуатации оборудования и оперативно вырабатывать соответствующие корректирующие мероприятия для исключения повторения выявляемых проблем в будущем и повышения качества эксплуатации и обслуживания оборудования, надёжности и безотказности эксплуатируемого оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минэнерго России от 25.10.2017 №1013 “Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики”, Минэнерго России, 2017 г.

2. Э.И. Гуревич, Температурная диагностика электрических машин. Санкт-Петербург, 1997.

3. Г.М. Хуторецкий, Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, 1987.

4. Ю.Н. Самородов, Дефекты генераторов. Москва, 2005 г.

5. О.С. Голоднова, Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения. Москва, 2005 г.

Гуревич О.С.¹, Гулиенко А.И.¹, Власов А.И.², Опалев Ю.Г.²

¹ЦИАМ им. П.И. Баранова

²АО «Электропривод»

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С 5-ТИ КРАТНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ ПО ТОКУ ДЛЯ ТОПЛИВНОГО НАСОСА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: Излагаются особенности построения электропривода (ЭП) для вращения топливных насосов, обусловленные требованиями их функционирования в составе газотурбинного двигателя авиационного применения: широкий диапазон изменения частоты вращения, кратковременная перегрузка по току, высокое быстродействие. Рассмотрены аппаратные средства реализации этих требований и их влияние на массу ЭП.

Ключевые слова: вентильный электропривод, перегрузка по току, система топливопитания.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электрификация систем газотурбинных двигателей (ГТД) всегда рассматривалась как одно из перспективных направлений улучшения их функциональных характеристик. Так для запуска применялись электрические стартеры на базе электродвигателей постоянного тока [1], а вращения насосов - асинхронные электродвигатели [2]. Однако в силовых установках воздушных судов они получили ограниченное распространение из-за их недостаточной надёжности и массогабаритных характеристик.

Появление вентильных электроприводов (ЭП) с возбуждением от постоянных магнитов привело к существенному улучшению их характеристик, которые позволили разрабатывать насосы с электроприводом, не уступающим по характеристикам насосам с механическим приводом от коробки приводов агрегатов (КПА) двигателя, и во многих работах показана эффективность их применения в системах ГТД [3] - [7].

В системах топливопитания (СТП) с механическим приводом насосов имеет место жёсткая связь между частотой вращения ротора насоса и ротора ГТД, которая приводит к необходимости отдельного дозатора топлива в камеру сгорания, перепускающего излишки топлива во входную магистраль СТП для согласования

расхода топлива на выходе насоса с потребностями двигателя [7]. Применение же ЭП для вращения насоса разрывает эту связь и позволяет управлять подачей топлива без дозатора. На рис.1 показаны схемы СТП: традиционная с приводом насосов от КПА (рис.1А) и с электрическим (рис.1В). В традиционной системе имеется дозатор топлива (ДТ) с магистралью перепуска, а в электроприводной – электроприводы ЭП-Н и ЭП-В с регулируемой частотой вращения ($n = var$) для вращения насосов низкого и высокого давления (ННД и НВД). Системы содержат фильтр, обратный клапан (ОК) и электронный цифровой регулятор (ЭЦР) двигателя.

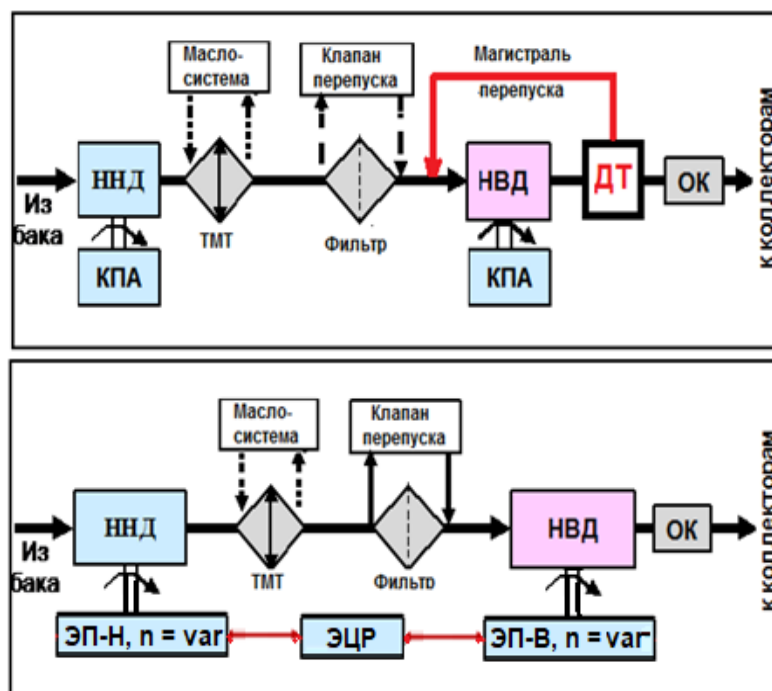


Рис.1. Системы подачи топлива ГТД

Ниже рассматриваются реализации в электроприводе базовых требований к СТП ГТД [7]:

- подача топлива на установившихся режимах работы двигателя в диапазоне 1 : 20 (30);
- переход с режима минимальной подачи топлива на максимальную за 5...10 секунд,
- снижение / увеличение подачи за время не более 0.5 сек при работе систем защиты.

Управление ЭП реализуется путём задания из ЭЦР сигнала управления для перехода на новую частоту вращения ротора ЭП в виде: значения частоты вращения (скорости) электродвигателя или тока в его обмотках.

Высокие требования к показателям надёжности агрегатов систем топливопитания (ресурс более 40000 часов) требуют обеспечения функционирования ЭП: без изменения его характеристик при одном отказе и со снижением мощности не более 20...25% от максимальной - при двух.

II. РЕАЛИЗАЦИЯ В ЭП ТРЕБОВАНИЙ ЭСП

Реализацию по сигналу из ЭЦР необходимой частоты вращения ЭП и, следовательно, расхода топлива в ГТД, обеспечивает САУ электропривода. Она построена по принципу прямого подчинённого регулирования и содержит два контура – регулирование частоты вращения и тока. Под прямым цифровым управлением понимается не только непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя (инвертора и управляемого выпрямителя), но и обеспечение возможности прямого ввода в микроконтроллер сигналов различных обратных связей (независимо от типа сигнала: дискретный, аналоговый или импульсный) с последующей программно-аппаратной обработкой внутри микроконтроллера. Структурная схема системы показана на рис. 2.

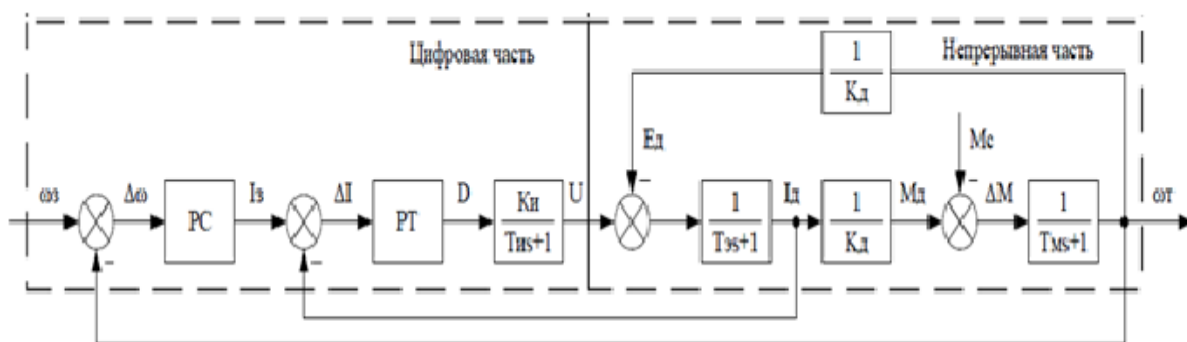


Рис. 2. Структурная схема системы регулирования

РС – регулятор скорости, РТ – регулятор тока, ω_z – сигнал заданной скорости, ω_t – сигнал текущей скорости, I_z – заданный ток, I_d – текущий ток ЭД, D – коэффициент заполнения ШИМ, U – напряжение на выходе инвертора, E_d – ЭДС ЭД, M_d – момент ЭД, M_c – момент нагрузки. K_i – коэффициент усиления инвертора, K_d – передаточный коэффициент ЭД ($1.066 \text{ об/с} \cdot \text{В}$), T_i – постоянная времени инвертора ($T_i=10 \text{ мкс}$), T_s – электрическая постоянная времени ЭД ($T_s = 0.0047 \text{ с}$), T_m – механическая постоянная времени ЭД ($T_m = 0.104 \text{ с}$)

Регулятор скорости формирует сигнал задания по току $I_{зад}$. Сигнал обратной связи по току $I_{тек}$ поступает на АЦП с датчиков тока, выполненных на основе шунта и микросхем измерения с гальванической развязкой. С учетом ограничения максимального значения сигнал рассогласования поступает на вход регулятора тока, а на его выходе формируется заданное напряжение ЭД.

Контур регулирования тока реализован с помощью ПИ-регулятора. На вход ПИ-регулятора тока поступает сигнал равный величине рассогласования между заданным и текущим током. На выходе ПИ-регулятора тока формируется значение коэффициента заполнения ШИМ ($T_s=0.0001$ с). Исходя из $T_s = 0.0047$ с выбирается постоянная времени замкнутого контура регулирования тока $T_{рт} = 0.007$, что позволяет достичь максимального быстродействия с приемлемым перерегулированием.

Контур регулирования скорости также реализован с помощью ПИ-регулятора. На вход его ПИ-регулятора с учетом ограничения по максимальному ускорению поступает величина рассогласования $\Delta\omega$ между заданной ω_z и текущей частотой вращения ω_t . На выходе ПИ-регулятора скорости формируется значение заданного тока. Исходя из $T_m=0.104$ с (для ЭД), требуемая постоянная времени контура регулирования скорости выбирается $T_{рс} = 0.15$ с, что позволяет достичь максимального быстродействия – менее 0.5 с на полную перекладку от минимального значения частоты вращения ЭП до максимального, с приемлемым перерегулированием.

При определении номинальной (расчётной) величины мощности необходимо учитывать типовой полётный цикл (ТПЦ) ГТД. Анализ показывает, что в ТПЦ гражданского самолёта время работы топливных насосов на режиме максимальной мощности занимает лишь несколько процентов от общего времени полёта, а остальное время они работают на режимах с пониженной мощностью. Для примера на рис. 3 показано изменение потребной мощности топливного насоса и его частоты вращения ТРДД среднемагистрального самолёта в ТПЦ. Видно, что на длительном крейсерском режиме потребляемая насосом мощность составляет около 11% от мощности на взлётном режиме, где она максимальна.

В то же время вентиляльные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе обладают возможностью работать длительное время (до 5 минут) со значительной перегрузкой по мощности (току) [8]. Сочетание этих двух факторов:

кратковременность работы топливного насоса на режиме максимальной мощности и возможность работы ЭП с перегрузкой, может быть использовано для выбора мощности ЭП при его проектировании [8].

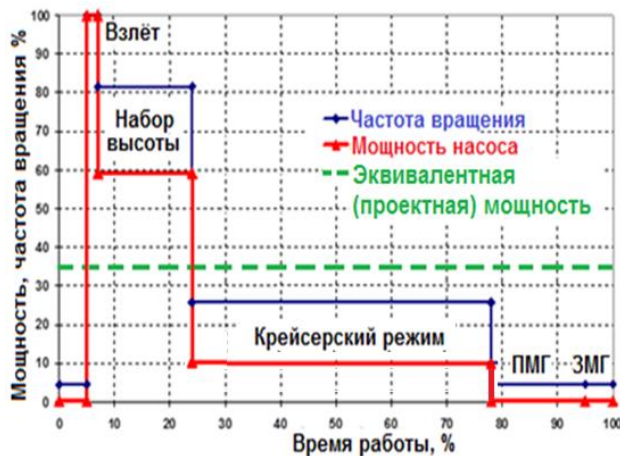


Рис. 3. Изменение частоты и мощности насоса в ТПЦ

Для ТПЦ на рис.3 при максимальной мощности на выходном валу насоса 25 кВт расчётная мощность электропривода составляет 4.8 кВт (пунктир на рис.3), а соответствующая величина перегрузки равен 5.2. Этот коэффициент перегрузки обеспечивается в ЭП:

- выбором транзисторов инвертора с некоторым «запасом» по возможности пропускать через себя максимальный ток электродвигателя;
- охлаждением топливом теплонагруженных узлов – обмоток статора, постоянных магнитов, силового модуля блока управления,
- высокой жёсткостью механической характеристики, которая достигается применением сборной магнитной системы ротора с эффективным сочетанием магнитомягких материалов и высокоэнергетических постоянных магнитов.

При токе выше максимального значения для электродвигателя транзисторы будут нагреваться до максимально допустимой температуры, но время такого режима работы регламентируется и контролируется системой управления. Это позволяет кратковременно получать повышенный момент на валу электродвигателя и реализовать высокое быстродействие ЭП.

В СТП с насосами низкого и высокого давления прокачка топлива через ЭП может быть организована путём подачи топлива из-за ННД сначала в тракт охлаждения ЭП, после чего подаётся на вход насоса ННД и далее в камеру сгорания (вариант А на рис.3)

или же путём отбора части топлива с выхода в ННД и сброса нагретого топлива на его вход (вариант В на рис.3)

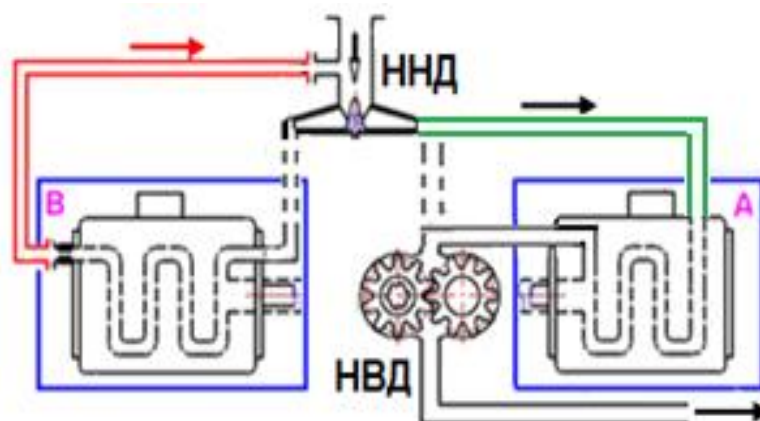


Рис.4. Схемы охлаждения электропривода топливом, прокачиваемого насосом

Сравнение величины подогрева топлива для этих схем показывает, что на режиме работы с максимальной температурой топлива в баке в варианте схемы А на режиме «взлёт» величина подогрева составляет $3.5...5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для схемы В величина дополнительного подогрева топлива выше на 5°C из-за циркуляции топлива вокруг ННД. Недостатком варианта В также является также необходимость дополнительного трубопровода с выхода электропривода на вход в ННД (красный цвет на рис.3). Эффективность охлаждения в варианте А достигается и тем, что на режиме максимальной мощности электропривода имеет место и максимальная прокачка топлива через него.

III. ПОСТРОЕНИЕ ЭП МОЩНОСТЬЮ 25 КВТ

Электропривод мощностью 25кВт (ЭП-25) создавался в 2013 году с целью демонстрации возможности реализации кратковременной 5-ти кратной перегрузки по току и получения высокого быстродействия в виде изменения частоты вращения ЭП от минимального значения до максимального за время не более 0.5 сек. Он содержит вентильный двигатель постоянного тока (ВДПТ) и блок управления и контроля БУК.

В состав БУК входят: микроконтроллер, инвертор, драйверы, датчики тока, конденсатор, балластные резисторы, преобразователи напряжения, интерфейсные блоки связи с САУ ГТД. БУК обеспечивает изменение частоты вращения ЭД в заданном диапазоне с допустимой скоростью и ограничение её максимального и минимального значений, контроль температуры силовых обмоток электродвигателя и

ограничение максимального тока в них, фиксацию общей наработки ЭП и, отдельно, время работы на режиме с перегрузкой, контроль технического состояния и др.

Инвертор ЭП содержит шесть независимо управляемых ключей, предназначенных для коммутации фаз обмотки статора ВДПТ, и ключ управления балластным резистором. Ключ резистора включается датчиком напряжения сети, который срабатывает при превышении значения напряжения на шине питания. Конденсатор выполняет функцию компенсации паразитной индуктивности линий силового питания 270В, сглаживания пульсаций тока и поглощения избыточной энергии в режимах торможения.

Балластные резисторы выполняют функцию поглощения избыточной энергии в режимах торможения при превышении напряжения на шине питания 270 В выше заданного значения. Датчики тока на эффекте Холла измеряют ток по фазам А и В.

Питание модулей схемы осуществляется от преобразователей DC/DC с первичным питанием 27 В. Интерфейсные блоки предназначены для связи с вышестоящими системами.

Основным элементом БУК является микроконтроллер, который:

- принимает управляющие сигналы от ЭЦР ГТД, датчиков тока и ДПР и определяет по ним частоту и направление вращения ротора;
- на основе сигнала задания и информации, пришедшей по каналам обратных связей, при помощи регуляторов тока и скорости определяет управляющее воздействие на ВДПТ;
- формирует ШИМ-сигналы для управления ключами инвертора.

ЭП работает в двух режимах: с заданием по частоте вращения ротора и заданием по величине тока в силовых обмотках. В первом случае привод работает с поддержанием заданной частоты вращения, а втором – заданного тока, который пропорционален крутящему моменту. При этом частота вращения ЭД изменяется.

По сигналу задания $\omega_{\text{зад}}$ и текущей частоте вращения $\omega_{\text{тек}}$, поступающей с ДПР, с учетом ограничения по максимальному ускорению, вычисляется сигнал рассогласования по частоте вращения $\Delta\omega$. Регулятор скорости формирует сигнал задания по току $I_{\text{зад}}$. Сигнал обратной связи по току $I_{\text{тек}}$ поступает на АЦП с датчиков тока, выполненных на элементах Холла.

Сигналы рассогласования по току с учетом ограничения максимального значения

поступают на вход регулятора тока, на выходе которого формируется заданное напряжение ВДПТ. ШИМ-формирователь с учетом текущего положения ротора формирует шесть ШИМ-сигналов управления ключами инвертора, которые поступают на драйверы его ключей.

Регулятор скорости и регулятор тока работают одновременно. В случае, если регулятор тока формирует ток в обмотке статора электродвигателя ниже тока ограничения силового модуля, то ЭП управляется по скорости путем формирования на обмотке статора электродвигателя соответствующего скорости напряжения. Если ток в обмотке статора достигает тока ограничения силового модуля, то ЭП переходит в режим управления по току, в котором частота вращения электродвигателя не регулируется и происходит ее снижение за счет снижения напряжения на обмотке статора. Время перехода из одного режима в другой определяется быстродействием регулятора тока.

Драйверы инвертора формируют импульсы управления IGBT транзисторами требуемой амплитуды и мощности. Они обладают защитой от перегрузки ключей инвертора по току, а также защитой по снижению или пропаданию напряжения питания. В обоих случаях производится выключение ключа с выдачей сигнала ERR. В случае пропадания или снижения параметров питания драйверы автоматически отключают ключи инвертора. Информация из встроенной системы контроля электропривода передаётся в систему высшего уровня (САУ ГТД или стендовую систему).

Конструктивно ВДПТ (рис.5) состоит из ротора 1 с постоянными магнитами, корпуса со статором 2, шарикоподшипниковых узлов 3, датчика положения ротора 4 на элементах Холла, блока управления и контроля, интегрированного в корпус ВДПТ. БУК осуществляет управление ВДПТ, контроль состояния и обмен информацией с взаимодействующими системами.

Роторы электродвигателя и насоса соединяются рессорой. Статор с трехфазной обмоткой запрессован в корпус из алюминиевого сплава. Корпус выполнен с каналами, по которым циркулирует охлаждающее топливо. На переднем подшипниковом щите находится площадка с четырьмя резьбовыми шпильками для установки на ЭД топливного насоса и отверстие под переходную втулку для подачи в ЭД охлаждающего топлива. Топливо под давлением поступает внутрь корпуса ЭД, что значительно

снижает тепловые нагрузки на внутренних элементах конструкции ЭД и габариты наружной поверхности корпуса ЭП. Для подсоединения силового и информационного жгутов на корпусе блока управления установлены соединители.

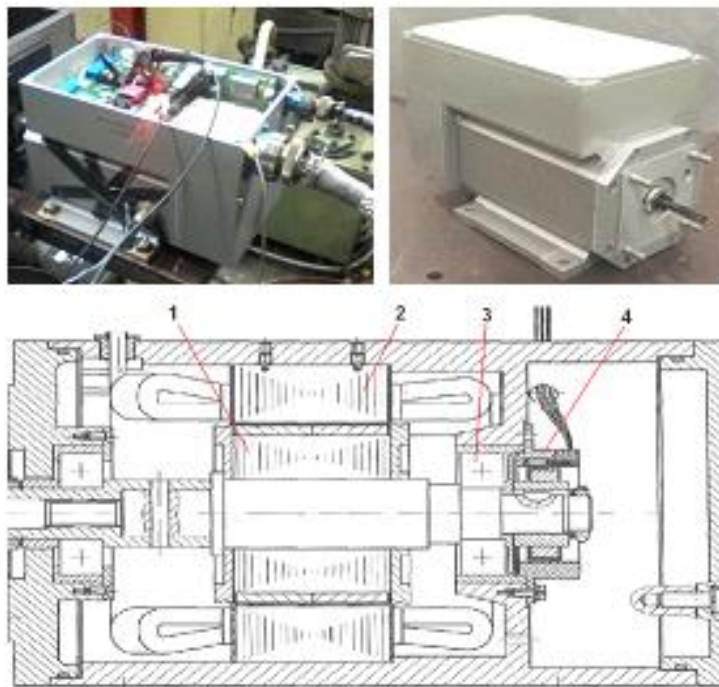


Рис.5. Внешний вид и разрез электропривода ЭП-25

1 - ротор с постоянными магнитами, 2 - статор с силовыми обмотками,
3 – подшипник, 4 – блок ДПР

Ротор ЭД представляет собой сборную магнитную систему. Элементы магнитной системы ротора для обеспечения механической прочности устанавливаются на клею и защищаются бандажом из высокопрочного материала. Топливо, проходя через зазор между статором и ротором, охлаждает бандаж и магниты. Лобовые части обмотки статора находятся в топливе и отдают ему тепло. Части обмотки, находящиеся в пазах статора, охлаждаются за счет теплоотдачи от железа статора к охлаждающей жидкости, протекающей через отверстия между корпусом и пакетом статора.

Наиболее теплонагруженным элементом блока управления является силовой модуль. Он устанавливается внутри коробки выводов на корпусе ЭД, который охлаждается принудительным конвективным способом путём прокачки топлива от насоса через специальные каналы в корпусе ЭД.

Корпус насоса соединяется с электродвигателем фланцем с центрирующим буртом, соединение с ротором ЭД — шлицевой приводной рессорой.

Основные характеристики ЭП-25 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики электропривода ЭП-25

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания инвертора, В	270
Кратность изменения ω	1: 20
Коэффициент перегрузки по току	5,2
Время работы в режиме перегрузки, мин	3...5
Статическая точность поддержания ω , %	± 0.2
Заброс (провал) ω в переходном процессе, %	≤ 2
Время изменения ω от min до max, с	≤ 0.5
Время изменения ω от max до min, с	≤ 0.5
Масса ЭД (взвешенная), кг	10,35
Габарит ЭД, В×Н×L, мм	131×131×210
Радиальный зазор ротором и статором	0.5 мм
Ток холостого хода, А	2
Частота вращения холс. хода, с-1 (об/мин)	233,3 (14000)
Максимальные значения параметров	
Полезная мощность (P ₂), Вт	23630
Момент (M), Н·м (кгс·м)	18 (1,83)
Частота вращения (n), с-1 (об/мин)	208,9 (12536)
Потребляемый ток (I), А	145
Потребляемая мощность (P ₁), Вт	26672

Расчет двигателя произведен с учетом падения напряжения в управляющем преобразователе. Электрическая и магнитная цепи двигателя (рабочая обмотка, геометрические размеры постоянных магнитов, сердечников статора и ротора, радиального зазора) рассчитаны для обеспечения характеристик при минимальном напряжении сети.

Электродвигатель начинает работать с нулевой частоты вращения. Поскольку активные сопротивления статорных обмоток очень малы и составляют $\approx 10^{-3}$ Ом, то подключение к источнику постоянного напряжения возможно только на время пока

ток не превысит максимально-допустимые значения. После этого ток должен быть ограничен.

Смазка подшипников осуществляется жидким топливом, что повышает их надёжность и КПД, снижает вероятность перегрева. Перемещение ротора в осевом направлении ограничено люфтом шарикоподшипника, осевая нагрузка от качающего узла через приводную рессору на ротор электродвигателя отсутствует.

Широкий диапазон изменения частоты вращения потребовал применения датчика положения ротора на элементах Холла в виде отдельного элемента конструкции ЭД, что привело к увеличению массы ЭП на 3% в основном за счет увеличения корпуса электродвигателя.

Требование к времени изменения частоты вращения не более 0,5 с:

— на увеличение привело к увеличению массы ЭП на ~5% за счет выбора силового модуля БУК на повышенное значение потребляемого тока, что повлекло за собой увеличение габаритов БУК;

— на снижение: к увеличению массы ЭП на ~6% за счет необходимости включения в состав БУК балластных (тормозных) резисторов и конденсатора увеличенной емкости для сброса энергии торможения ЭД, что также повлекло за собой увеличение габаритов БУК.

Использование 5-ти кратной перегрузочной способности ЭП позволило снизить массу электродвигателя с 21 до 10,35 кг (2.1 раза). Снижению массы блока управления способствовала его интеграция с корпусом ЭД и охлаждение топливом силового модуля блока управления.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электропривод, выполненный на основе многофазного вентильного электродвигателя с высокоэнергетическими постоянными магнитами и микропроцессорной системой управления, является наиболее перспективным для вращения насосов систем топливопитания ГТД.

Использование прокачиваемого насосом топлива для охлаждения теплонапряжённых узлов ЭП (силовых обмоток статора и инвертора) позволило обеспечить работу ЭП в режиме перегрузки по току - 5.2 крат и уменьшить массу электродвигателя в 2.1 раза.

Применённые для электропривода мощностью 25 кВт аппаратные и конструктивные решения позволяют разработать электроприводные насосы для систем топливопитания ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таммскиви И.В. Системы запуска авиационных двигателей. СГАУ, Самара, 2002.
2. Аринушкин Л.С. и др. Авиационные центробежные насосные агрегаты. Машиностроение, 1967.
3. Ю.С. Белкин, А.И. Гулиенко, С.К. Пигальский и др. Электрическая система управления ТРДД с управляемым электроприводом топливного насоса. Сб. ст.: Всесоюзная научно-практическая конференция «Проблемы энергетики транспорта». Москва, 1988. Труды №1272, ЦИАМ, 1990, с. 163-169.
4. О.С. Гуревич, Ю.С. Белкин, А.И. Гулиенко. Особенности построения системы топливопитания ГТД с электроприводными насосами // Конверсия в машиностроении, № 4-5, 2005, с.70-74.
5. Концепция СНТК им. Н.Д.Кузнецова для ГТД ЛА с полным электрическим управлением. АКО «Передовые технологии» № 1, 2006 г.
6. Е.В.Павлюк, В.А.Матусевич, Ю.И.Кравченко и др. Электроприводные насосы-дозаторы топлива разработки ГП «ХАКБ». Сборник тезисов НТК по двигателестроению НТКД-2012. Москва, 18...19 апреля 2012, с.229-230.
7. Gurevich O., Gulienko A., Schurovskiy U. Demonstration Systems of the «Electric» Gas Turbine Engine // 29th Congress ICAS, St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014, p.6.
8. С.Н.Вишневский, Е.В.Волокитина, А.И.Власов, О.С. Гуревич, А.И.Гулиенко. Особенности проектирования электропривода топливного насоса для минимизации его массы. Сб. тезисов Всероссийской НТК «Авиадвигатели XXI века». Москва, ЦИАМ, 24–27 ноября 2015, с. 840-842.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Аннотация: В данной статье исследуется возможность совместимости бортового компьютера (одноплатного компьютера) с полетным контроллером для движения по наземной поверхности. На этой основе была создана мобильная платформа, которая представлена в данной статье. Использование данной конфигурации для перемещения платформы как автономно, так и с помощью пульта управления. Особое внимание уделяется роли системы технического зрения в обеспечении навигации. Результаты работы подчеркивают новаторство и использование функционала модели для создания эффективных систем автономной наземной навигации, в том числе по координатам. Мобильная платформа может применяться для перевозки грузов на складских помещениях, для работы в экстремальных ситуациях, мониторинга окружающей среды или для образовательных целей.

Ключевые слова: мобильная платформа, компьютерное зрение, роботы-погрузчики, тележки, полетный контроллер.

I. ВВЕДЕНИЕ

Мобильные платформы играют важную роль современной технологической прогресса, преобразая способы, которые происходят во всем мире. Эти устройства и системы дают возможность достичь автономности управления. Мобильные платформы облегчают работу промышленности, логистику и многие другие области, предлагая эффективные и инновационные решения для задач перемещения и автономного функционирования.

Автоматизированные логистические системы классифицируются на два главных вида — автоматические транспортировщики *AGV* и автономные мобильные роботы *AMR*. Эти устройства позволяют производить перемещение груза на автоматизированном уровне без непосредственного участия оператора. [1]

Основные задачи таких устройств:

- Создание линий, заменяющих конвейерные системы;
- Перемещение деталей и готовых изделий со склада и на склад;
- Удаление отходов из рабочих зон;

- Доставка инструмента и расходных материалов на рабочие места;
- Внутрискладские перемещения и другие аналогичные задачи.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. *Обзор автономных роботизированных устройств*

На сегодняшний день рынок наполнен всевозможными автономными роботизированными устройствами, которые предлагают разнообразные решения для оптимизации рабочих процессов в различных отраслях. Автоматизация складских операций, где роботы-магазинщики выполняют перемещение грузов и оптимизацию складских процессов, снижая трудозатраты и ускоряя выполнение задач, является одним из востребованных направлений их использования.

Существуют некоторые ограничения и недостатки. Например, категории роботов, такие как транспортные тележки, вилочные погрузчики и автоматические буксировщики, ограничены в своей функциональности, что часто ведет к необходимости использования нескольких типов устройств для различных задач. Вследствие этого возникает избыточность оборудования и усложняет интеграцию в существующие складские системы. [2]

Важным недостатком также является потребность в улучшении алгоритмов маршрутизации и навигации данных устройств. Частой проблемой, с которой сталкиваются автономные роботы – оптимизация маршрутов, особенно в условиях динамичной и сложной среды складских помещений. Такая работа приводит к неэффективности использования мобильных платформ и появлению временных задержек. [3]

Согласно статистике, внедрение робототехники в складскую логистику приводит к увеличению эффективности рабочих процессов. Ожидаемое увеличение эффективности составляет в среднем 33%, а также улучшение использования пространства на 40%.

Проведя анализ на мобильные роботизированные платформы, выявлены следующие недостатки таких текущих разработок, влияющих на их функциональность и эффективность:

- Ограниченная скорость (скорость передвижения техники составляет в среднем 1,2 м/с, что может быть медленным для некоторых операций, особенно в больших производственных объектах или складах);

— Высокая стоимость (это может быть препятствием для малых и средних предприятий и организаций, которым может быть сложно оправдать инвестиции в такое оборудование);

— Ограниченная гибкость (некоторые модели роботов могут иметь ограниченные возможности в изменении своей конфигурации, что может быть проблематично для выполнения сложных или нестандартных задач);

— Ограниченная навигация (некоторые модели роботов могут иметь ограниченные возможности навигации и ориентирования в окружающем пространстве, это может создать проблемы при работе в сложных и сильно изменяющихся средах).

В. Решение задачи оптимизации мобильной платформы

В Уфимском университете науки и технологий, в Передовой инженерной школе «Моторы будущего» была разработана мобильная платформа, представленная на рисунке 1, была создана с целью устранения недостатков, выявленных у конкурентов. В первую очередь, акцентировали внимание на снижении затрат, и для этого была разработана новая конструкция, использующая доступные и эффективные комплектующие. Корпус платформы изготовлен на 3D принтере, что позволило минимизировать себестоимость и в настоящее время она не превышает 30 тыс. рублей. В сравнении с продукцией других производителей, которые предлагают роботов по цене в среднем 30 тыс. долларов, новая разработка оказывается значительно более доступной.

Также была рассмотрена и реализована возможность адаптации габаритов платформы в зависимости от потребностей заказчика. Однако для этого требуется установка более мощного электродвигателя для перевозки тяжелых грузов.

Применение полетного контроллера и его датчиков для навигации в окружающей среде является одним из новаторских решений в этом проекте. Платформа способна ориентироваться в окружающей среде, запоминать начальную точку движения и следовать заранее заданному маршруту благодаря использования встроенных гироскопа, барометра, акселерометра и магнитометра. Платформа имеет функцию автоматического возвращения на начальную точку движения в случае потери связи с пультом управления.

Мобильная платформа обладает гибкостью и вариативностью управления. Она может управляться как автономно (с оператором), с помощью программного

обеспечения, так и с помощью пульта управления (с пилотом). В сложных или непредвиденных ситуациях возможно подруливать через радиоприемник пульта управления. Подруливание позволяет исправлять малые ошибки в позиционировании или траектории движения, чтобы достичь более точных и плавных результатов, в том числе перемещаться в узких коридорах, проходах или дверных проемах. Подход к управлению дает возможность настроить энергопотребление платформы в зависимости от условий работы. В случае большого разряда аккумулятора и для более экономного режима возможно переключение на управление с помощью пульта, обеспечивающее дополнительное время продолжительности движения.

При необходимости мобильная платформа может быть доработана для увеличения скорости за счёт улучшения приводов.

Применение таких платформ благодаря своим особенностям, может быть, не только для логистических задач, но и в экстремальных условиях. С учетом низкой стоимости, её использование в критических ситуациях не приведет к серьезным финансовым потерям. В экологических катастрофах, платформа может выполнять мониторинг по заданным координатам и возвращаться для дополнительного анализа. Кроме того, такие роботизированные устройства могут использоваться в образовательных целях для изучения технического программирования и компьютерного зрения студентами.



Рис. 1. Макетный образец мобильной платформы

С. Описание разработки мобильной платформы

Принцип работы мобильной платформы выглядит следующим образом:

- Энергопитание и преобразование напряжения:

Моторы колес подключены к регуляторам оборотов. Вся система получает питание от аккумулятора, однако его выходное напряжение составляет 7,6 В, поэтому требуется использовать преобразователь напряжения для снижения до 5 В, необходимого для работы радиоприемника. [4]

- Управление и передача команд:

Сигналы управления передаются через радиоприемник, который получает 5 В после преобразования напряжения. Эти команды поступают на полетный контроллер, который управляет движением мобильной платформы на наземной поверхности.

- Навигация и обработка данных:

После получения команд от полетного контроллера, управляющие сигналы направляются на моторы для движения платформы.

Кроме того, эти сигналы поступают на бортовой компьютер, который использует алгоритмы компьютерного зрения для анализа окружающей обстановки с помощью камеры. Бортовой компьютер обрабатывает изображения и вычисляет координаты траектории передвижения, что позволяет мобильной платформе работать автономно.

- Координация и функциональность:

После получения входящих сигналов от радиоприемника, полетный контроллер отправляет команды на движение мобильной платформы.

Бортовой компьютер анализирует данные от полетного контроллера и изображений с камеры, обеспечивая оптимальное движение мобильной платформы в соответствии с определенной траекторией.

В качестве полетного контроллера используется Pixhawk, в качестве микрокомпьютера используется Raspberry Pi 4 Model B, к нему подключена CSI камера для навигации и управления мобильной платформой.

Управление движениями платформы выполняется через Pixhawk с использованием программного обеспечения Mission Planner. Радиоприемник, подключенный к полетному контроллеру через TBS Nano RX и управляемый через пульт управления TBS Tango II, передает сигналы на движение.

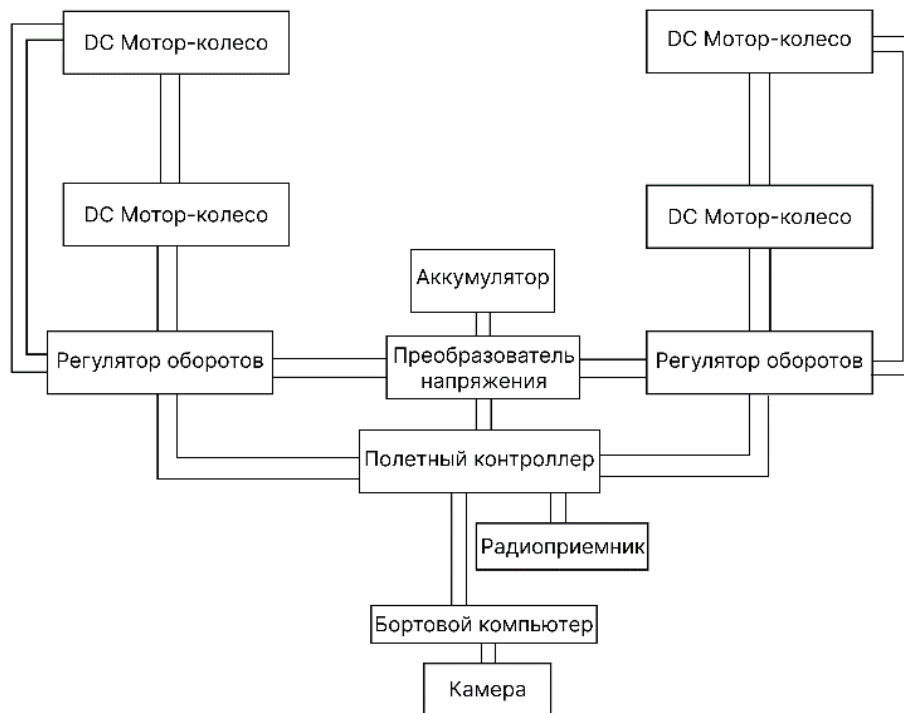


Рис. 2. Структурная блок-схема принципа работы мобильной платформы

Для обмена данными между платформой и наземной станцией используется протокол MAVLink, предназначенный для передачи команд управления, информации о состоянии, данных GPS, телеметрии и другой информации.

D. Тестирование мобильной платформы

Программирование беспилотного аппарата происходит на языке Python для этого используются библиотеки rpyavlink и DroneKit.

На сегодняшний день мобильная платформа движется на программном уровне по заранее заданной траектории. Это может быть линия. Для этой реализации было решено полетный контроллер подключать к микрокомпьютеру через USB кабель, т.к. UART соединение оказалось ненадежным. С помощью командной строки в Raspbian было выяснено, что чтобы установить соединение с полетным контроллером, подключение будет к порту `"/dev/ttyACM0"`. С помощью пульта управления и Mission Planner были определены номера RC каналов и их значения, на которых мобильная платформа начинает свой поворот или движение.

Для обеспечения правильного движения были определены функции перемещения в различных направлениях, включая вперед, вправо, влево и по кругу. Чтобы избежать ошибок, связанных с воздействием колес мобильной платформы на камеру, была ограничена область видимости камеры при использовании этих функций.

Для анализа изображений, полученных с камеры, они фильтруются и преобразуются с помощью функций библиотеки OpenCV, таких как оттенки серого, размытие и эрозия изображений. Затем, на видеопотоке ищутся контуры. [5]

Для определения направления траектории существует два подхода. Первый из них - движение по секторам. В этом случае, если программа обнаруживает контур с максимальной площадью, она находит центральную координату X этого контура. Затем робот определяет положение линии и в какую сторону ехать.

Второй метод заключается в движении по углу траектории. На контурах изображения распознаются линии, после чего вычисляется угол между центром и наибольшей линией. Если отклонение составляет до 10 градусов, то робот движется прямо, в противном случае происходит поворот влево или вправо в зависимости от угла наклона. Также устанавливается значение RC канала в соответствии с углом поворота: при небольшом угле платформа поворачивает медленнее, а при большом значении отклонения - быстрее.

В тестовом режиме управление мобильной платформой осуществляется удаленно с ноутбука при помощи SSH протокола. Для этого Raspberry Pi и ноутбук подключаются к одной сети Wi-Fi, после чего устанавливается соединение с помощью программы putty, а затем в консоли прописываются команды для запуска программы.



Рис. 3. Вид со стороны мобильной платформы

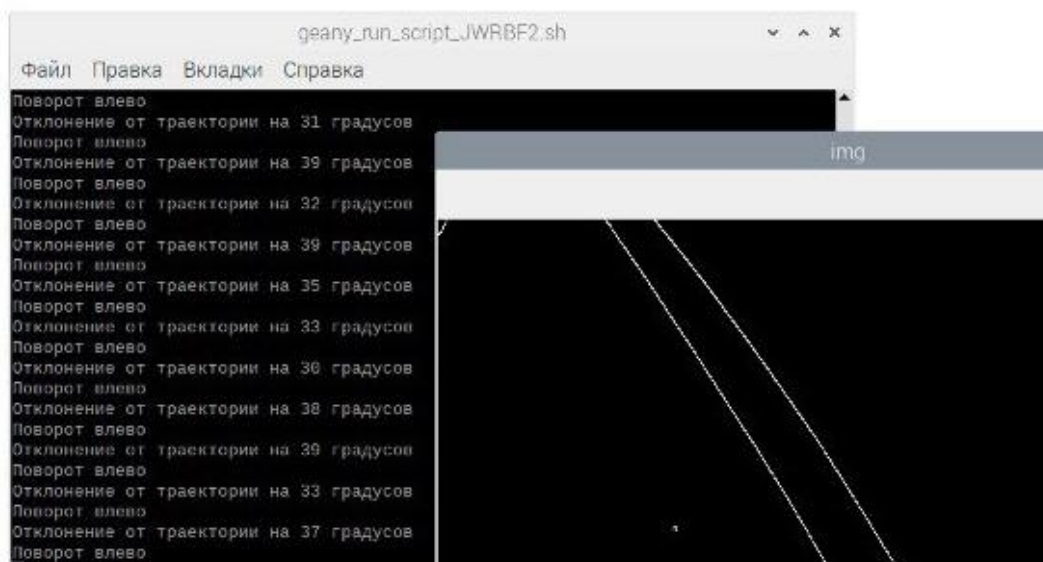


Рис. 4. Результат работы программы в консоли

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автономные мобильные платформы способны работать без перерывов и могут выполнять задачи в опасных условиях, что позволяет снизить затраты на персонал и уменьшить риск для здоровья или жизни человека. Такие разработки находят применение в различных областях, включая промышленность, сельское хозяйство, логистику, медицину и другие. Например, робот-погрузчик может автоматизировать складские операции, освобождая людей для выполнения более важных задач. Кроме того, автономные мобильные платформы могут использоваться для научных исследований, обеспечения безопасности в различных пространствах, а также в сельском хозяйстве для сбора урожая, полива растений и обработки почвы, что способствует увеличению производительности и эффективности.

Дальнейшие планы по разработке программного обеспечения включают адаптацию программ для перехода от мобильной платформы на квадрокоптер. Это предполагает учет необходимости поддержания высоты квадрокоптером. В зависимости от заказчика будет предложена система обнаружения и объезда препятствий. В качестве реализации этой системы будут предложены несколько путей решения: при помощи ультразвукового датчика; камеры (техническое зрение); LiDAR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепанов П.Ю., Романов П.А. Основные направления развития робототехники // Современные инновации. 2017. №1. С. 29 - 38.

2. Мобильная роботизированная платформа (с рукой-манипулятором). [Online]. Available: <https://zarnitza.ru/catalog/mekhatronika-i-robototekhnika/robototekhnika/sredne-spetsialnye-uchebnye-zavedeniya/mobilnaya-robotizirovannaya-platforma-s-rukoy-manipulyatorom/> (дата обращения 01.11.2023).
3. Евдокимова Т.С., Синодкин А.А., Федосова Л.О., Тюриков М.И. Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2018. №2. С. 16 – 25.
4. Пелагей С.К., Толстель О.В., Михеенко Д.В. Использование информационных технологий для управления движением автоматического движущегося средства на базе тележки AGV // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2021. №4. С. 14 – 22.
5. Осваиваем техническое зрение на примере Bioloid STEM и HaViMo2.0. [Online]. Available: <https://habr.com/ru/companies/robotgeeks/articles/251781/> (дата обращения 01.11.2023).

Казаков Ю.Б.¹, Кисилев М.А.¹, Шумилов Е.А.²

¹ ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

² ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ МАГНИТОВ ИНДУКТОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ПОЛЕВЫХ МОДЕЛЯХ

Аннотация: В данной статье исследуется возможность совместимости бортового компьютера (одноплатного компьютера) с полетным контроллером для движения по наземной поверхности. На этой основе была создана мобильная платформа, которая представлена в данной статье. Использование данной конфигурации для перемещения платформы как автономно, так и с помощью пульта управления. Особое внимание уделяется роли системы технического зрения в обеспечении навигации. Результаты работы подчеркивают новаторство и использование функционала модели для создания эффективных систем автономной наземной навигации, в том числе по координатам. Мобильная платформа может применяться для перевозки грузов на складских помещениях, для работы в экстремальных ситуациях, мониторинга окружающей среды или для образовательных целей.

Ключевые слова: мобильная платформа, компьютерное зрение, роботы-погрузчики, тележки, полетный контроллер.

I. ВВЕДЕНИЕ

При конструировании электрических машин осуществляется выбор формы и расположения магнитных, проводящих и изолирующих тел, распределение токов в объеме машины. Поиск рационального варианта конструкции сводится к задаче нахождения конфигурации элементов, обеспечивающих наилучшее распределение физических полей. Наиболее корректно такая задача решается с использованием полевых моделей. Тенденция совершенствования электрических машин – разработка конструкции с максимальным электромагнитным моментом в заданных габаритах, повышенным использованием объема по вращающему моменту. Это обеспечивается конструкцией машины с максимальным сцепленным с якорем магнитным потоком индуктора при заданных токах якоря и наружном диаметре корпуса.

Высокая стоимость магнитов требует применения в магнитоэлектрических машинах рациональной формы и размеров магнитов индуктора с рабочей точкой

магнита в максимуме магнитной энергии. Целесообразно определение рациональной формы магнитов индуктора машины на перестраиваемой полевой модели [1-6].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ МАГНИТА ИНДУКТОРА ИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ МИНИМИЗАЦИИ НА ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ

Задача определения рациональной формы магнита индуктора машины с максимальным моментом в заданных габаритах может формулироваться как задача поиска экстремума целевой функции, определяемой магнитным потоком индуктора, сцепленным с якорем. Магнитный поток индуктора находится на основе результатов численного расчета магнитного поля как

$$\Phi_0 = L(A_{k1} - A_{k2}),$$

где L – длина якоря; A_{k1} , A_{k2} - векторные магнитные потенциалы в узлах, лежащих на поверхности якоря на краях полюсного деления.

Если узлы лежат на границе периодичности, равны по модулю, но противоположны по знаку, то необходим поиск максимального по модулю значения функции для $k1$ узла расчетной сетки.

Особенностью задач выбора конструкции по результатам расчета поля является большое число возможных варьируемых независимых переменных (параметров) – положений $N2$ узлов сетки. Предельное количество параметров определяется числом всех узлов сетки (по две координаты на узел для 2d модели). Конечно-элементные модели при этом перестраиваются для каждого нового заданного сочетания параметров (положений $N2$ узлов), с новыми размерами элементов сетки. Варьирование свойств сред и возбуждающих факторов элементов сетки увеличивает количество параметров. При варьируемых координатах всех узлов сетки происходит стирание между структурным и параметрическим синтезом конструкции, т.к. в процессе поиска возможно изменение конфигурации подобластей вплоть до их полного исчезновения или появления новых элементов. Управление перемещением $N2$ узлами границ подобластей, по определенным в процессе поиска направлениям R_j ($j=1, \dots, N2$) алгоритмам, позволяющим гибко деформировать расчетную сетку, позволяет рассматривать такой подход как структурно - параметрический синтез конструкции (рис. 1).

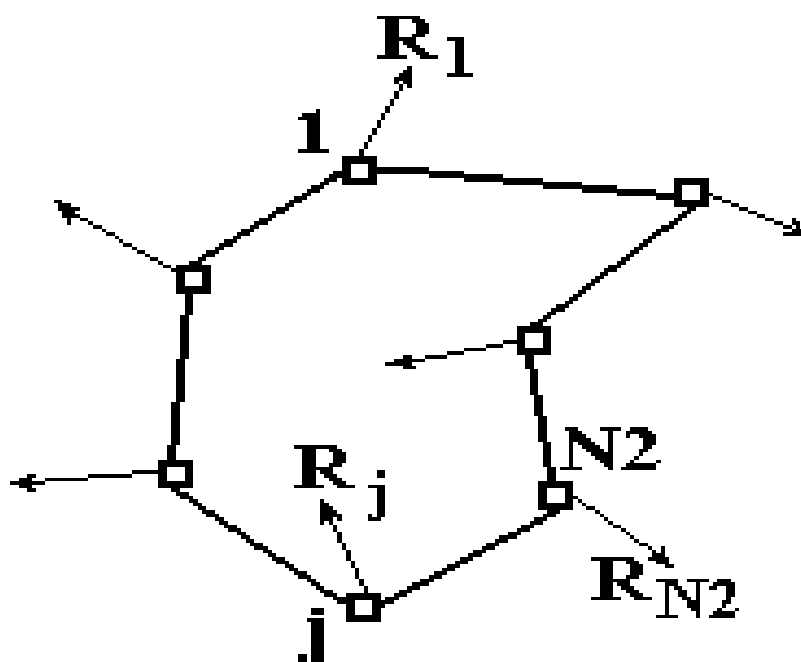


Рис. 1. Деформация области изменением положения узлов

Расчет физического поля требует значительных временных затрат, поэтому для описания конструкции могут использоваться укрупненные параметры конфигурации, например, более привычные величины: ширина полюса, диаметр якоря и т.д., что сокращает общее число параметров, но ограничивает возможности деформации модели. По их значениям рассчитываются координаты узлов сетки.

Варьирование обобщенных параметров модели $r_j (j=1, \dots, N2)$ осуществляется в пределах $r_{j\min} \leq r_j \leq r_{j\max}$, которые определяются целесообразностью деформаций конструкции, технологией изготовления, режимами эксплуатации, например, узлы поверхности ротора должны находиться на одном диаметре, ширина зубца не должна быть меньше допустимой и т.п.

Желательно выполнять предварительный анализ топологии целевой функции с целью выявления локальных и глобального экстремумов. В качестве стартовой точки можно выбирать базовую конструкцию электрической машины и уточнять ее методами параметрической деформации на полевой модели.

Для ускорения получения решения критерии окончания конечно-элементного анализа магнитных систем в процессе поиска можно регулировать. На первых итерациях поиска, при удаленном положении от экстремума, использовать более "грубую", но более "быструю" конечно-элементную модель (более крупная сетка, заглубленные критерии окончания поиска). По мере приближения к экстремуму

применять более "точную", но и более "медленную" модель, поле на измененной сетке рассчитывать, используя потенциалы узлов, полученные на предыдущей сетке.

Для поиска наилучшей конструкции индуктора электрической машины возможно использовать методы последовательной локальной минимизации функции нескольких переменных, как например в [1]. Тогда задача нахождения минимума целевой функции сводится к решению систем нелинейных уравнений порядка N^2 . В этом случае полевая конечно-элементная модель является вложенной в процедуру оптимизационного поиска и для одной попытки синтеза конструкции необходимо решить систему нелинейных уравнений нелинейного магнитного поля, сделать 6-12 итераций анализа линейного поля. Таким образом, чтобы подойти к решению одной системы нелинейных уравнений при синтезе необходимо многократно решать системы нелинейных уравнений при анализе поля.

III. РАЦИОНАЛЬНАЯ ФОРМА ИНДУКТОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

A. Рациональная форма индуктора магнитоэлектрического двигателя H100-25

Для магнитоэлектрического двигателя H100-25 с радиусом якоря 78.5 мм, наружном радиусе индуктора 98 мм, с сегментными постоянными магнитами NdFeB толщиной 5.7 мм с коэффициентом полюсного перекрытия 0.678 на модели из 434 конечных элементов в качестве изменяемых параметров были выбраны координаты 9 узлов, определяющих конфигурацию формы магнита, и радиус якоря, итого 10 независимых параметров. Изменение параметров приводило к новым значениям координат 110 узлов конечно-элементной сетки и ее перестроению. Сохранялся неизменным коэффициент полюсного перекрытия, плотность тока в обмотке якоря, внешний радиус индуктора, не допускались варианты с уменьшением толщины индуктора менее 1 мм.

Неоднократные процедуры поиска рациональной конструкции индуктора методом переменной метрики на деформируемой конечно-элементной модели из разных стартовых точек требовали значительных вычислительных затрат, но приводили к близким результатам (табл. 1). Например, одна из процедур сошлась за 23 итерации поиска при 19 операциях определения градиента и потребовала 630 перестроений сетки и соответствующих расчетов нелинейного магнитного поля.

Изменение формы магнита индуктора

Положение узла	$\Gamma_{\text{макс}}$	$\Gamma_{\text{мин}}$	Стартовая точка	Найденная точка
Γ_1 , мм	97,5	85,1	85,5	86,988
Γ_2 , мм	97,5	85,1	85,5	89,674
Γ_3 , мм	97,5	85,1	85,5	92,054
Γ_4 , мм	97,5	85,1	85,5	95,228
Γ_5 , мм	97,5	85,1	85,5	97,06
Γ_6 , мм	97,5	85,1	85,5	93,988
Γ_7 , мм	97,5	85,1	85,5	91,002
Γ_8 , мм	97,5	85,1	85,5	88,801
Γ_9 , мм	97,5	85,1	85,5	87,168
Γ_{10} , мм	82,8	69,0	78,5	80,674

На рисунке 2 приведены стартовая и рациональная формы магнита индуктора и якоря двигателя.

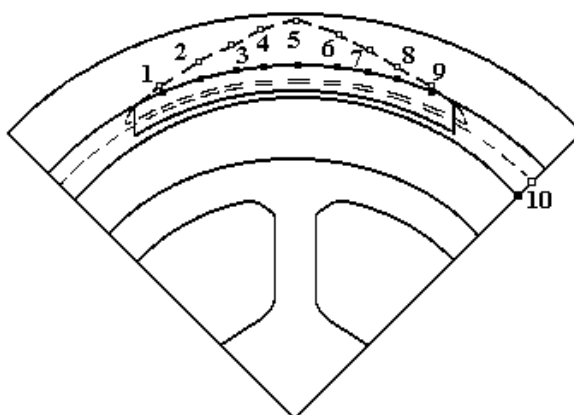


Рис. 2. Стартовая (—) и найденная (- -) формы магнитной системы: 1 - 9 – узлы поверхности магнита, 10 – узел поверхности якоря

В новой конструкции сегментная форма магнита изменена существенно - толщина магнита от края полюса к его центру увеличивается от 5.7 мм до 17.2 мм, радиус якоря несколько увеличен. За счет улучшения использования внутреннего объема машины повышен на 60 % объем магнита и на 7.86 % полезный магнитный поток, поток рассеяния снижен на 32 %, электромагнитный момент увеличен на 13.9 %. Найденная конструкция машины легла в основу патентозащищенного изобретения РФ [7].

В магнитоэлектрических машинах с радиально намагниченными магнитами в

форме сегментов кольца, расположенных на внутренней цилиндрической поверхности индуктора, элементы сердечника индуктора по оси главного полюса (продольной оси d) насыщены магнитным потоком постоянного магнита незначительно, а по поперечной оси (поперечной оси q) – предельно. Форма поля в зазоре на полюсном делении близка к трапецеидальной. Применение магнитов с высокими магнитными свойствами, например NdFeB, приводит к снижению размеров и меньшей поверхности крепления магнита. При наличии усилий тангенциального смещения это вызывает необходимость повышения надежности крепления магнита. В конструкции нет элементов, препятствующих тангенциальному сдвигу магнита под действием электромагнитного момента. Для меньшего по размерам магнита требуется повышенная точность его позиционирования на внутренней поверхности индуктора.

В найденной конструкции на внутренней цилиндрической поверхности сердечника индуктора формируются выемки, в которых размещается магнит. В режиме холостого хода форма выемки рациональной конструкции близка к синусоидальной. В режиме нагрузки рациональная форма магнита более сложная и не симметричная относительно оси полюса. Это объясняется влиянием реакции якоря. Такая конструкция возможна в нереверсивных двигателях. Радиально намагниченные магниты принимают форму в соответствии с формой выемки и фиксируются в них.

Для практической применимости на внутренней поверхности сердечника статора можно выполнять не синусоидальные, а треугольные выемки, по числу полюсов машины. Постоянные магниты примут форму криволинейных пятиугольников, причем через вершины выемок будут проходить оси главных полюсов (оси d). Толщина сердечника по осям полюсов определяется механической прочностью индуктора и требуемым магнитным сопротивлением потокам реакции якоря. Технологически треугольные выемки могут формироваться фрезерованием на внутренней поверхности индуктора или штамповкой листов прессами соответствующей формы для шихтованных сердечников. Применение магнитов пятиугольной формы и фиксация их в треугольных выемках на внутренней поверхности сердечника статора обеспечивает повышенную точность позиционирования магнитов, конструктивное препятствование тангенциальному сдвигу и увеличенную площадь крепления. Пятиугольный вид магнитов может быть получен при спекании магнитной смеси в требуемых формах или путем механической обработки.

Распределенный поток постоянного магнита создает в спинке статора переменного сечения более равномерное насыщение, что приводит к повышению использования конструкции индуктора (рис. 3).

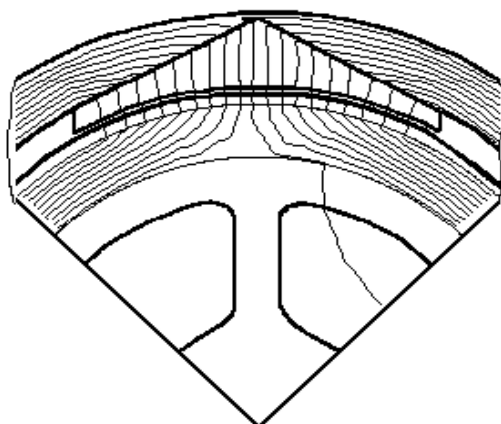


Рис. 3. Распределение линий магнитного потока в двигателе Н100-25 с пятиугольными магнитами NdFeB

Встраивание в индуктор магнитов в форме пятиугольника приводит к косому стыку границ магнита и сердечника индуктора, некоторому смещению векторов намагниченности частей магнита, что в определенной мере образует подобие сборки магнитной схемы Хальбаха.

Магниты радиальной намагниченности в форме криволинейных пятиугольников позволяют приблизить форму поля в зазоре к синусоидальной, по сравнению с трапецидальной формой для магнитов в виде сегментов кольца (рис. 4). Так как толщина магнита в конструкции возрастает, при перемещении от краев магнита к его середине (оси главного полюса), то возрастает и намагничивающая сила магнита. Средняя индукция в элементах магнита составляет 0.589 Тл, что близко к оптимальному для магнитов на основе NdFeB. Изменяя размеры сегментной части магнита и треугольного выступа можно добиваться нужной формы поля.

Синусоидальная форма индукции в зазоре машины позволяет снизить дополнительные потери, для машин постоянного тока обеспечивает более благоприятное распределение потенциалов напряжения по коллекторным ламелям, по сравнению с трапецидальной формой поля, так как создает меньший максимальный скачок в значениях индукции. Вероятность потенциального искрения снижается.

Поток поперечной реакции якоря проходит через тонкую ферромагнитную перемычку по оси главного полюса и насыщает ее. Для магнитных потоков по

продольной и поперечной осям возникают разные магнитные сопротивления. Создается большое магнитное сопротивление потоку поперечной реакции якоря, он ослабляется. Для машин постоянного тока это приводит к улучшению коммутации.

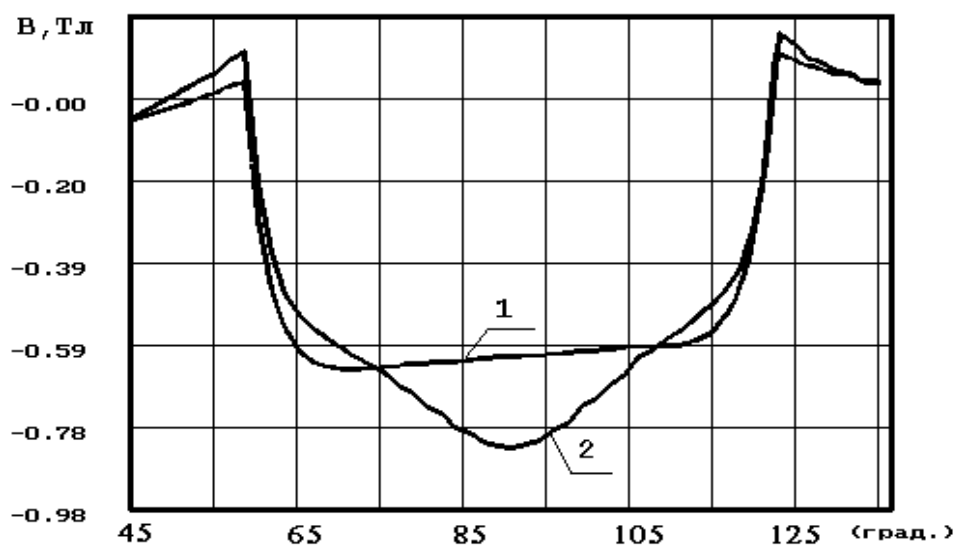


Рис. 4. Распределение индукции в зазоре двигателя Н100-25 при нагрузке с магнитами в форме: 1 - сегмента, 2 - пятиугольника

А. Рациональная форма магнита индуктора машины на базе неявнополюсного двигателя постоянного тока

Для магнитоэлектрической машины, разработанной на базе неявнополюсного двигателя постоянного тока 4П80, якорь не изменялся. На статоре в зубцово-пазовом слое вместо обмотки возбуждения размещен постоянный магнит радиальной намагниченности. Спинка статора по оси дополнительного полюса оставлена прежней - 7.3 мм. Конечно-элементная сетка модели содержала 507 узлов и 899 элементов. В результате ряда оптимизационных расчетов магнитного поля модели с перестраиваемыми элементами определено, что рациональная форма магнита индуктора может быть представлена в виде криволинейного пятиугольника. Перемычка над магнитом по оси главного полюса составляет 1.2 мм. Толщина магнита возрастает от 16.2 мм на краю полюса (высота паза статора) до 22 мм по оси главного полюса. Применение магнитов КС37А в форме криволинейных пятиугольников, по сравнению с сегментной формой магнитов толщиной 16.2 мм, приводит к увеличению объема магнита на 15.7 %, основного потока до 2.8 %, уменьшению потока реакции якоря до 6 % и снижению индукции в зоне коммутации до 6 % (рис. 5).

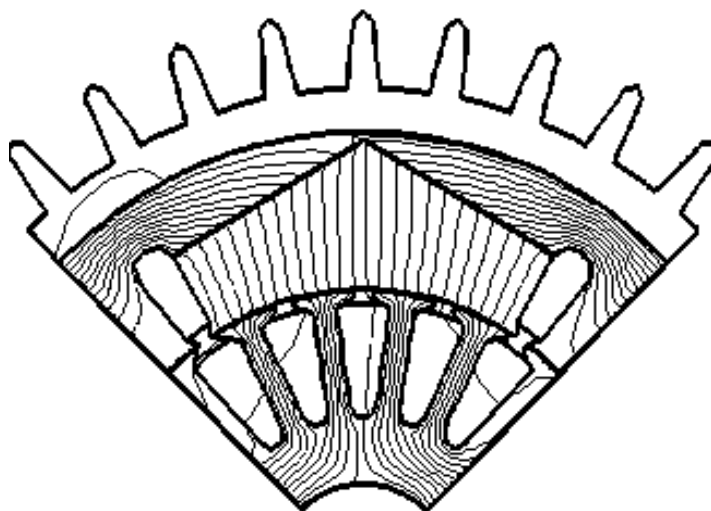


Рис. 5. Распределение линий магнитного потока в магнитоэлектрической машине 4П80

Площадь крепления пятиугольного магнита по сравнению с магнитом в виде сегмента кольца возрастает на 4.7 %, напряжение тангенциального сдвига, из-за упора в угол сердечника, снижается на 15 %.

С. Совершенствование индуктора торцевого магнитоэлектрического генератора

Тихоходные торцевые генераторы с постоянными высококоэрцитивными магнитами с числом пар полюсов $p > 6$ характеризуются двойным дисковым ротором/индуктором и статором с кольцевой обмоткой якоря. Для повышения удельных показателей и эффективности работы торцевых магнитоэлектрических генераторов определена рациональная форма постоянного магнита индуктора. Совершенствование конструкции выполнено методами параметрической оптимизации с перестраиваемыми конечно-элементными 2d моделями в плоскопараллельной постановке в сечении, проходящем по среднему диаметру генератора. В ходе поиска варьировалась ширина и высота магнита при неизменных его объеме, рабочем зазоре и зазоре между магнитами. Найденная рациональная форма магнита в виде пятиугольника в поперечном тангенциальном сечении магнита и размещенных в треугольных радиальных выемках сердечника индуктора представлена на рисунке 6.

Анализ распределения магнитного поля (рис. 7) при разных формах поперечного сечения магнитов выявил насыщенные участки магнитопровода ротора в сечении индуктора между магнитами, где замыкаются рабочий поток и потоки рассеяния ротора.

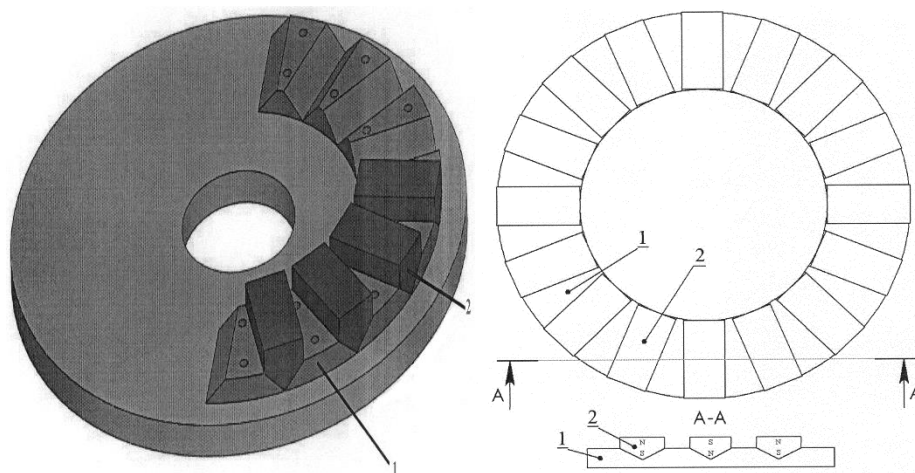


Рис. 6. Рациональная форма магнита в торцевом магнитоэлектрическом генераторе:
 1 – сердечник индуктора с треугольными радиальными выемками;
 2 – форма магнитов в поперечном тангенциальном сечении

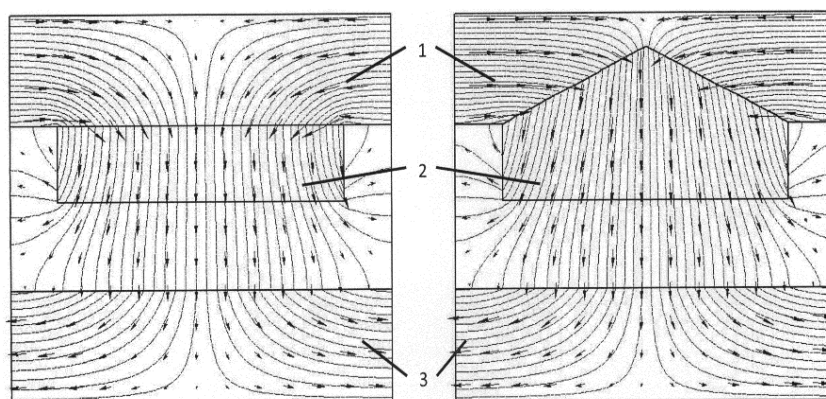


Рис. 7. Линии потока при прямоугольной (а) и пятиугольной (б) формах магнита в поперечном тангенциальном сечении:
 1 – сердечник ротора; 2 – магнит; 3 – сердечник статора

Для прямоугольной формы магнита наблюдаются малонасыщенные участки сердечника индуктора под магнитом по его оси d , отсутствующие для пятиугольной формы магнитов. Для магнита пятиугольной формы, по сравнению магнитом прямоугольной формы, магнитный поток увеличивается на 15 %, формы распределения индукции в рабочем зазоре и ЭДС обмотки якоря (рис. 8) приближены к синусоиде.

Размещение пятиугольных магнитов в выемках индуктора препятствует их тангенциальному сдвигу из-за упора в выемку и большей площади крепления. Найденная конструкция машины легла в основу патента на полезную модель РФ [8].

Магниты в виде криволинейных пятиугольников могут быть использованы и в обращенных машинах.

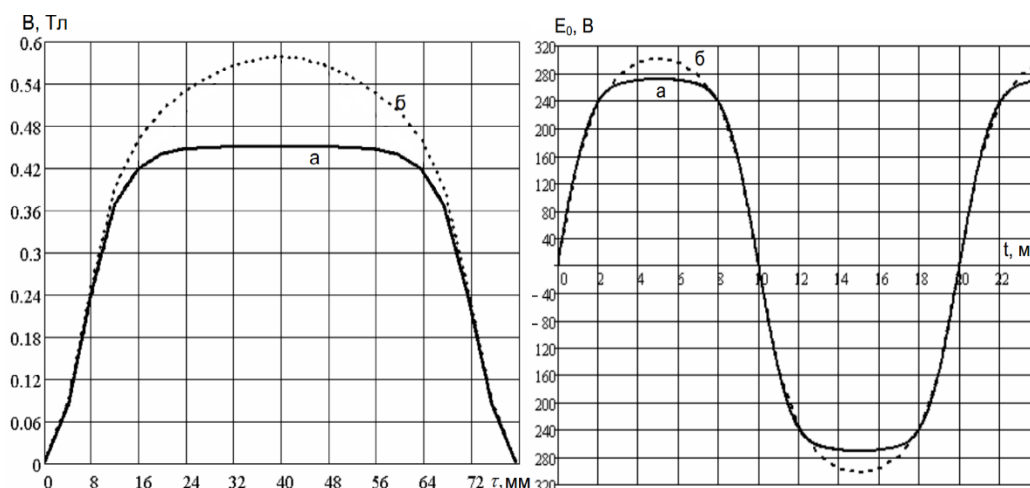


Рис. 8. Распределение индукции в зазоре и форма ЭДС обмотки якоря при прямоугольной (а) и пятиугольной (б) формах магнита

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов ориентированного поиска при определении конструкции магнитоэлектрических машин постоянного тока, торцевых магнитоэлектрических генераторов, синхронных машин с постоянными магнитами на перестраиваемых полевых конечно-элементных моделях позволяет определять рациональные формы магнитов индуктора.

Радиально намагниченные магниты с пятиугольной формой в поперечном сечении индуктора магнитоэлектрических машин, по сравнению с магнитами в форме сегментов кольца, позволяют увеличить основной магнитный поток, приблизить распределение индукции в зазоре и форму ЭДС к синусоидальной, обеспечить повышенную точность позиционирования и надежность крепления магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Ю.Б. Параметрический поиск рациональной конструкции электрической машины с постоянными магнитами на конечно-элементной модели // *Электричество*. – 2002. - N 4. - С. 47-51.
2. Shenoy K.L., Kumar M.S. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application // *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICSEOT*. – 2016. - P.1541.
3. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2018, Вып. 5, с. 46 – 55.
4. Guo, F. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound

Field Synchronous Machine Rotors / F. Guo, M. Salameh, M. Krishnamurthy, I. P. Brown // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. - 56(4). – P.3656.

5. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 3. – С. 70-79.

6. Safin A.R., Petrov T.I. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – p. № 01040.

7. Патент на изобретение RU 2138110, Статор магнитоэлектрической машины постоянного тока / Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я. - Заявка 97120858/09(022573) 16.12.97. Оpubл. 20.09.99. Бюл. N 26. 10 с.

8. Патент на полезную модель RU № 124519 U1. Система возбуждения торцевой магнитоэлектрической машины / Казаков Ю.Б., Корнилов Д.С. - Заявка № 2012133076/07 01.08.12. Опубликовано 27.01.2013. Бюл. №3.

Сафин А.Р., Петров Т.И., Басенко В.Р.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА¹

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00134, <https://rscf.ru/project/22-79-00134/>

Аннотация: Эффективность работы синхронного двигателя сильно зависит от конструкции его составных частей, в том числе от расположения материалов (топологии) ротора. Важным элементом ротора и в то же время самым дорогим являются постоянные магниты из материала NdFeB. Топологическая оптимизация позволяет уменьшить объем постоянных магнитов, что удешевит двигатель, или перейти на более дешевые материалы, например феррит, сохранив при этом эксплуатационные характеристики. В качестве метода поиска используется генетический алгоритм. Важная – оптимизация комплексная, проверяются не только электромагнитные параметры, но и тепловые и прочностные характеристики синхронного двигателя. Этот тест позволяет получить конструкции, которые можно изготовить на практике. В статье рассматривается разработанный метод комплексной топологической оптимизации с использованием генетического алгоритма, результаты оптимизации и методы тестирования полученных структур. Оптимизация позволяет уменьшить объем магнитов NdFeB на 22-32%, что снижает стоимость двигателя на 14-21%, или перейти на ферритовые магниты, что снижает стоимость на 24-33%, при этом изменяется значение крутящего момента, в пределах 2%, что говорит о сохранении крутящего момента.

Ключевые слова: оптимизация, топология, синхронный двигатель, постоянные магниты

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности проектирования без дополнительных инвестиций — перспективное направление исследований не только для энергетики и машиностроения, и одним из таких методов является топологическая оптимизация. Эта идея не нова, и она давно и эффективно используется в строительных и прочностных расчетах. Но для оптимизации конструкции электрических машин изменение топологии является относительно новой областью исследований и только в последние

5-10 лет активно развивается [1-4].

Объект исследования – синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) выбран по нескольким причинам.

1. Этот тип двигателя имеет наибольший потенциал топологической оптимизации из-за особенностей конструкции ротора. Большая площадь топологии и используемые стандартные схемы магнитов позволяют получить только обнадеживающие результаты [5].

2. Работа ведется с постоянными магнитами NdFeB, стоимость которых может достигать до 50% стоимости всего двигателя, при этом существует риск с поставкой материала, так как до 90% поставщиков сырья находятся в Китае. А за счет оптимизации мы можем уменьшить объем этих магнитов или перейти на другие типы (например, ферритовые магниты) [6].

3. Синхронные двигатели с постоянными магнитами находятся в тренде, они являются на сегодняшний день основным типом двигателей электротранспорта, что указывает на актуальность исследований [7].

В статье будут представлены результаты разработки комплексной топологической оптимизации, реализации алгоритма, работы генетического алгоритма [8-11]. На основе метода получены результаты, часть из которых проверена экспериментально, а эффективность метода подтверждена, по крайней мере, для конкретного варианта конструкции.

II. МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Во-первых, нам необходимо определить, почему мы используем комплексный подход при реализации топологической оптимизации.

Простая оптимизация посредством электромагнитного расчета (определение значения крутящего момента как целевой функции) обеспечит наиболее эффективную конструкцию, но реализовать эту конструкцию будет сложно из-за двух факторов:

1. Магниты NdFeB имеют температуру необратимого размагничивания (примерно равную 180°C), после которой производительность двигателя снизится до минимальных значений. Поэтому пункт метода проверки температуры нагрева ротора в процессе эксплуатации является обязательным.

2. При изменении топологии ротора существует вероятность ухудшения прочностных характеристик двигателя, что приведет к изменению величины

воздушного зазора, а это в свою очередь приведет к снижению КПД электрической машины.

Таким образом, метод будет состоять из 4 шагов:

1 Топологическая оптимизация на основе расчета электромагнитных параметров (целевая функция – крутящий момент).

2. Топологическая оптимизация на основе расчета тепловых параметров (целевая функция – температура ротора).

3. Топологическая оптимизация на основе расчета прочностных параметров (целевая функция – величина воздушного зазора).

4. Проверка итоговой топологии по исходным целевым параметрам.

Этапы 2,3,4 являются итеративными, и в случае недостижения заданных параметров происходит возврат к предыдущему этапу.

Рассмотрим подробнее особенности реализации метода комплексной топологической оптимизации.

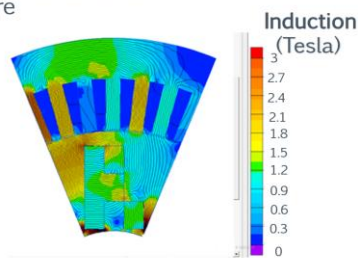
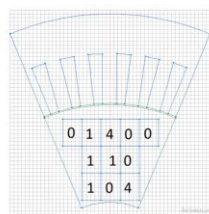
Оптимизация будет производиться не для всей конструкции двигателя, а только для сектора 45°C , это обусловлено симметричностью двигателя и доказано в работах как автора статьи, так и других исследователей, при этом время расчета снижается в 3-4 раза.

В качестве метода перебора вариантов (топологий ротора) используется генетический алгоритм, преимущества которого подходят для решения поставленной авторами задачи. Но важной особенностью является обязательное использование стадии мутации для решения задач с попаданием в локальные оптимумы.

Для примера рассмотрим 1-й этап расчета оптимизации по крутящему моменту (рис. 1). Для наглядности рассмотрим простой пример, когда топология ротора состоит всего из 11 ячеек. Сначала мы случайным образом получаем 4 последовательности чисел, где каждая последовательность отвечает за определенный материал. Далее происходит расчет для каждого варианта значения крутящего момента на основе определения электромагнитного поля двигателя, 19 раз производится расчет для моделирования вращения ротора и взаимодействия с различной комбинацией пазов статора. А дальше идут стандартные шаги генетического алгоритма: отбор на скрещивание, скрещивание, мутация, создание следующего поколения.

1. Establishment of an initial population $4 \times [0, 1, 4, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4]$
2. Calculation of the target function in specialized software

x 19



3. Selection of individuals for crossbreeding (Selection of the most suitable half)
4. Crossing (By two points)
5. Mutation (Mutation of any chromosome other than an elite chromosome)
6. Creating the next generation

RESULT

```
{'Individuals': [[0, 1, 4, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [0, 0, 4, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 0, 0, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4]], 'Fitness': [14.730919862656235, 62.313722405261586, 201.16742612394617, 430.0058139141842]}
```

Рис. 1. Пример этапа топологической оптимизации путем расчета электромагнитных параметров с использованием генетического алгоритма

Окончание оптимизации наступает после достижения двух вариантов: достижения заданного или при определенном количестве повторений значения целевой функции.

Аналогичный метод используется для проверки температурных характеристик, единственной особенностью является первоначальная проверка конструкции, полученной после оптимизации электромагнитным расчетом. Если температура ротора не достигает 180°C , алгоритм переходит к следующему шагу. В отрицательном случае проводится топологическая оптимизация.

Для проверки прочностных характеристик используется следующий пункт метода «Расчет изменения зазора синхронного двигателя на постоянных магнитах для проверки результатов комплексной топологической оптимизации».

В роли целевой функции будет выступать изменение воздушного зазора синхронного двигателя с постоянными магнитами, уменьшение размеров которого может привести к снижению энергетических характеристик машины, а также к невозможности реализации проектирование оптимизированного двигателя на практике.

Пункт предназначен для определения того, находится ли измеряемый параметр (изменение величины воздушного зазора) в допустимых пределах, а в случае отрицательного варианта проводится топологическая оптимизация ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами с целью повысить прочностные характеристики электрической машины.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Разработанный метод комплексной топологической оптимизации был реализован для двух случаев:

1. Изменение расположения магнитов NdFeB.
2. Замена магнитов NdFeB на ферритовые.

Использовались СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе стандартной конструкции. Для этих моделей двигателей была проведена топологическая оптимизация и получены сектора двигателей с новым расположением магнитов.

На рис. 2 представлена модель с новым расположением магнитов NdFeB, что теоретически позволило уменьшить объем постоянных магнитов на 30%, а на практике был собран реальный прототип ротора, также показанный на рис. 2.

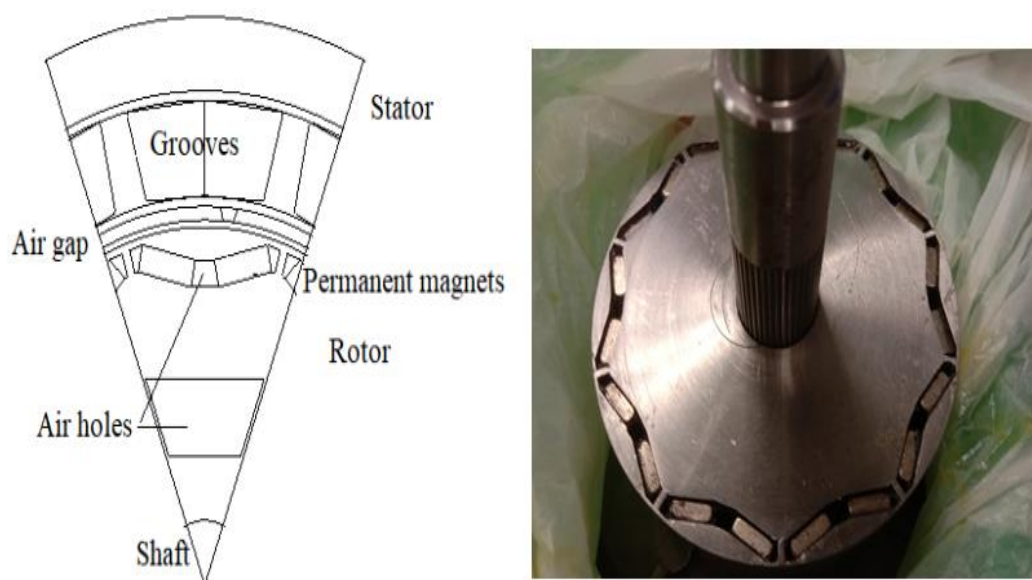


Рис. 2. СДПМ с новым расположением магнитов

На рис. 3 показан результат производительности при топологически оптимизированной замене ферритовыми магнитами. Хотя объем магнитов увеличился более чем на 110%, снижение стоимости двигателя составило 15%, за счет низкой стоимости самих ферритовых магнитов.

Таким образом, теоретические расчеты подтвердили эффективность комплексной топологической оптимизации, и существует необходимость верификации полученных моделей и экспериментальных данных.

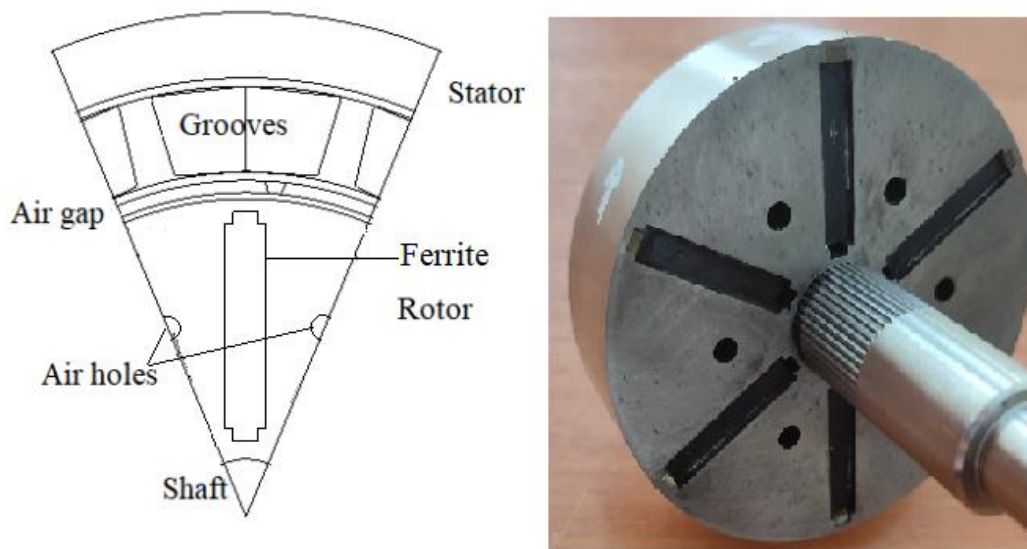


Рис. 3. СДПМ с ферритовыми магнитами

IV. ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Комплексный метод топологической оптимизации подходит для получения эффективных конструкций синхронных двигателей с постоянными магнитами, снижения стоимости и поддержания значения крутящего момента.

Полученные конструкции после проведения сложной топологической оптимизации необходимо проверить на сохранение эксплуатационных характеристик, а именно крутящего момента и скорости вращения [12].

С этой целью была разработана схема модернизированного экспериментального стенда для проверки результатов комплексной топологической оптимизации СДСМ, представленная на рис. 4.

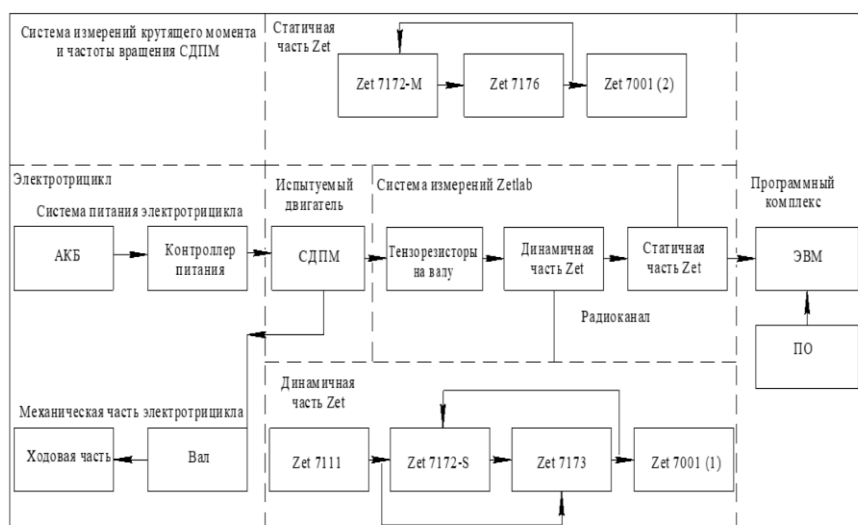


Рис. 4. Схема испытательного стенда

В качестве измерительной системы используется готовое решение от Zetlab, которое состоит из динамической части и статической части. Тензометры на валу передают информацию на 7111, который преобразует в цифровые значения, и передает на 7172-S, который передает через Bluetooth на 7172-M, и на 7173, который сохраняет результаты для дублирования сигнала. 7176 необходим для связи с ПК, а 7001 выполняет роль источника питания.

На этом стенде были проверены результаты топологической оптимизации при уменьшении объема постоянных магнитов NdFeB, и эксперименты показали, что при уменьшении объема постоянных магнитов на 31% изменение крутящего момента составило $\pm 2\%$, что подтверждает теоретические расчеты и результаты рассматриваемого метода.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный метод топологической оптимизации подходит для получения эффективных конструкций синхронных двигателей с постоянными магнитами, снижения стоимости и поддержания значения крутящего момента.

1. Представлен разработанный метод комплексной топологической оптимизации, в котором оптимизация проводится последовательно по величине крутящего момента, температуре ротора и величине воздушного зазора, все этапы являются итеративными. Эти особенности метода позволяют получить не просто эффективную конструкцию ротора, но и практически осуществимую.

2. В качестве метода поиска и для решения проблем с локальными оптимумами используется генетический алгоритм с обязательной операцией - мутацией.

3. Результаты оптимизации представлены для двух случаев: новой компоновки магнитов NdFeB и замены магнитов на ферритовые.

4. Представлена схема разработанного стенда для проверки результатов оптимизации, а полученные экспериментальные результаты подтверждают эффективность новой компоновки магнитов NdFeB.

Необходимы дальнейшие исследования для проверки конструкции с ферритовыми магнитами и оптимизации нового типа ротора, сочетающего NdFeB и ферритовые магниты, что позволит не только снизить стоимость двигателя, но и увеличить значение крутящего момента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Gauthey, P. Gangl, M. Hassan, "Multi-Material Topology Optimization with Continuous Magnetization Direction for motors design," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 483-489 (2022).
2. M. Risticevic, D. Iles, A. Moeckel, "Design of an interior permanent magnet synchronous motor supported by the topology optimization algorithm," 2016 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), pp. 221-225, 6 (2016).
3. T. Petrov, A. Safin, "Modification of the synchronous motor model for topological optimization, E3S Web of Conferences, 2020, 178, 01016 (2020).
4. S. Valtchev, V. Meshcheryakov, E. Gracheva, A. Sinyukov, T. Sinyukova, "Energy-Saving Control for Asynchronous Motor Motion System Based on Direct Torque Regulator, " *Energies* 2023, 16, 3870 (2023).
5. T. Ishikawa, P. Xie, N. Kurita, Topology Optimization of Rotor Structure in Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Ease of Manufacturing," *IEEJ Journal IA*, vol. 4, no. 4, pp. 469-475 (2015).
6. Y. Hu, H. Wei, X. Zhao, B. Zhou, H. Zhang, H. Chen, "Design and optimization of a variable flux hybrid permanent magnet synchronous machine," 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-6 (2022).
7. S. Maroufian, P. Pillay, "PM assisted synchronous reluctance machine design using AlNiCo magnets," 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp. 1-6, 5 (2017).
8. T. Petrov, A. Safin, "Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors," *E3S Web of Conferences*, 2020, 178, 01049 (2020).
9. F. Guo, M. Salameh, M. Krishnamurthy, I. Brown, "Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3656-3667 (2020).
10. A. Sinyukov, T. Sinyukova, E. Gracheva, S. Valtchev, V. Meshcheryakov, "Change in the Temperature Indicators of the Individual Thermal Point by Adjusting the Rotational Speed of the Asynchronous Engine," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 346-351 (2023).
11. S. Wilson, P. Stewart, B. Taylor, "Methods of resistance estimation in permanent magnet synchronous motors for real-time thermal management, " *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 698–707 (2010).
12. T. Petrov, V. Kornilov, A. Safin, A. Tsvetkov, R. Gibadullin, "Changing the design of a synchronous motor after testing, " *E3S Web of Conferences*, 2020, 220, 01030 (2020).

ЦИФРОВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ СИСТЕМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Аннотация: Возбуждение мощных синхронных генераторов через контактные кольца наиболее часто осуществляется с помощью тиристорных выпрямителей, питающихся через трансформаторы от высоковольтной сети. При требуемой кратности форсировки напряжения возбуждения полная мощность трансформатора намного больше активной мощности, что отрицательно влияет на габариты и стоимость оборудования. Использование цифровых транзисторных возбудителей с автоматическим регулятором возбуждения позволяет в 2-3 раза уменьшить полную мощность трансформатора, увеличить кратность форсировки напряжения возбуждения, а также повысить быстродействие системы и решить другие задачи.

Ключевые слова: синхронный генератор, система возбуждения, система управления, автоматический регулятор, транзисторный возбудитель, качество электроэнергии, быстродействие

I. ВВЕДЕНИЕ

На территории РФ и в ряде других стран по качеству электроэнергии действует ГОСТ 32144-2013 1. В этом стандарте оговорены требования к частоте и к другим параметрам напряжений источников электроэнергии в установившихся и переходных режимах работы. Если в качестве источника электроэнергии используется синхронный генератор (СГ), то требования по частоте напряжения обеспечиваются регулятором активной мощности, воздействующим на вращающий момент первичного двигателя, а также инерционностью вращающихся частей агрегата. Другие параметры напряжения СГ обеспечиваются системой возбуждения (СВ) и ее системой управления (СУ), которые управляют током возбуждения СГ, основным магнитным потоком и напряжением обмотки статора. СВ обеспечивает управление СГ также в аварийных режимах работы (короткие замыкания обмотки статора, витковые замыкания обмоток статора и ротора и др.).

Наиболее часто в системах возбуждения СГ используются тиристорные выпрямители. В таких системах питание возбудителей осуществляется от сети собственных нужд через трансформатор Тр. При требованиях по кратности форсировки напряжения возбуждения более двух полная мощность трансформатора

возбуждения превышает активную в 2 и более раз, что отрицательно влияет на габариты и стоимость комплекта оборудования.

При использовании транзисторных возбудителей возможна реализация систем самовозбуждения СГ (ССВ). Самовозбуждение позволяет существенно уменьшить мощность и габариты трансформатора возбуждения, увеличить кратность форсировки напряжения возбуждения, повысить быстродействие системы в целом. Возможна также реализация других преимуществ, например, выявление витковых замыканий СГ с помощью быстродействующей и точной СУ.

Применение цифровых автоматических регуляторов возбуждения, построенных на быстродействующих микроконтроллерах, позволяет реализовать указанные преимущества транзисторных ССВ, повысить точность поддержания режимных параметров СГ. Цифровые ССВ быстро обрабатывают изменения параметров нагрузки и других внешних условий, что важно для современных потребителей. Материалы по цифровым системам возбуждения СГ АО «Силовые машины» представлены в ряде публикаций 2-4.

Теория систем с СГ и транзисторными возбудителями представлена в диссертации Дикун И.А. (Пименова), а также в ряде публикаций 5-9. В публикации 10 рассмотрены аварийные режимы работы рассматриваемых установок. Теория систем с СГ и транзисторными возбудителями представлена также в монографии Воронцова А.Г. и Пронина М.В.

II. СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Работы по созданию микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения и его внедрения в продукцию АО «Силовые машины», завода «Электросила» были начаты коллективом АСУ-ВЭИ под руководством и при решающем участии Фадеева А.В. Регулятор первого поколения типа АРВ-М (рис.1), проектировался как многофункциональное устройство, удовлетворяющее современным требованиям, способное управлять системами возбуждения мощных турбо- и гидрогенераторов.

Применение быстродействующего микроконтроллера позволило отказаться от использования в составе регулятора аналоговых датчиков режимных параметров. Был реализован ПИД-закон регулирования напряжения, обеспечивающий в статическом

режиме поддержание напряжения в точке регулирования, равным уставке. При работе генератора на холостом ходу регулирование напряжения производится по ПИ-закону.

За пять лет промышленной эксплуатации регуляторов АРВ-М получен значительный опыт, который был полезен при разработке новых устройств данного типа. Улучшений требовала, главным образом, конструкция кассеты регулятора. Все недостатки были учтены при разработке регулятора второго поколения AVR-2М (рис.2).

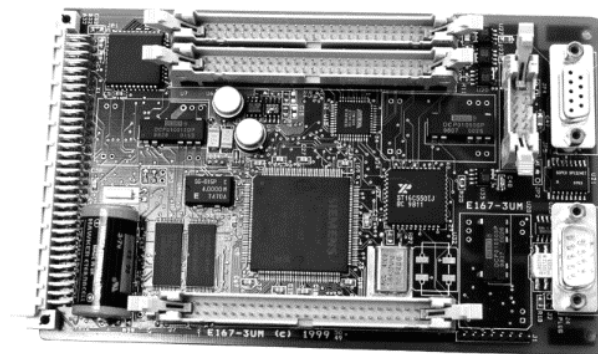


Рис.1. Кассета регулятора АРВ-М



Рис.2. Кассета регулятора AVR-2М

Появление регулятора AVR-3М (рис.3а) стало результатом создания системы управления и регулирования, отвечающей повышенным требованиям к электромагнитной совместимости и рабочему температурному диапазону. Также обязательным условием являлось наличие встроенного устройства регистрации аварийных событий.

В регуляторе создания AVR-4М (рис.3б) реализовано программно-аппаратное определение частоты вращения ротора. Также особенностью являлась возможность управления регулятором с использованием любого из мостов тиристорного выпрямителя («Х-система»), что позволяло более эффективно использовать оборудование СВ и повышало ее надежность.



Рис.3. Кассеты регуляторов AVR-3М, AVR-4М

В настоящее время активно ведётся использование автоматического регулятора возбуждения нового поколения AVR-45М (рис.4). Это самый современный регулятор, отличается малой стоимостью, а также включением в состав защит КЗ вращающегося возбудителя.



Рис.4. Кассета регулятора AVR-45М

В рамках программы импортозамещения при решающем участии специалиста Скуфина Н.А разработан и успешно внедрён цифровой автоматический регулятор возбуждения ПР-16. Выполненный полностью на отечественных элементах данный регулятор имеет широкий набор функций управления, ограничений, защиты. Имеется возможность использования в различных схемах управления возбуждением. ПР-16 обладает высокой взаимозаменяемостью при замене морально-устаревших регуляторов.

III. СГ С ЦИФРОВОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

В качестве варианта исполнения трехфазного источника электроэнергии рассматривается СГ с цифровой транзисторной системой самовозбуждения с двухполярным широтно-импульсным преобразователем (ШИП) постоянного напряжения. Схема установки представлена на рис.5.

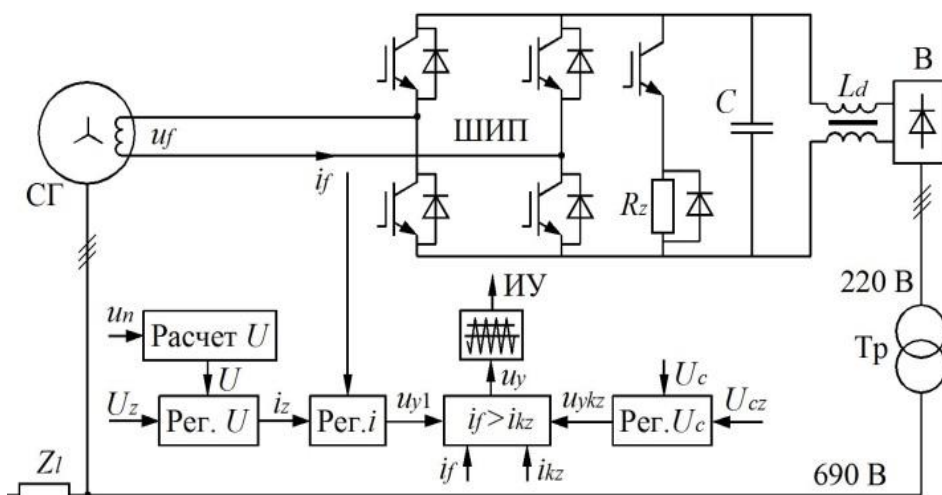


Рис.5. СГ с транзисторной системой самовозбуждения

Напряжение СГ 690 В, частота 50 Гц (двигатель дизельный или турбина) или переменная (вращение от ветроколеса). Возбуждение СГ осуществляется через контактные кольца при питании СВ от обмотки статора. В состав СВ входят: трансформатор Tr , выпрямитель B , фильтр выпрямленного напряжения со сглаживающим дросселем L_d и конденсаторной батареей C , двухполярный ШИП на модулях IGBT, цепь защиты с чоппером и защитным резистором R_z . Нагрузка СГ представлена трехфазным активно-индуктивным сопротивлением Z_l , подключенным к обмотке статора.

В СУ имеется контур регулирования напряжения U статора СГ и подчиненный ему контур регулирования тока возбуждения i_f . В СУ входят блок расчета действующего напряжения статора U , ПИ-регулятор напряжения СГ (формирует заданный ток возбуждения i_z), ПИ-регулятор тока возбуждения (формирует напряжение управления ШИП u_{y1}). При коротком замыкании (КЗ) обмотки статора включается ПИ-регулятор напряжения конденсатора, который формирует напряжение управления транзисторами ШИП u_{ykz} в режиме рекуперации энергии. Из напряжений

управления u_{y1} и $u_{yкз}$ формируется напряжение u_y в зависимости от наличия или отсутствия КЗ (наличие КЗ устанавливается в результате сравнения токов фаз СГ с уставкой аварийного тока или по увеличению тока возбуждения). Напряжение возбуждения u_f пропорционально напряжению управления. Начальное возбуждение СГ осуществляется от остаточного напряжения СГ. В нормальных режимах работы основная часть энергии СГ передается в нагрузку Z_L . Энергия возбуждения передается от обмотки статора в обмотку возбуждения через элементы Тр, В и ШИП.

IV. ХАРАКТЕРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СГ

Для разработки рассматриваемых систем с СГ построены их математические и компьютерные модели, на которых выполнены исследования, необходимые для проектирования. Некоторые результаты исследований представлены ниже. Для расчетов использованы параметры СГ, указанные в табл.1. По трансформатору и СВ данные приведены в табл.2.

Таблица 1

Параметры СГ

Мощность СГ	4000	кВт
Коэффициент мощности СГ	0,95	
Напряжение СГ	690	В
Частота напряжения СГ	50	Гц
Напряжение возбуждения холостого хода СГ	52,2	В
Ток возбуждения холостого хода СГ	144,5	А
Номинальный ток возбуждения СГ	288	А
Индуктивность рассеяния обмотки статора СГ	0,165	о.е.
Индуктивность намагничивания СГ по оси d	1, 251	о.е.
Индуктивность рассеяния демпферов по оси d	0,057	о.е.
Индуктивность рассеяния демпферов по оси q	0,138	о.е.
Индуктивность рассеяния обмотки возбуждения	0,138	о.е.
Активное сопротивление фазы статора	0,0032	о.е.
Активное сопротивление демпферов по оси d	0,0182	о.е.
Активное сопротивление демпферов по оси q	0,0213	о.е.

Из приведенных данных следует, что в нормальных режимах работы СГ кратность форсировки (увеличения) напряжения возбуждения в режиме номинальной нагрузки около 3.

Параметры СВ с двухполярным ШИП

Мощность трансформатора	45	кВА
Напряжение первичной обмотки	690	В
Частота напряжения трансформатора	50	Гц
Коэффициент трансформации k_{tr}	3,1	
Напряжение короткого замыкания трансформатора	6	%
Индуктивность сглаживающего дросселя	240	мкГн
Емкость конденсатора C	4200	мкФ
Активное сопротивление защитного резистора R_z	3,1	Ом
Частота опорных напряжений ШИП f_{op}	800	Гц
Выпрямленное напряжение диодного моста	300	В
Максимальное выпрямленное напряжение моста	900	В

Один из расчетов выполнен для случая наброса 100 % нагрузки на СГ при работе его на холостом ходу. Результат представлен на рис.6.

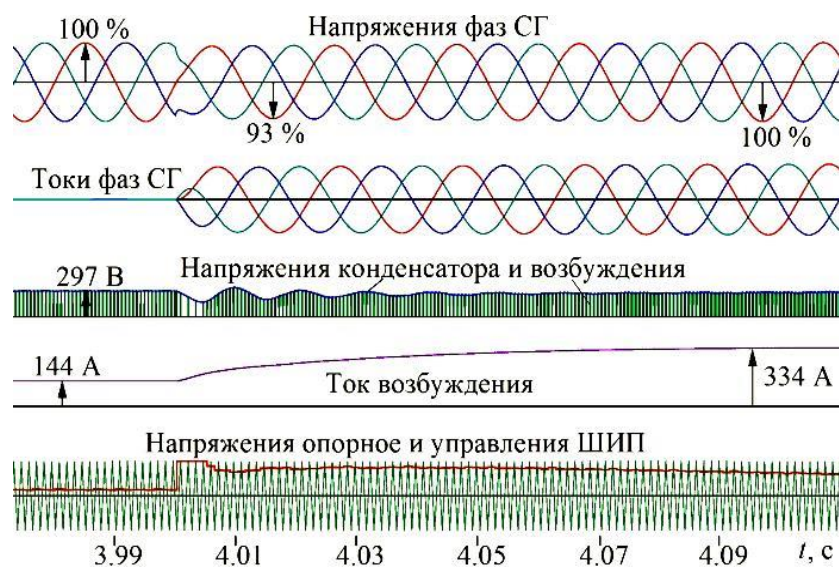


Рис.6. Наброс 100 % нагрузки на СГ

Из расчета рис.6 следует, что на холостом ходу напряжение обмотки статора номинальное 690 В, ток возбуждения 144 А, что близко к расчетным данным СГ. При набросе 100 % нагрузки на обмотку статора напряжение кратковременно снижается до 93 % и восстанавливается до 100 % за время менее 0,1 с. Соответственно изменяется выпрямленное напряжение диодного моста. Ток возбуждения в переходном режиме увеличивается до 334 А, затем спадает. В установившемся режиме при номинальной нагрузке СГ ток возбуждения равен 288 А, что соответствует проектным данным.

Следует отметить, что в ШИП в начале переходного процесса напряжение управления достигает максимальной величины и обеспечивается максимальная форсировка напряжения возбуждения. Это позволяет минимизировать провал напряжения статора до 7 %.

На рис.7 представлены результаты расчета процессов в установке с двухполярным ШИП при работе в номинальном режиме и сбросе 100 % нагрузки.

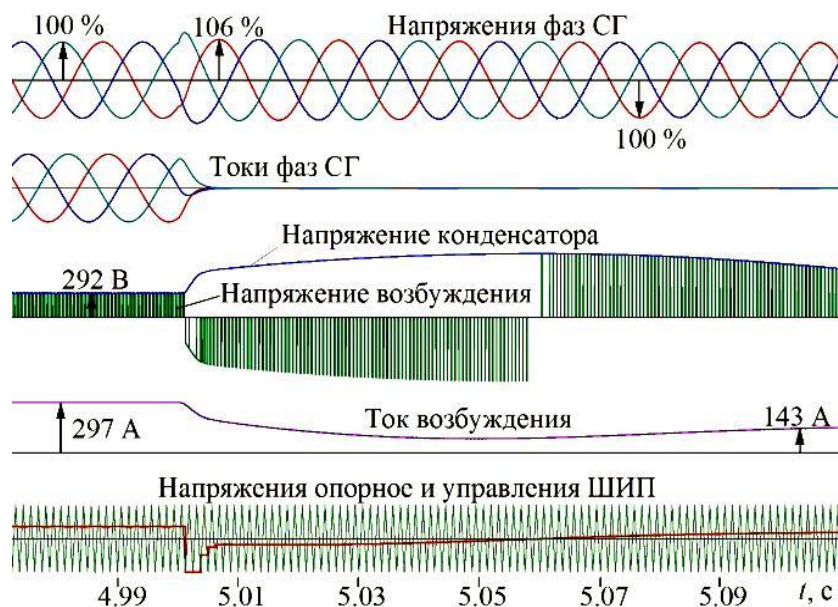


Рис.7. Сброс 100 % нагрузки СГ

Из расчета и из рис.7 следует, что при сбросе нагрузки СГ напряжение статора увеличивается до 106 % и затем восстанавливается до 100 % за время менее 0,1 с. При сбросе нагрузки система управления реагирует на увеличение напряжения статора и снижает напряжение управления ШИП до минимального (отрицательного) значения. Вследствие этого напряжение обмотки возбуждения СГ становится отрицательным и при сохранении полярности тока возбуждения происходит рекуперация энергии из СГ в конденсатор СВ при уменьшении тока возбуждения. Напряжение конденсатора увеличивается и диодный выпрямитель запирается. Энергия, накопленная в дросселе L_d , при снижении его тока до нуля также переносится в конденсатор. Из-за уменьшения тока возбуждения снижаются основной магнитный поток и напряжение обмотки статора СГ. Через некоторое время напряжение управления ШИП вновь становится положительным и СВ переходит в режим передачи энергии от обмотки статора к обмотке возбуждения.

Сравнительно небольшие отклонения напряжения СГ при набросе и сбросе нагрузки обусловлены высоким быстродействием транзисторного возбудителя (задержка реакции на возмущение 1-2 мс), а также значительной кратностью форсировки напряжения возбуждения.

Важной частью оценки работоспособности систем является анализ аварийных режимов работы. С этой целью выполнены расчеты трехфазных КЗ обмотки статора СГ в режиме номинальной нагрузки. Замыкание имитировано скачкообразным уменьшением индуктивностей и активных сопротивлений в фазах нагрузки до пренебрежимо малых величин. При КЗ система управления переводит ШИП в режим рекуперации энергии из магнитного поля СГ в конденсатор C в СВ. При этом СУ поддерживает напряжение конденсатора на уровне около 900 В. При превышении указанного уровня напряжения включается чоппер и энергия конденсатора сбрасывается в защитный резистор. Сопротивление защитного резистора принято равным 1 Ом. Результат расчета трехфазного КЗ СГ представлен на рис.8.

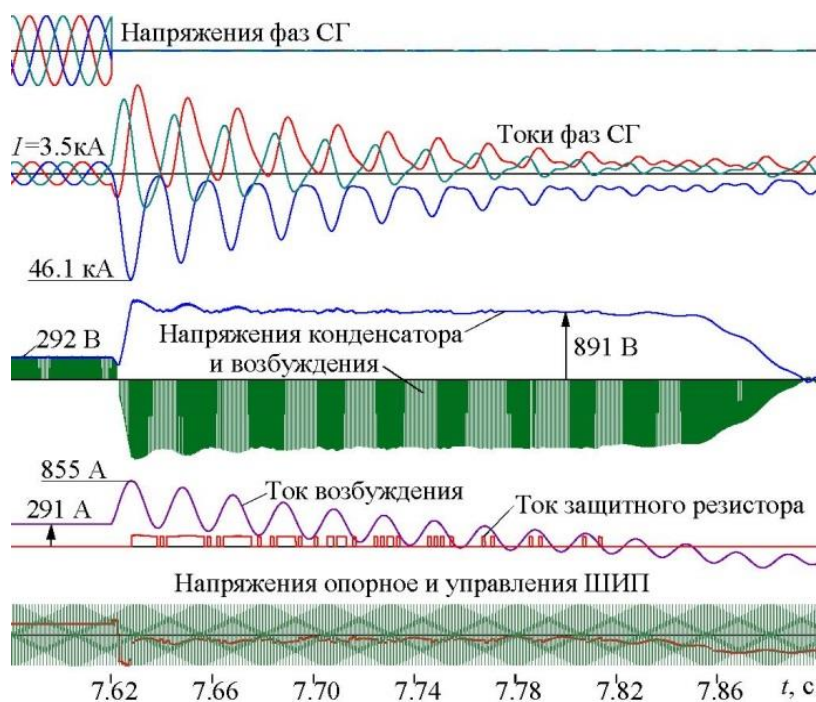


Рис.8. Трехфазное КЗ СГ

Из расчета процесса КЗ и из рис.8 следует, что до КЗ напряжение обмотки статора СГ 690 В, действующий ток фазы СГ 3,5 кА, ток возбуждения 291 А. При возникновении КЗ и увеличении тока возбуждения до 500 А происходит переход возбудителя в режим рекуперации энергии и гашения токов СГ. При КЗ амплитуда тока

фазы достигает 46,1 кА, ток возбуждения увеличивается до 855 А. В процессе КЗ система управления, действуя на ШИП, поддерживает выпрямленное напряжение СВ на уровне около 890 В. Диодный мост в СВ запирается. За счет рекуперации энергии магнитного поля СГ в возбудитель работоспособность ШИП сохраняется (при нулевом напряжении статора). В напряжении конденсатора наблюдаются небольшие колебания и на некоторых интервалах времени включается чоппер, в нем появляется ток и энергия конденсатора, преобразуется в тепловые потери в защитном резисторе R_z .

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены структуры и алгоритмы работы цифровых транзисторных систем самовозбуждения СГ с использованием выпрямителя и ШИП. Была построена модель установки СГ, которая позволила детально изучить ее работу и характеристики.

Разработанная модель цифровой транзисторной системы самовозбуждения СГ может быть использована для исследования и оптимизации работы СГ, а также для создания прототипов таких устройств в реальных условиях эксплуатации. Результаты исследования могут быть полезны для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и исследованием электроэнергетических систем, а также студентов и преподавателей соответствующих специальностей.

АО «Силовые машины» завод «Электросила», один из лидеров в производстве электрических машин, постоянно работает над улучшением своей продукции. Современные автоматические регуляторы возбуждения, используемые на заводе, позволяют добиться высоких качественных характеристик вырабатываемой электроэнергии.

Используя передовые технологии и опыт, АО «Силовые машины» завод «Электросила» обеспечивает потребителей надежными и эффективными системами электрооборудования, которые позволяют успешно выполнять задачи в любых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. Mitin F. V., Controlling the Excitation of Synchronous Generator Based on an Algorithm with a Predictive Model, 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 1446-1450. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507234
3. Mitin F. V., Control of The Excitation of Synchronous Generator Using The Algorithm of Correction of Parameters of Control Structure, IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 324-329. doi: 10.1109/IECON.2019.8927126
4. Mitin F. V., Studying the Algorithm of Optimal Correction of Control Structure Parameters for Generator Excitation Control, *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589048.
5. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Глушаков В.В., Пименова И.А., Григорян А.С. Системы самовозбуждения синхронного генератора с двухполярный и однополярный ШИП // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2016. – № 1.
6. Пронин М.В., Пименова И.А., Григорян А.С., Глушаков В.В., Воронцов А.Г. Системы самовозбуждения синхронного генератора с двухполярным и однополярным широтно-импульсным преобразователем // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2016. – №. 1.
7. Grigoryan A., Pimenova I., Pronin M., Shelyuh V. Self-Excitation Systems of a Synchronous Generator with a bipolar and unipolar PWM DC-DC Converters // EPE-2016, 5–9 September 2016, Karlsruhe/Germany.
8. Pronin M.V., Vorontsov A.G., Pimenova I.A., Grigoryan A.S. A model of a synchronous machine with a transistor exciter for analysis of normal operations, external and turn-to-turn faults // IECON 2016, Firenze/Italy.
9. Пронин М.В., Воронцов А.Г., Шелюх В.Ю., Пименова И.А., Григорян А.С. Моделирование и исследование транзисторной системы самовозбуждения синхронного генератора // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2015. – № 10 – С. 50–56.
10. Пронин М. В. Модель синхронной машины с транзисторным возбудителем для анализа нормальных режимов, внешних и витковых замыканий / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, А. С. Григорян, И. А. Пименова // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2016. – № 6 – 2016. – С. 61–68.
11. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам // СПб., изд-во “Ладога”, 2020 г. – 336 с.

Колупицкий К.А.¹, Самохвалов Д.В.²

¹АО «Силовые машины»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация: Представленная научная статья содержит техническую информацию о методологии проектирования электрических машин и, в частности, турбогенераторов. Целью данной работы является подведение авторами итогов выполненных ими многолетних исследований в данной области. В статье рассматривается и анализируется основа классического подхода к проектированию турбогенераторов, при котором имеет место многовариантность решения данной задачи. Приводятся доводы о необходимости разработки новой критериальной расчетной модели турбогенератора, позволяющей определить единственный наилучший вариант решения задачи проектирования турбогенератора. В работе предлагается наиболее объективный критерий проектирования машины и выполняется аргументация его выбора. Кроме того, приводятся принципы построения расчетной математической модели турбогенератора, позволяющей выполнить его оптимизацию относительно критерия, заложенного в основу проектирования, а также сама математическая модель. В работе содержатся результаты анализа и верификации данной математической модели. Заключительная часть работы содержит соответствующие выводы.

Ключевые слова: проектирование электрической машины, критерий проектирования, машинная постоянная, турбогенератор, поперечная геометрия

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бурными темпами создаются, развиваются и получают активное использование среди инженеров-электромехаников современные программные продукты для ПК, предназначенные для моделирования и визуализации тепловых и электромагнитных процессов, протекающих в узлах электрических машинах, а также для оценки их нагрузок в механическом отношении. Данные программы нацелены на достаточно быстрое получение результата исследования. Однако, для выполнения поставленных на программном уровне задач необходимы исходные данные.

Говоря об электрических машинах такими данными являются основные размеры, характеризующие продольно-поперечную геометрию активной части машины, и обмоточные данные, содержащие в себе информацию о количестве, размерах и форме

пазов в сердечниках статора и ротора, а также об их наполнении обмоткой. Все эти параметры определяются расчетным путем по методикам, разработанным инженерами электромашиностроительных предприятий или научно-исследовательских институтов применительно для тех или иных типов машин. В процессе расчета основных размеров и обмоточных данных машины проектировщик определяет достаточно большое число неизвестных величин, многие из которых связаны с выбором значений тех или иных параметров из числовых диапазонов, рекомендуемых авторами методик, исходя из сформированной в течение продолжительного времени статистической информации по результатам испытаний и эксплуатации электрических машин, подобных проектируемой машине. Перечисленные выше обстоятельства обуславливают высокую сложность процесса проектирования электрической машины и способствуют повышению его трудоемкости, которая, наряду с трудоемкостью изготовления машины, является составляющей общей стоимости изделия, поскольку связана с затратами рабочего времени инженера-расчетчика.

Данный факт подтверждает и академик И. П. Копылов (1924-2014) – создатель теории обобщенного электромеханического преобразования, посвятивший всю свою жизнь изучению и развитию электромеханики. В своих трудах по проектированию электрических машин, опубликованных в разные годы, он отмечает, что проектирование электрической машины ввиду необходимости учета достаточно большого количества величин, имеющих различную физическую природу, является решением сложной и, главным образом, многовариантной задачей [1].

Основной причиной возникновения каких-либо неопределенностей в ходе расчета электрической машины является отсутствие в расчетных методиках критериев, относительно которых ведется расчет параметров машины и определяется ее поперечная геометрия. Причем это умозаключение в равной степени относится ко всем типам электрических машин и, в частности, к турбогенераторам.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Задача проектирования любого электромеханического преобразователя энергии может быть условно разделена на две задачи – прямую и обратную. Решение прямой задачи имеет своей целью выполнение расчета основных параметров и характеристик машины, оценку ее технико-экономических показателей, а также проверку соответствия машины требованиям, предъявляемым заказчиком. При решении обратной задачи

определяются главные размеры машины и ее обмоточные данные, являющиеся своеобразными исходными данными для прямой задачи. Очевидно, что наибольшую трудность в ходе проектирования машины составляет решение именно обратной задачи.

Использование классических методов проектирования электрических машин делает крайне условной границу между прямой и обратной задачами, так как правильность определения основных размеров и обмоточных данных может быть оценена только после завершения расчета машины. В случае получения неудовлетворительных результатов расчета инженер, выполняющий его, вынужден возвращаться на начальный этап расчета для выполнения корректировки исходных данных, что в очередной раз подтверждает многовариантность расчета электрической машины.

При использовании же для решения обратной задачи расчетной модели, в основе которой лежит определенный критерий проектирования, расчетчик гарантированно получит положительный результат решения прямой задачи проектирования машины с минимальными затратами времени.

Ниже описывается ход размышлений о выборе критерия проектирования для турбогенераторов и выполняется его аргументация. Кроме того, рассматривается принцип построения математической модели турбогенератора, учитывающей выбранный критерий, и приводится сама разработанная расчетная модель с краткими результатами ее анализа и проверки корректности.

А. Машинная постоянная турбогенератора

В соответствии с обзором существующих расчетных методик для турбогенераторов, приведенным в [2], их основу составляют те или иные машинные постоянные, связывающие электромагнитные нагрузки машины с ее основными размерами. Наиболее распространенной из них является машинная постоянная C_A , предложенная швейцарским ученым-электротехником Э. Арнольдом (1856-1912). Применительно к синхронным электрическим генераторам, каковыми и являются турбогенераторы, машинная постоянная Арнольда представляет собой отношение объема расточки сердечника статора к мощности машины. Согласно [3] математическое выражение записывается в следующем виде:

$$C_A = D_1^2 l_1 n_1 / S_n = 9 \cdot 10^{13} / (A_1 B_8 k_y) \quad (1)$$

Правая часть (1) включает в себя коэффициент укорочения шага статорной

обмотки k_y , обусловленный конструктивными особенностями обмотки, а также электромагнитные нагрузки турбогенератора – амплитудное значение индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором B_δ в Тл, характеризующее плотность магнитного потока в зазоре машины, и линейная токовая нагрузка статора A_1 в А/см, представляющая собой суммарный ток обмотки статора, отнесенный к единице длины окружности внутреннего диаметра сердечника статора. Левая часть (1) содержит в себе геометрические размеры сердечника статора турбогенератора – внутренний диаметр D_1 и длину l_1 в мм, а также скорость вращения магнитного поля статора n_1 в об/мин и полную мощность машины S_n в МВА.

Тремя основными размерами турбогенератора принято считать аксиальную длину сердечника статора l_1 и два его радиальных размера – наружный D_{1n} и внутренний D_1 диаметры, которые на начальной стадии проектирования машины являются неизвестными. Магнитная индукция B_δ и линейная нагрузка A_1 в правой части (1) также выступают в качестве неизвестных величин. От их числовых значений зависят величины аксиальных и радиальных размеров сердечника статора l_1 и D_1 . Причем, очевидно, что существует множество пар значений B_δ и A_1 , при которых объем, описываемый произведением $D_1^2 l_1$, будет одним и тем же. Отсюда возникает новая неопределенность, для устранения которой необходимо сформулировать соответствующий вспомогательный критерий. В конечном итоге из-за ряда дополнительных ограничений решение задачи проектирования машины усложняется.

Кроме того, в ходе выполнения расчета магнитной цепи турбогенератора инженеру необходимо задаться четырьмя значениями индукций магнитного поля на участках данной цепи, а именно, в спинках и зубцах сердечников статора и ротора, а при выполнении расчета обмоток статора и ротора – значениями плотностей тока в витках катушек данных обмоток. Таким образом, расчетчик сталкивается с восемью величинами, числовые значения которых не определены однозначно. Отсюда появляется множество вариантов решения одной задачи проектирования электрической машины. Для упрощения процесса решения данной задачи необходимо применение определенного подхода к проектированию турбогенераторов, в основе которого лежит объективный критерий, имеющий реальный физический смысл. Такой подход должен в полной мере исключать необходимость задаваться расчетчику

числовыми значениями неизвестных величин.

Правая часть (1) характеризует уровень использования меди обмоток и стали сердечников – активных материалов турбогенератора. В то время как левая часть представляет собой отношение внутреннего объема расточки статора $D_1^2 l_1$ к некоторому развиваемому машиной расчетному моменту, определяемому отношением S_n/n_1 , и характеризует степень использования материалов в объеме активного ядра турбогенератора относительно его расчётного момента. Говоря о влиянии значений электромагнитных нагрузок на данный показатель, следует отметить, что при повышении значений A_1 и B_8 его значение повышается, а значение C_A , соответственно, уменьшается, но критерий, который определял бы минимально допустимое значение C_A отсутствует, что является одним из серьезных недостатков данной машинной постоянной.

В. Выбор и обоснование критерия проектирования

Под критерием проектирования электрической машины следует понимать какой-либо параметр, характеризующий ее качество. Он обязан быть объективным и признанным большим числом специалистов, занятых в данной научной области. На самом деле таких критериев может быть сформулировано достаточно много. Например, проектирование машины можно вести, стремясь обеспечить ее минимальную рыночную стоимость, себестоимость изготовления, материалоемкость или массу, а также ряд других параметров или факторов.

Проведя анализ (1) и поняв его содержание, теперь можно однозначно заключить, что наиболее объективным критерием качества проектируемой машины является уровень использования материалов в объеме активного ядра машины, рассматриваемый относительно ее момента. Однако, применительно к машинной постоянной Арнольда речь идет про уровень использования материалов только в объеме внутреннего диаметра сердечника статора, а сам статор в (1) учитывается косвенно через электромагнитные нагрузки B_8 и A_1 . Из этого следует, что рассматриваемая система, а именно турбогенератор, разомкнута. В связи с этим и возникает неопределенность в определении основных размеров машины, для устранения которой необходимо определить наружные границы сердечника статора, а также место, отведенное обмотке, и таким образом замкнуть систему.

Кроме того, существует еще один важный аспект, который необходимо иметь в

виду при проектировании турбогенераторов. Он заключается в том, что статор и ротор турбогенератора в разной степени участвуют в создании электромагнитного момента машины. Здесь главную роль выполняет статор, а ротор, являющийся индуктором, участвует только лишь в создании магнитного потока. Из чего достаточно очевидно, что при определении основных размеров турбогенератора упор необходимо делать на статор, как на функциональный узел машины, являющийся определяющим в создании электромагнитного момента.

Говоря о понятии «электромагнитный момент» электрической машины, следует отметить его инвариантность относительно того, в каком режиме работает рассматриваемая машина, в двигательном или генераторном, это отражается лишь на его знаке. Кроме того, по сравнению с понятием «мощность», которая может быть, как потребляемой, так и отдаваемой, в зависимости от режима работы машины, понятие «электромагнитный момент» является более универсальным и имеет значительное физическое содержание.

После выбора критерия, относительно которого будет выполняться проектирование турбогенератора, требуется составление математической модели турбогенератора в статическом режиме работы. Принцип разработки расчетной модели рассмотрим ниже.

С. Принцип разработки математической модели турбогенератора

Расчётная математическая модель турбогенератора, лежащая в основе проектирования машины и обеспечивающая выполнение выбранного критерия, должна в обязательном порядке включать в свою структуру данный критерий. Применительно к критерию проектирования, рассматриваемому в данной статье, это означает, что она должна быть построена на основе физической величины, определяющей принцип действия машины, и должна содержать параметры, описывающие геометрию машины в аксиальном и продольном направлениях, а также параметры, характеризующие основные функциональные узлы машины – стальные сердечники и медные обмотки.

Для того, чтобы решить эту задачу, рассмотрим некоторую графическую модель турбогенератора, представленную на рис. 1.

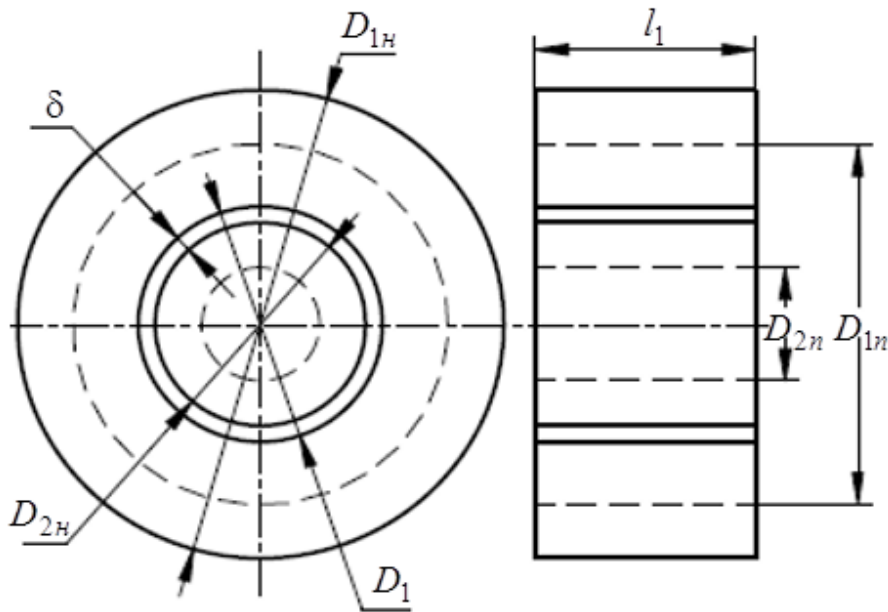


Рис. 1. Графическая модель турбогенератора

Здесь буквами обозначены следующие размеры турбогенератора:

l_1 – аксиальная длина пакета стали статора;

D_1 – внутренний диаметр сердечника статора, диаметр его расточки;

$D_{1н}$ – наружный диаметр сердечника статора;

$D_{2н}$ – наружный диаметр сердечника ротора, диаметр бочки вала ротора;

δ – воздушный зазор между статором и ротором;

$D_{1н}$ – диаметр окружности, условно определяющей основания обмоточных пазов сердечника статора;

$D_{2н}$ – диаметр окружности, условно определяющей основания обмоточных пазов сердечника ротора.

Таким образом, можно отметить, что графическая модель турбогенератора представляет собой цилиндр длиной l_1 и диаметром $D_{1н}$.

Продолжая начатые ранее размышления, выполним воображаемый эксперимент и зафиксируем размеры l_1 и $D_{1н}$, характеризующие активный объем турбогенератора, а также величину воздушного зазора δ . Очевидно, что в этом случае любое изменение диаметра D_1 будет приводить к соответствующему изменению диаметра $D_{2н}$. Так, уменьшение диаметра D_1 приведет к необходимости уменьшения диаметра $D_{2н}$, приближая его к диаметру $D_{2н}$, что будет иметь своим следствием уменьшение высоты

зубцов сердечника ротора и монотонное снижение при этом величины электромагнитного момента, который в конечном итоге примет нулевое значение. В свою очередь, увеличение диаметра D_1 неизбежно влечет за собой увеличение и диаметра D_{2n} , приближая его к диаметру D_{1n} и, тем самым, уменьшая высоту зубцов сердечника статора. При этом будет иметь место монотонное снижение величины электромагнитного момента, который условно при достижении диаметром D_1 величины D_{1n} примет нулевое значение.

Из этого следует, что при фиксированном объеме активного ядра турбогенератора существует такое значение диаметра D_1 , при котором будут обеспечиваться максимально возможная для данной машины величина электромагнитного момента и наилучшая степень использования активных материалов.

D. Практические результаты работы

Учитывая приведенные выше факты и доводы, а также выбранный критерий проектирования и конструктивные особенности турбогенераторов, авторами на основе математического выражения для электромагнитного момента выполнено математическое описание зубцовой зоны сердечника статора турбогенератора, получены уравнения, связывающие геометрические размеры обмоточных пазов сердечника статора с индукцией магнитного поля в зубцах, спинке статора и в воздушном зазоре на участках магнитной цепи статора, а также составлена расчетная математическая модель оптимальной поперечной геометрии турбогенератора. Подробное описание последовательности разработки математической модели турбогенератора приведено в [4]. Здесь же приведем только полученные результаты.

Расчетная модель, позволяющая определить оптимальную с точки зрения использования материалов в объеме активного ядра турбогенератора поперечную геометрию относительно максимума электромагнитного момента, реализуется в виде функционального множителя F_{M^*} в математическом выражении для электромагнитного момента $M_{эм}$:

$$M_{эм} = k_F F_{M^*} F_{M0} D_{1n}^5 \quad (2)$$

В (2) k_F - коэффициент пропорциональности, F_{M0} - функциональный множитель, учитывающий угол нагрузки синхронной машины, математическое выражение для которого получено в [5].

Выражение для F_{M^*} имеет вид:

$$F_{M^*} = l_{1^*}^2 D_{1^*}^4 B_{\delta}^2 k_{n1} / (p \cdot (l_{1^*} + 2,5 D_{1^*} / p)) \quad (3)$$

Здесь l_{1^*} и D_{1^*} – определенные выше по тексту величины, отнесенные к наружному диаметру сердечника статора D_{1n} , p - число пар полюсов машины, k_{n1} - коэффициент, учитывающий суммарную площадь обмоточных пазов сердечника статора.

Уравнение (3) описывает функцию двух независимых переменных $F_{M^*} = f(D_{1^*}, B_{\delta})$, причем k_{n1} также зависит от этих двух переменных. На рис. 2 представлен общий вид графической зависимости $F_{M^*} = f(D_{1^*}, B_{\delta})$.

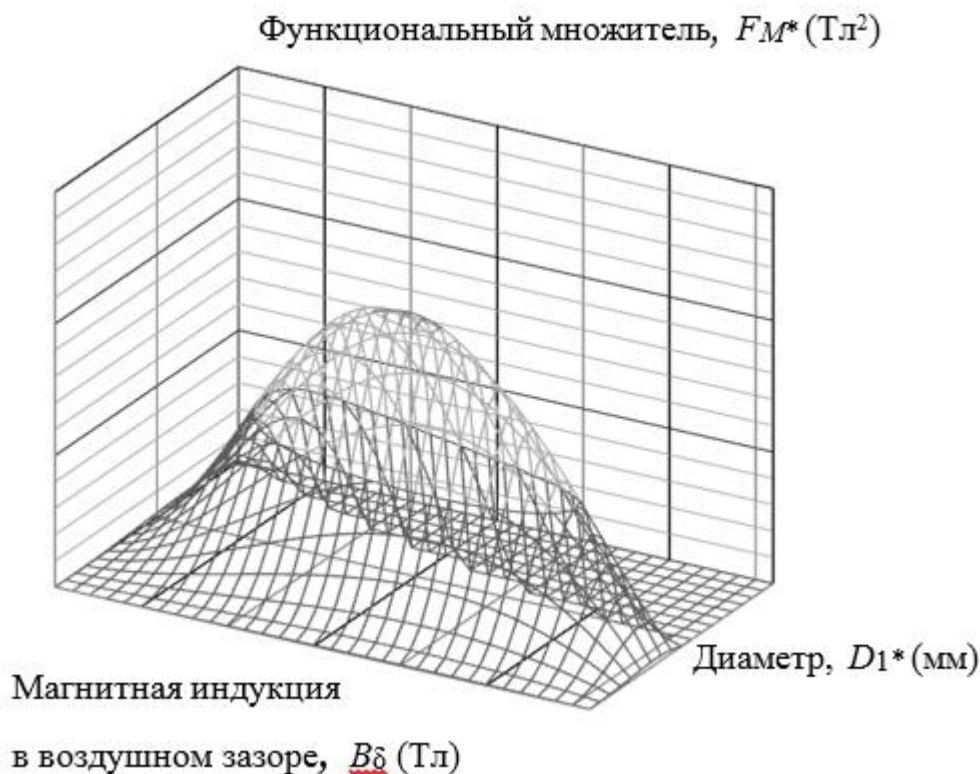


Рис. 2. Общий вид графической зависимости $F_{M^*} = f(D_{1^*}, B_{\delta})$

Из рис.2 видно, что поверхность, описываемая (3), имеет вершину, координаты которой D_{1^*m} и $B_{\delta m}$ представляют собой оптимальные значения внутреннего диаметра сердечника статора и индукции магнитного поля в зазоре машины, при которых будет обеспечиваться наилучшая степень использования материалов внутри активного объема турбогенератора, рассматриваемая относительно электромагнитного момента.

Числовые значения максимума функции F_{M^*} , а также соответствующие ему значения координат D_{1^*m} и $B_{\delta m}$ могут быть определены при помощи любого из современных математических пакетов для ПК.

В таблице 1 приведены результаты сравнения значений основных параметров машины, определенных посредством составленной расчетной модели, с соответствующими параметрами турбогенераторов, находящимися в промышленной эксплуатации. Для выполнения сравнительного анализа были выбраны двенадцать турбогенераторов с воздушным и водородно-водяным охлаждением в двух- и четырехполюсном исполнении мощностью от 40 до 1200 МВт.

Таблица 1

Результаты расчета параметров турбогенераторов

№ т/Г	Параметры турбогенераторов					
	$D_{1^*}, о.е.$	$D_{1^*m}, о.е.$	$B_{\delta}, Тл$	$B_{\delta m}, Тл$	$D_{1н}, мм$	$D_{1нм}, мм$
1	0,492	0,433	0,90	0,828	2360	2326
2	0,497	0,446	0,81	0,757	1750	1735
3	0,427	0,420	0,90	0,724	2410	2351
4	0,486	0,438	0,92	0,827	2500	2494
5	0,48	0,431	0,89	0,785	2550	2567
6	0,489	0,449	0,89	0,801	2590	2568
7	0,476	0,447	1,05	0,843	2950	2855
8	0,493	0,452	0,91	0,795	2670	2670
9	0,475	0,445	1,05	0,844	2950	2906
10	0,601	0,526	1,10	0,994	3280	3272
11	0,633	0,544	0,94	0,884	3080	2962
12	0,631	0,536	1,10	0,992	3310	3005

Результаты сопоставления остальных параметров рассматриваемых турбогенераторов приведены в [6]. Там же выполнена оценка влияния числа полюсов машины, числа пазов сердечника статора, аксиальной длины сердечника статора, а также значений индукции магнитного поля в спинке и зубцах сердечника статора на параметры оптимальной поперечной геометрии турбогенераторов.

Ввиду того, что полученные в ходе оптимизации значения D_{1^*m} оказались несколько меньше фактических значений D_{1^*} , возникает необходимость проведения оценки возможности проектирования роторов турбогенераторов с соответствующим уменьшением диаметром активной части их сердечников.

Подводя итоги выполненной научно-исследовательской работы, следует отметить, что составленная расчетная математическая модель турбогенератора позволяет без особых затрат времени расчетчика найти единственное решение обратной задачи проектирования турбогенератора или задачи синтеза. Об этом свидетельствует наличие единственной пары независимых переменных D_{1*} и B_{δ} , при которых функция, описывающая поперечную геометрию турбогенератора, принимает максимальное значение. При этом числовые значения B_{δ} , соответствующие максимуму F_{M*} , находятся в приемлемом и свойственном турбогенераторам диапазоне, а значения D_{1*} , исходя из идеологии применения системы относительных единиц, действительно находятся в диапазоне от 0 до 1. Кроме того, в ходе выполнения математического описания турбогенератора были установлены не совсем очевидные факты, что суммарная площадь обмоточных пазов сердечника статора пропорциональна второй степени его внутреннего диаметра, а электромагнитный момент турбогенератора пропорционален пятой степени наружного диаметра сердечника статора.

Выполненный анализ математической модели показал, что с увеличением числа пар полюсов машины увеличиваются значения D_{1*m} и $B_{\delta m}$. При увеличении значений магнитных индукций в спинке и зубцах сердечника статора значение $B_{\delta m}$ и соответствующее ему значение F_{M*} также возрастают, причем максимальное значение F_{M*} имеет место в четырехполюсных турбогенераторах. Значение D_{1*m} практически не зависит от изменения величин магнитных индукций на участках магнитной цепи сердечника статора. Аксиальная длина сердечника статора и число его пазов практически не оказывают влияния ни на D_{1*m} , ни на $B_{\delta m}$.

Говоря о роторах турбогенераторов, имеющих оптимальную поперечную геометрию статоров, то принципиальная возможность их проектирования подтверждена расчетным путем. Об этом свидетельствуют результаты расчета параметров роторов, приведенные в [7].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытоживая все вышесказанное, следует отметить, что говорить о проектировании оптимального турбогенератора можно только лишь при условии наличия в расчетной методике критерия, относительно которого ведется процесс проектирования машины.

Имея математическую модель генератора и применяя критериальный подход к проектированию, инженер создает машину, которая оказывается оптимальной с точки зрения обеспечения требований к ней, заложенных внутри данного критерия. Говоря о турбогенераторах, необходимо обратить внимание на то, что проведенные в данной области исследования и выполненные расчеты подтверждают достаточность оптимизации поперечной геометрии только для статора, как для основного функционального элемента машины, без учета наличия ротора.

Наружные радиальные размеры сердечника ротора турбогенератора при этом ограничиваются диаметром расточки сердечника статора с учетом величины воздушного зазора и определяются, как и вся поперечная геометрия ротора, главным образом, исходя из соображений обеспечения запаса механической прочности зубцов сердечника ротора при действии на них центробежных сил, в том числе и от обмотки возбуждения через пазовые клинья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. П. Копылов, *Проектирование электрических машин*. М.: Юрайт, 2023. 828 с.
2. М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий, "Краткий исторический обзор технической информации по проектированию турбогенераторов". Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020, №10, с. 79-87.
3. Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская *Проектирование турбогенераторов*. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
4. К. А. Колупицкий, "Оптимизация поперечной геометрии турбогенераторов". Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017, №4, с. 44-49.
5. М. А. Ваганов, И. А. Пименова, «Особенности синхронного неявнополюсного генератора при учете активного сопротивления обмотки статора». Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, №8, с.49-54.
6. М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий, "Анализ математической модели оптимальной продольно-поперечной геометрии турбогенераторов". Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, №4, с. 57-66.
7. М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий, "Проектирование ротора турбогенератора с оптимальной поперечной геометрией статора". Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019, №7, с. 80-87.

АДАПТИВНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

Аннотация: Статья посвящена разработке адаптивной нейронной сети регулятора, позволяющей стабилизировать и управлять подшипниками вращающегося ротора электрической машины. С помощью адаптивного обучения нейронная сеть сможет сама контролировать работу радиальных и осевых магнитов активного магнитного подшипника, препятствуя отклонению ротора от центрального положения. В статье предложен новый метод обучения искусственной нейронной сети в режиме реального времени для контроля динамики ротора с использованием электромагнитных сил. Системы, основанные на контроллере нейронной сети, в настоящее время используются для эффективного решения задач нелинейного управления.

Ключевые слова: магнитный подвес, нейронная сеть, адаптивное обучение

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активные магнитные подшипники (АМП) привлекают все большее внимание из-за их широкого практического применения в таких отраслях, как авиация, энергетика, высокоскоростное машиностроение, медицинская техника, станкостроение, газотранспортный сектор. Магнитные подшипники, используются, когда требуется снижение уровня шума, трения и вибрации [1].

Активные магнитные подшипники – это электромеханические устройства, которые используют магнитные силы для левитации ротора без физического контакта; магнитные силы используются для подвешивания ротора в воздушном зазоре. Системы АМП зависят от положения ротора, где перемещения ротора в системах АМП по своей сути нестабильны, а взаимосвязь между током и электромагнитной силой нелинейна.

В статье исследуется система, использующая обученный нейронной сетью адаптивный контроллер для управления магнитными подшипниками и снижения смещения ротора системы АМП от центрального положения.

II. СИСТЕМА АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРА

Схема для проверки работы АМП показана на рис. 1. Система состоит из вала ротора, магнитного подшипника, соединительного устройства, приводного двигателя и нагрузки.

Система АМП включает в себя усилители мощности в дифференциальном режиме управления и аналого-цифровой преобразователь. Два датчика положения необходимы для измерения смещения ротора от исходного положения по горизонтали и вертикали.

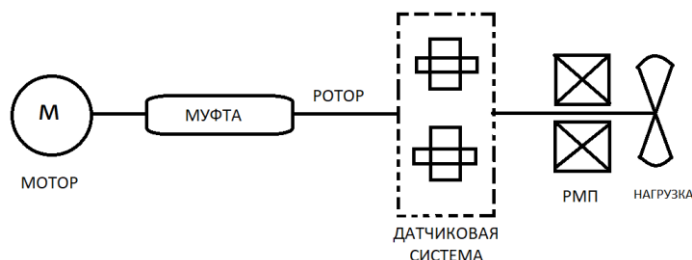


Рис.1. Схема для проверки работы АМП

Аналого-цифровой преобразователь преобразует аналоговый сигнал от датчиков положения в цифровой сигнал. Этот сигнал используется в качестве входного сигнала для нейросетевого регулятора (НСР), который генерирует управляющее воздействие в соответствии с измерениями с использованием усилителей мощности. Управляющие сигналы преобразуются в магнитные силы четырьмя приводными электромагнитами вокруг ротора, которые удерживают ротор в центральном положении.

Как показано на рис. 2, две пары электромагнитных катушек установлены перпендикулярно на *E*-образных статорах и создают перпендикулярные электромагнитные силы притяжения в соответствии с изменением тока в обмотках. Все катушки, установленные в АМП, имеют одинаковое количество витков. На каждые две степени свободы работают два противоположных электромагнита в режиме дифференциального возбуждения [2].

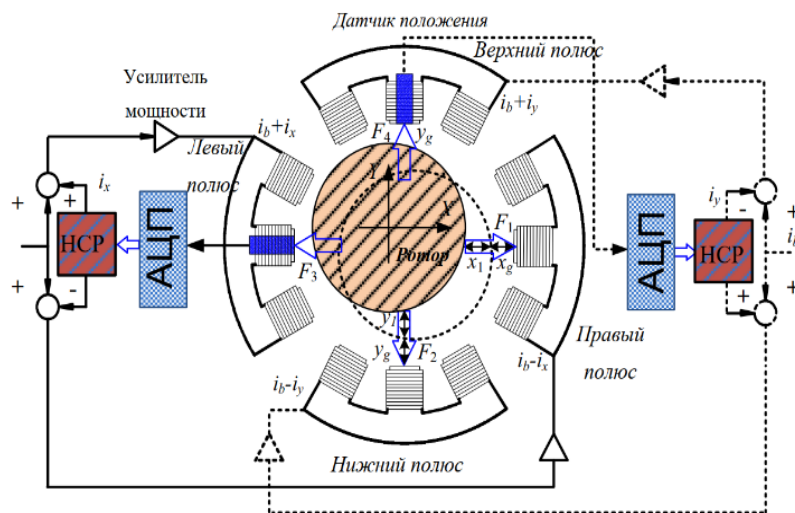


Рис. 2. Схема работы активного магнитного подшипника

В этой конфигурации электромагнитная сила воздействует на ротор в произвольных направлениях вдоль осей X или Y для поддержания ротора в центральном положении. Переменная i_b — это ток смещения; i_{x1} и i_{y1} - управляющие токи в центре вдоль осей X и Y соответственно.

$$F_3 - F_1 = k \left(\frac{(i_b + i_x)^2}{(x_g - x_1)^2} - \frac{(i_b - i_x)^2}{(x_g - x_1)^2} \right) \quad (1)$$

$$F_4 - F_2 = k \left(\frac{(i_b + i_x)^2}{(x_g - x_1)^2} - \frac{(i_b - i_x)^2}{(x_g - x_1)^2} \right) \quad (2)$$

Разложение Тейлора и линеаризация вычисляются с использованием (1) и (2), и может быть получено по оси X следующим образом

$$k_{is} = \left. \frac{\partial F_{x1}(x_1, i_x)}{\partial i_x} \right|_{x_1=0, i_x=0} = \frac{4ki_b}{x_g^2} \quad (3)$$

$$k_{ds} = \left. \frac{\partial F_{x1}(x_1, i_x)}{\partial i_x} \right|_{x_1=0, i_x=0} = \frac{4ki_b^2}{x_g^3} \quad (4)$$

где k_{is} и k_{ds} – положение и текущий параметр жесткости магнитного подшипника соответственно.

В этой системе усилителей катушки по осям X и Y циркулируют с использованием одного и того же тока смещения (i_b). Поскольку номинальные воздушные зазоры по оси X и оси Y также одинаковы, то есть $x_g = y_g$, параметры положения и текущей жесткости k_{is} и k_{ds} , полученные по оси X , одинаковы для оси Y . Дифференциальное уравнение для жесткого ротора с его степенями свободы, преобразованное в координаты подшипника с выводом матрицы перемещений $X_c = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ и входной вектор $u_c = [i_x \ i_y]^T$ вектор управляющего тока. Динамическая модель АМП:

$$M_c \ddot{X}_c + G_c \dot{X}_c + K_{ds} X_c = K_{is} u_c + E f_d + D g \quad (5)$$

где M_c – матрица масс; G_c – гироскопическая матрица; K_{ds} – матрица коэффициентов силы-перемещения; K_{is} – это силовой ток матрица факторов; E – внешний дисбаланс массы; f_d – вектор внешнего возмущения; и D сила тяжести, которая определяется следующим образом

$$M_c = \begin{bmatrix} ml_1/l & ml_2/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J/l & J/l \\ 0 & 0 & ml_1/l & ml_2/l \\ -J/l & J/l & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{is} = \begin{bmatrix} -k_{ip} & 0 \\ -l_2 k_{ip} & 0 \\ 0 & -k_{ip} \\ 0 & l_2 k_{ip} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G_c = \begin{bmatrix} 0 & d_e & 0 & 0 \\ J_z \Omega / l & -(J_z \Omega + l_1 l d_e) / l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_e \\ 0 & 0 & J_z \Omega / l & -(J_z \Omega + l_1 l d_e) / l \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{ds} = \begin{bmatrix} -k_{dp} & s_e & 0 & 0 \\ -l_2 k_{dp} & -l_1 s_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{dp} & s_e \\ 0 & 0 & l_2 k_{dp} & l_1 s_e \end{bmatrix};$$

$$K_{is} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -l_3 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -l_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$f_d = \begin{bmatrix} m_e \varepsilon \Omega^2 \cos \Omega t \\ m_e \varepsilon \Omega^2 \cos \Omega t \end{bmatrix} D = [0 \quad 0 \quad m \quad 0]^T \quad (9)$$

где m – масса вращающегося вала; g – ускорение силы тяжести; J – поперечный момент инерции ротора относительно осей X - Y ; J_z – полярные массовые моменты инерции ротора; m_e – дополнительная масса радиусом ε в направлении Ωt ; l_1 , l_2 и l_3 – расстояние от центра масс до гибкой муфты, магнитного подшипника и внешних возмущений соответственно, при которых $l = l_1 + l_2$; d_e – эквивалентный коэффициент демпфирования; и s_e – эквивалентная жесткость муфты.

Результирующая модель пространства состояний непрерывного времени приведена в координатах пеленга:

$$\dot{x} = Ax + Bu; y = Cx, \quad (10)$$

с

$$x = [v_c \quad \dot{v}_c]^T \text{ и } [u = 0 \quad u_c]^T \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_c^{-1} K_{ds} & M_c^{-1} G_c \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_c^{-1} K_{is} \end{bmatrix}; C = [I \quad 0] \quad (12)$$

где x – вектор состояния, u – входной сигнал управления, y – вектор выхода, A – матрица состояния, B – входная матрица, C – выходная матрица.

III. ОБУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА АДАПТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА

Предлагаемый обученный в режиме онлайн адаптивный НСР был разработан для управления системой АМП, как показано на рис. 3.

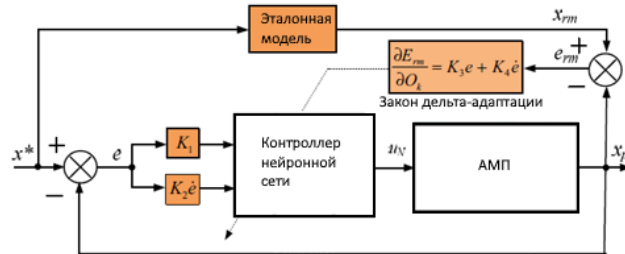


Рис. 3. Схема нейросетевого регулятора

Он состоит из контроллера нейронной сети, эталонной модели и закона дельта-адаптации. Контроллер работает на основе набора данных, основанного на динамических характеристиках АМП; знания об управлении могут быть включены в НСР [3]. Ожидалось, что выходной сигнал смещения ротора системы АМП (x_p) будет иметь тот же опорный входной сигнал (x^*). Оба сигнала сравнивались со сгенерированной ошибкой (e) для получения входных данных НСР. Параметр (u_N) является выходом НСР, и его сигнал управляет катушками системы АМП.

Для реализации предложенного НСР была использована трехслойная структура нейронной сети, показанная на рис. 4. Скрытый и выходной слою содержат несколько блоков обработки с гиперболической функцией касательной.

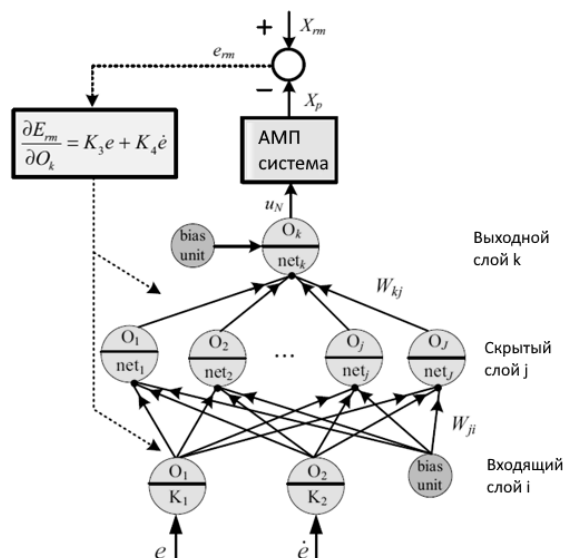


Рис. 4. Принципиальная схема нейросетевого регулятора

Чистый входной сигнал j для узла в скрытом слое вычисляется в соответствии со следующим уравнением:

$$net_j = \sum (W_{ji} \times O_i) + \theta_j \quad (13)$$

Выход узла j

$$O_j = f(net_j) = \tanh(\beta \times net_j) \quad (14)$$

где O_j представляет выход единиц в скрытых слоях, net_j – это суммарный ввод единиц измерения в скрытых слоях, W_{ji} – связующий вес между входными слоями и скрытые слои, $\beta > 0$ – константа, а f обозначает активацию функция, которая является функцией активации гиперболического тангенса:

$$f(net_j) = \frac{2}{1 + e^{-\beta \cdot net_j}} - 1; (-1 < f(net_j) < 1) \quad (15)$$

Вход net в узел k выходного слоя равен

$$net_k = \sum (W_{ki} \times O_i) + \theta_k \quad j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

и соответствующий вывод нейронных сетей

$$O_k = f(net_k) = \tanh(\beta \times net_k) \quad (17)$$

где θ_j и θ_k – пороговые значения для единиц в скрытые слои и выходной слой соответственно. Дифференциал O_j и O_k вычисляются с использованием net_j и net_k соответственно:

$$\frac{\partial O_j}{\partial net_j} = \beta(1 - O_j^2) \quad (18)$$

$$\frac{\partial O_k}{\partial net_k} = \beta(1 - O_k^2) \quad (19)$$

Алгоритм онлайн-обучения предлагаемого НСР, энергетическая функция E определяется как

$$E_N = \frac{1}{2} (X_{rmN} - X_{pN})^2 = \frac{1}{2} e_N^2 \quad (20)$$

где X_{rmN} и X_{pN} представляют собой выходы эталонной модели и объект на N -й итерации соответственно. В пределах каждый интервал от $N - 1$ до N , алгоритм обратного распространения используется для обновления связанных весов в НСР.

Экспериментальная установка этого исследования показана на рис.5. Составленная система магнитного подвеса состоит из синхронного двигателя с постоянными магнитами, статора, двух радиальных подшипников с медной обмоткой, осевого подшипника и вала. Помимо конструктивных элементов для управления используются следующие блоки: блок *Step*, блоки *Scope*, подсистемы для управления приводом СДПМ (синхронный двигатель с постоянными магнитами), блоков *Form* [4].

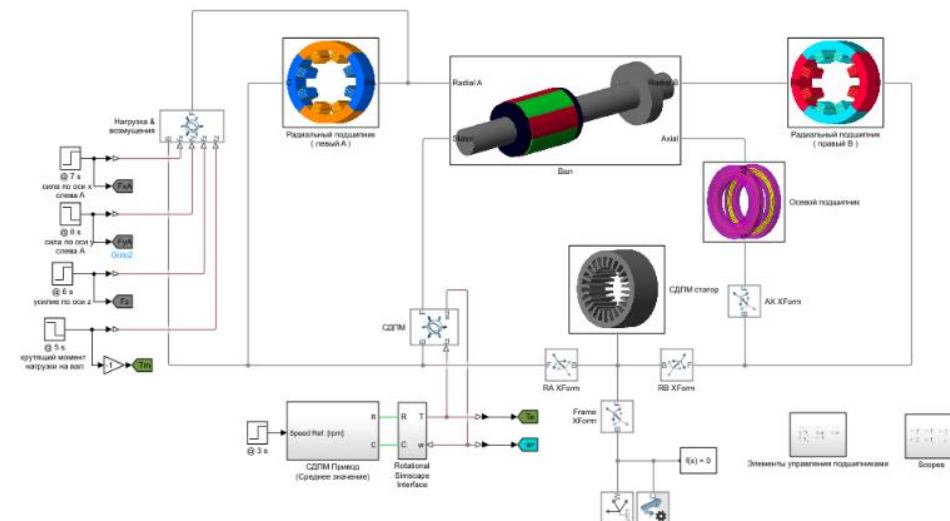


Рис. 5. Экспериментальная установка

Система АМП и онлайн-обученный адаптивный НСР были реализованы с использованием программного обеспечения *Matlab* с параметрами, показанными в таблице 1.

Таблица 1

№	Обозначение	Название	Величина
1	m	Масса вала	2.7
2	x_g	Номинальная длина воздушного зазора	0.5
3	J	Момент инерции ротора о X-Y оси	0.013
4	J_z	Момент инерции, полярный	0.008
5	K_x	Коэффициент смещения силы	34 2478
6	K_i	Фактор силы тока	171
7	i_b	Используемые токи смещения	1.2
8	Ω	Угловая скорость	1500 - 20000
9	l_1	Расстояние от CG до гибкой муфты	0.25
10	l_2	Расстояние от CG до магнитного подшипника	0.12

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение результатов обучения, как показано на рис. 6, показали, что выходной сигнал, полученный из модели, почти соответствует желаемому, и ошибка управления сходилась к нулю (рис. 7)

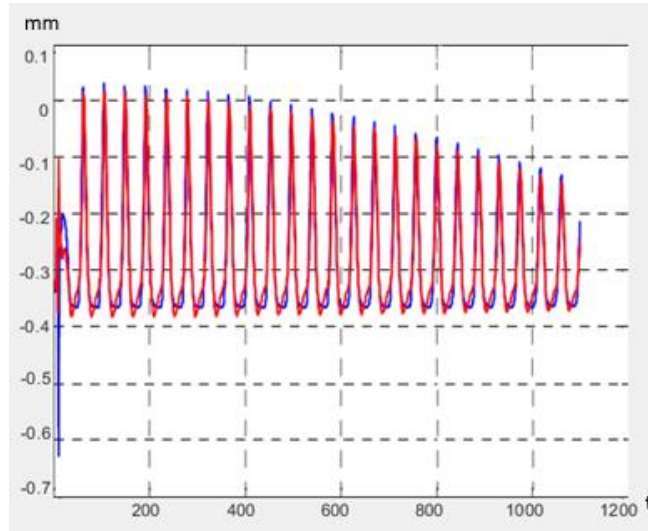


Рис. 6. Желаемый результат и результат моделирования

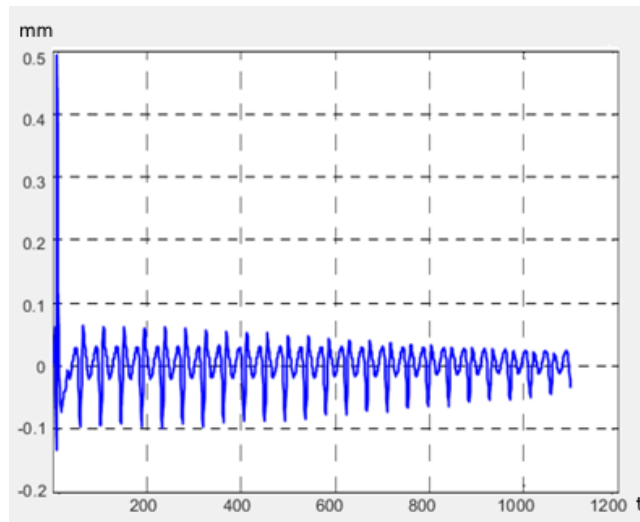


Рис. 7. Ошибка после обучения

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был разработан НСР для регулирования смещения вала для системы АМП. Результаты показали, что обученный в режиме онлайн адаптивный НСР позволил системе АМП достичь более удовлетворительной производительности при различных скоростях вращения ротора и массах дисбаланса. Результаты также показали, что система АМП достигла удовлетворительных динамических и

установившихся характеристик при частоте вращения ротора от 1500 до 20000 об/мин. Предлагаемый способ управления может быть использован в системах АМП, а также в других нелинейных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Журавлев. Активные магнитные подшипники, расчет и применение, Изд.: Политехника 2003 г., 64–89 с., ISBN: 5-7325-0665-1.
2. М. В. Поляков. Определение зоны допустимых перемещений ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом / Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, №4. С. 1005–1014.
3. Д. Л. Ким. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 158–169 с., ISBN 978-5-9221-0857-7J Веб-ресурс: <https://goo.su/6GcZo8>.
4. Д. Р. Ильясов Алгоритмы управления активным магнитным подвесом / «Электротехнические комплексы и системы», том №2 «ВКЭМ 2022».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: В представленной работе численно исследовалось влияние, оказываемое контактными термическими сопротивлениями и анизотропией теплофизических свойств некоторых элементов конструкции на тепловое состояние бесколлекторного двигателя постоянного тока, применяемого в беспилотных летательных аппаратах. Оценка влияния осуществлялась с помощью трехмерного численного моделирования сопряженного теплообмена функционирующего электродвигателя в пакете прикладных программ *STAR-CCM+*. Произведено сравнение результатов двух проведенных расчетов, отличающихся между собой тем, что в одном учитываются механизмы контактного теплообмена и неоднородности теплофизических свойств таких элементов как магнитопровод и обмотка, а в другом нет.

Ключевые слова: термические сопротивления контактов, сопряженный теплообмен, тепловой расчет, трехмерное численное моделирование, *STAR-CCM+*.

I. ВВЕДЕНИЕ

Быстрорастущая тенденция по внедрению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) во всевозможные сферы жизнедеятельности человека и общества, включающие в себя различные экономические отрасли, службы спасения, правоохранительные ведомства и др., с одновременно наблюдающимся повышенным спросом в области развлечений способствует пересмотру устаревших и неэффективных методик и способов проектирования и разработки новых беспилотных летательных аппаратов или отдельных к ним компонентов в современном технологически развивающемся и цифровизирующемся мире.

Значительное внимание уделяется улучшению рабочих характеристик и повышению работоспособности винтомоторной группы (ВМГ), что объясняется ее основополагающей ролью в обеспечении надежного функционирования всей системы БПЛА. В силовых установках БПЛА основными в применении двигателями, особенно в мультироторных системах являются электродвигатели. Довольно часто используются бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ). Их популярность обусловлена имеющимися преимуществами БДПТ в характеристиках и показателях работы, с точки зрения эксплуатации в БПЛА, в число которых входят энергоэффективность, управляемость, надежность и долговечность [1-3].

Существенной и по сей день проблемой, проявляющейся практически в любом разрабатываемом электродвигателе, является риск перегрева и сопутствующего выхода из рабочего диапазона температур, закладываемого при проектировании электромашины. Перегревание электродвигателя с достижением недопустимых температур для его компонентов негативно влияет на работоспособность и, следовательно, ухудшает заложенные в нем характеристики и выходные показатели работы, вплоть до возникновения неисправностей и выхода устройства из строя. К основным средствам по борьбе с данной угрозой относят использование более эффективных систем охлаждения, разрабатываемых часто под каждый конкретный двигатель, и проектирование электродвигателей с сохранением существенных запасов по прочности и другим показателям, а также введением ограничений по интенсивности электромагнитных явлений [4, 5]. Часто применяемые для борьбы с перегревом решения являются необоснованными и препятствуют полной реализации всего имеющегося потенциала электромашины для БПЛА.

Высокоточное моделирование и адекватные расчеты теплового состояния функционирующего электродвигателя позволяют рационализировать способы решения проблемы перегрева и повысить степень использования закладываемого потенциала в разрабатываемое техническое изделие.

Точность прогнозирования теплового состояния электродвигателя в значительной степени зависит от реалистичности в оценках контактного теплообмена, происходящего между контактирующими поверхностями сопряженных компонентов конструкции внутри электромашины. Контактные термические сопротивления, количественно характеризующие теплообмен между элементами, возникают из-за различных дефектов и неровностей соприкасающихся поверхностей, что препятствует обеспечению идеального сопряжения.

В представленной статье исследуется влияние, оказываемое контактными термическими сопротивлениями и анизотропией теплофизических свойств некоторых компонентов исследуемого БДПТ на тепловое состояние электродвигателя и специфику распределения в нем температур, определяемое с помощью трехмерного численного моделирования сопряженного теплопереноса происходящего во время его работы.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Точность прогнозирования поведения работающего электродвигателя зависит от эффективности имеющегося в распоряжении инженерного инструментария, включающего в себя различные методы и способы расчета параметров и величин, протекающих в нем

процессов, а также их характерность. При выборе расчетной методики ориентируются в первую очередь на ее способность точно описывать интересующие физические явления с целью последующего получения адекватных результатов, сопоставляемых с реальностью, с учетом возможных временных и ресурсных трудозатрат на выполнение расчетных и вычислительных операций при применении методики. Необходимо иметь в виду, что в каждом расчетном способе имеются определённые допущения и упрощения, создающие некоторый диапазон неопределенности, с точки зрения верности получаемого решения, другими словами, существует определенная погрешность метода, которую необходимо учитывать. В связи с этим, обычно рассматривается худший из возможных сценариев, с целью сокращения рисков возникновения проблемных ситуаций, что опять же не способствует снятию или уменьшению ограничений при проектировании технического объекта, в особенности с принципами работы, основанными на междисциплинарном взаимодействии с многокритериальными зависимостями рабочих показателей. К такому объекту относится исследуемый в представленной статье электродвигатель. Следовательно, с уменьшением погрешности применяемого расчетного метода, повышается степень использования закладываемого в разрабатываемое техническое изделие потенциала.

Для количественной оценки влияния, оказываемого контактными термическими сопротивлениями и анизотропией теплофизических свойств некоторых элементов конструкции на тепловое состояние бесколлекторного двигателя постоянного тока, применяемого в беспилотных летательных аппаратах, проведено два расчета, отличающихся между собой тем, что в одном учитываются механизмы контактного теплообмена и неоднородности теплофизических свойств таких элементов как магнитопровод и обмотка, а в другом нет. Следовательно расчет, где не учитываются перечисленные особенности упрощенный, выполняемый с меньшими трудозатратами. Сравнение результатов этих расчетов позволит выяснить стоит ли увеличивать трудозатраты на проведение расчета, для учета дополнительных явлений.

III. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В программном комплексе *STAR-CCM+* было проведено численное исследование установившегося сопряженного теплообмена функционирующего электродвигателя с окружающей воздушной средой, осуществляемого посредством конвекции. Моделирование, осуществляемое решением систем дифференциальных уравнений в частных производных, производилось в трехмерной постановке с использованием

методики расчета уравнений сохранения, основанной на решении системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (*RANS*) методом конечных объемов с неявной схемой интегрирования. Модель идеального газа использовалась в уравнении состояния. Для замыкания *RANS* была применена модель турбулентности *Realizable TwoLayer K-Epsilon*, которая предлагает хороший баланс между точностью и надежностью [6-9].

Закон Сазерленда для коэффициента теплопроводности среды равен:

$$\lambda_c = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T_0+S}{T+S}\right) \cdot \lambda_{c0} \quad (1)$$

где T_0 – опорная температура;

λ_{c0} – опорный коэффициент теплопроводности среды;

S – постоянная Сазерленда;

Закон Сазерленда коэффициента для динамической вязкости среды равен:

$$\mu_c = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T_0+S}{T+S}\right) \cdot \mu_{c0} \quad (2)$$

где μ_{c0} – опорный коэффициент динамической вязкости среды;

Удельная теплоемкость воздуха задается зависимой от температуры среды с помощью полинома.

IV. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Контактный теплообмен представляет собой процесс передачи тепла через стык соприкасающихся элементов тепловой системы посредством теплопроводности. Примером таких сопряженных элементов являются магнитопровод и станина, подшипник и вал, втулка и крышка и т. д. [4].

Удельное термическое сопротивление контакта равно

$$R_k = \frac{1}{\Lambda_k} = \frac{1}{\Lambda_m + \Lambda_c} = \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_c}} \quad (3)$$

где R_m, R_c - удельные термические сопротивления пятен реального контакта, прослоек среды;

$\Lambda_k, \Lambda_m, \Lambda_c$ - удельные термические проводимости контакта, по металлу, по межконтактной среде.

Удельное термическое сопротивление прослоек среды, вычисляется по коэффициенту теплопроводности среды, в связи с возможностью не учитывать теплопередачу через излучение и конвекцию в зазорах из-за ее незначительной доли, в сравнении с кондуктивным теплообменом, и равно

$$R_c = \frac{\delta_{\text{ЭКВ}}}{\lambda_c} = \frac{(R_{z1} + R_{z2}) \cdot (1 - m)}{\lambda_c} \quad (4)$$

где $\delta_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентная толщина прослойки;

$\bar{\lambda}_c$ - коэффициент теплопроводности среды;

R_{z1} и R_{z2} - средние высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей элементов;

$1 - m$ - коэффициент заполнения профиля микронеровностей, определяемый по эмпирической зависимости, представленной в виде кривой на рисунке в [4, 5].

При наличии сплошного зазора между сопрягаемыми элементами R_k вычисляется без проводимости по металлу по изменённой (4), с добавлением к ней дополнительного члена, учитывающего термическое сопротивление сплошного слоя среды, содержащийся в зазоре.

$$R_k = \frac{\delta_{\text{ЭКВ}} + \delta_c}{\lambda_c} = \frac{(R_{z1} + R_{z2}) \cdot (1 - m) + \delta_c}{\lambda_c} \quad (5)$$

где δ_c - толщина сплошного слоя среды;

Удельное термическое сопротивление пятен реального контакта определяется как

$$R_M = \frac{\pi \cdot r_a}{2 \cdot \bar{\lambda}_M \cdot \left(\frac{B \cdot p}{E}\right)^{0.8}} \quad (6)$$

где p - контактное давление;

$\bar{\lambda}_M$ - приведенный коэффициент теплопроводности;

\bar{E} - приведенный модуль упругости первого рода;

r_a - радиус пятен касания сопрягаемых поверхностей, диапазон значений которого заложен в номограмме в [4, 5], средняя величина равна около 35 мкм;

B - коэффициент, зависящий от суммы средних высот микронеровностей сопрягаемых поверхностей, численные значения которого изображены графиком функции на рисунке в [4, 5].

Использование приведенного значения модуля упругости, объясняется частым различием материалов, из которых состоят контактирующие элементы конструкции электродвигателя, а рассчитывается он по выражению

$$\bar{E} = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (7)$$

где E_1 и E_2 - модули Юнга материалов сопрягаемых элементов.

Данный факт относится точно так же и к подстановке в (6) приведенного коэффициента теплопроводности, вычисляемого как

$$\bar{\lambda}_M = \frac{2 \cdot \lambda_{M1} \cdot \lambda_{M2}}{\lambda_{M1} + \lambda_{M2}} \quad (8)$$

где λ_{M1} и λ_{M2} - коэффициенты теплопроводности материалов сопрягаемых элементов.

При сопряжении элементов посредством посадки с натягом контактное давление вычисляется с помощью решения задачи Ляме для толстостенных полых сопряженных цилиндров, один из которых охватывает другой [4].

$$p = \frac{\Delta_d / D_c}{\frac{1}{E_2} \left[\frac{(D_{вш2}/D_c)^2 + 1}{(D_{вш2}/D_c)^2 - 1} + \mu_2 \right] + \frac{1}{E_1} \left[\frac{1 + (D_{вт1}/D_c)^2}{1 - (D_{вт1}/D_c)^2} - \mu_1 \right]} \quad (9)$$

где Δ_d - действительный натяг;

D_c - диаметр стыка элементов;

μ_1 и μ_2 - коэффициенты Пуассона материалов внутреннего и наружного элементов;

E_1 и E_2 - модули Юнга материалов внутреннего и наружного элементов;

$D_{вт1}$ - внутренний диаметр внутреннего элемента;

$D_{вш2}$ - внешний диаметр наружного элемента.

Действительный натяг зависит прежде всего от теплового состояния сопряженных элементов и свойств материалов, из которых они изготовлены вследствие возникновения в них термических деформаций, Δ_d отличается от начального натяга температурным фактором, зависящим от множества параметров и переменных, интенсивность которого меняется и от режима работы электродвигателя, также имеются различия из-за смятия микронеровностей при посадке, которые учитываются применением среднего расчетного значения натяга в расчете вместо среднего табличного [4]. Рассчитывается действительный натяг как

$$\Delta_d = \Delta_{cp} + D_c \cdot (\alpha_{T1} \cdot T_1 - \alpha_{T2} \cdot T_2) \quad (10)$$

где Δ_{cp} - средний расчетный натяг;

α_{T1} и α_{T2} - коэффициенты линейного термического расширения материалов внутреннего и наружного элементов;

T_1 и T_2 - средние температуры внутреннего и наружного элементов.

При ликвидации натяга и возникновении раскрытия стыка сопряженных элементов, обусловленного отрицательным значением Δ_d , которое тем самым обозначает величину образованного зазора в процессе работы электродвигателя. В этом случае удельное термическое сопротивление контакта высчитывается схоже с (5) и равно

$$R_k = \frac{(R_{z1} + R_{z2}) \cdot (1 - m) + |\Delta_d|}{\lambda_c} \quad (11)$$

Термическое контактное сопротивление зависит и одновременно влияет на тепловое состояние сопрягающихся элементов и конструкции в целом, то есть между ними существует взаимовлияние. Учитывая имеющуюся связь адекватные конечные результаты моделирования могут быть получены только при совместном и одновременном решении итерационными методами задачи сопряженного теплообмена в электродвигателе и уравнений для расчета значений термических сопротивлений контактов как единой системы. Такой подход применялся в представленной работе при проведении численного трехмерного моделирования.

В случаях, когда сопряжение элементов конструкции реализуется за счет посадок, необходимо учитывать тепловые деформации элементов возникающие за счет свойства конструкционных материалов расширяться при нагреве с сопутствующем увеличением их температуры. Данная способность характеризуется коэффициентом линейного термического расширения материалов, из которых изготавливаются элементы. Основное влияние, оказываемое тепловым расширением на контактное термическое сопротивление соединений с посадкой, является изменение значения действительного натяга при варианте посадки с натягом и изменение значения зазора при варианте посадки с зазором. Интенсивность изменения связана с величиной различия в значениях коэффициентов линейного термического расширения материалов внутреннего и наружного элементов, величиной различия в их средних температурах, а также величиной диаметра стыка элементов. Связь перечисленных факторов описана в функциональной зависимости (10). К тому же существует вероятность перехода посадки из одного типа в другой, к примеру посадка с натягом может трансформироваться в посадку с зазором при большом коэффициенте линейного термического расширения наружного элемента, что может привести к

раскрытию стыка элементов и потере термической проводимости по металлу через пятна реального контакта. Следовательно, это повлечет за собой изменение термического сопротивления контакта и подхода к его вычислению. Все описанные выше особенности создают нелинейности в тепловых процессах, протекающих в электродвигателе во время его работы и значительным образом влияют на его тепловое состояние. Для учета в численном трехмерном моделировании влияния теплового расширения на удельное термическое сопротивление контакта образованного с помощью посадки создается связь, в которой рассчитываемые в процессе итерационного расчета температуры сопряженных элементов усредняются по их объемам и передаются в (10), которая внедрена вместе с другими автоматически подключающимися и подходящими выражениями в интерфейс для расчета термических сопротивлений для конкретного случая, процесс повторяется до нахождения установившегося и сходящегося решения.

Под интерфейсом, имитирующим зону контакта между областями в тепловом трехмерном расчете, понимается контактная поверхность, состоящая из пары совпавших границ областей (доменов), входящих в расчетную область и описывающих соприкасающиеся элементы, объёмы которых дискретизированы по пространству на конечное число элементов (ячеек) в трехмерной расчетной модели. Основной функцией интерфейсов является обеспечение связи между областями с осуществлением передачи массы, импульса, энергии и других непрерывных величин из одной области в другую [6-9].

Для учета механизмов контактного теплообмена и его особенностей между элементами конструкции при моделировании сопряженной теплопередачи в электродвигателе в интерфейсах между контактирующими элементами вносится алгоритм расчета значений удельных термических сопротивлений контактов представленный на рис. 1 и содержащий функциональные зависимости от перечисленных выше факторов и условия их применения,

Важной особенностью в случаях, когда в качестве вещества среды, содержащейся в щелях и зазорах, образованных между неровностями сопрягающихся поверхностей, при контактном взаимодействии элементов электродвигателя выступает воздух, является изменение его физических свойств в зависимости от температуры. Следовательно, изменение значения теплопроводности воздуха приводит к изменению

термического сопротивления контакта, создавая при этом дополнительную нелинейность в процессах теплообмена, которую необходимо учитывать при проведении численного моделирования. Также стоит иметь в виду, что величина теплопроводности воздуха распределяется в зоне контакта элементов неоднородно из-за имеющихся различий локальных температур среды вследствие неодинаковой температуры соприкасающихся поверхностей элементов, нагревающих прослойки воздуха с различной локальной интенсивностью.

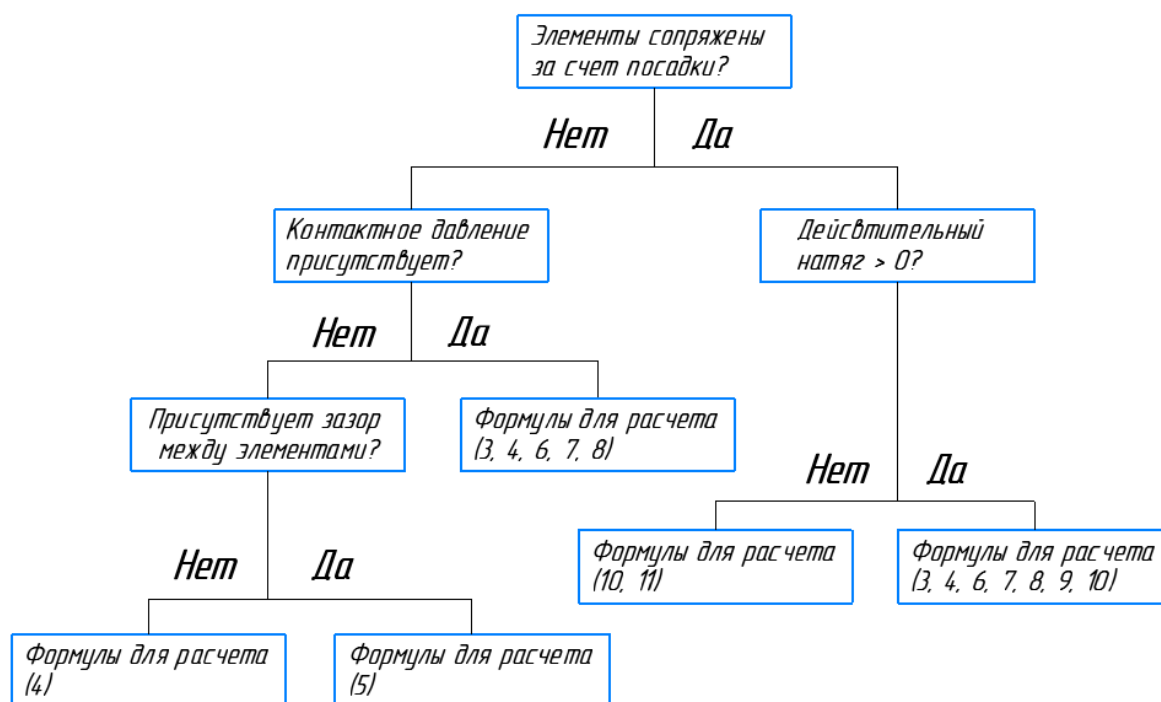


Рис. 1. Алгоритм расчета удельных термических сопротивлений контактов, закладываемый в интерфейс

Для расчета коэффициентов теплопроводности воздуха, неоднородно распределенных в зоне контакта и последующего определения распределения и интенсивности удельного термического сопротивления контакта используется закон Сазерленда и подставляемая в него локальная температура интерфейса, вычисляемая арифметическим усреднением значений локальных температур соприкасающихся поверхностей.

V. ОБЪЕКТ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены продольный и поперечный разрезы сборки из твердотельных 3D моделей элементов, исследуемого электродвигателя созданных в САД-программе SolidWorks с обозначением номерами элементов конструкции.

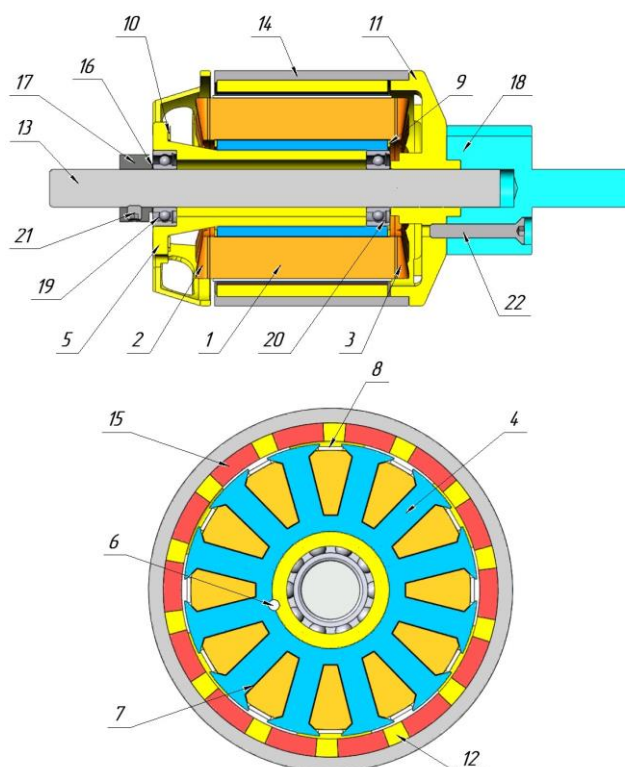


Рис. 2. Продольный и поперечный разрез 3D моделей сборки исследуемого электродвигателя.

В таблице 1 представлен список элементов, входящих в конструкцию исследуемого электродвигателя с приведением материалов, из которых они состоят и назначенного каждому элементу номера.

Таблица 1

Список элементов входящих в электродвигатель

№	Название элемента	Материал элемента
1	Пазовая часть обмотки	Медь
2	Лобовая часть обмотки 1	Медь
3	Лобовая часть обмотки 2	Медь
4	Магнитопровод шихтованный	Сталь 2421
5	Станина	Д16
6	Штифт	Сталь 40Х
7	Пазовая изоляция магнитопровода	Полиимидная пленка
8	Клинья статора	Стеклотекстолит
9	Торцевая изоляция магнитопровода	Стеклотекстолит
10	Изоляционная прокладка	Стеклотекстолит
11	Крышка	Д16
12	Клинья ротора	Смола ANYCUBIC
13	Вал	12Х18Н10Т

№	Название элемента	Материал элемента
14	Втулка	Сталь 30ХГСА
15	Постоянные магниты	N45UH
16	Шайбы	Сталь 10
17	Подшипниковый щит	Д16
18	Цанга	Д16
19	Подшипник 1	Сталь ШХ 15
20	Подшипник 2	Сталь ШХ 15
21	Винты установочные	Сталь 40Х
22	Винты	Сталь 40Х

В таблице 2 представлены свойства материалов, из которых состоят элементы конструкции электродвигателя, необходимые для проведения тепловых расчетов.

Таблица 2

Свойства применяемых материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·С)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·С)
Медь	8933	401	385
Сталь 2421	7650	46	613
Д16	2770	130	922
Сталь 30ХГСА	7850	38	496
12Х18Н10Т	7920	15	462
N45UH	7650	8.7	470
Сталь 10	7856	57	494
Смола ANYCUBIC	1184	0.3	1500
Стеклотекстолит	1800	0.35	1250
Полиимидная пленка	1430	0.35	1130
Сталь ШХ 15	7812	40	505
Сталь 40Х	7820	46	466

Значения коэффициентов линейного термического расширения, коэффициентов Пуассона, модулей Юнга, коэффициентов теплопроводности, плотностей, удельных теплоемкостей материалов элементов конструкции электродвигателя применяемые как входные данные для проводимого трехмерного численного моделирования и для расчета термических сопротивлений контактирующих элементов были приняты постоянными и независимыми от температуры и других факторов.

Для более экономичного использования имеющихся вычислительных ресурсов и уменьшения трудоемкости в подготовке и настройке расчетной модели были выполнены операции по изменению и упрощению твердотельных трехмерных моделей элементов БДПТ, без значительного влияния на исследуемые процессы и явления, а именно замена резьбы на гладкие цилиндрические поверхности в резьбовых соединениях, упрощение подшипников качения и другие операции.

Также в связи со сложностью создания точных трехмерных моделей обмотки, а точнее ее пазовых и лобовых частей, явно повторяющих намотку проводника на пазы магнитопровода были выполнены упрощённые твердотельные 3D модели в виде цельных тел с повторением форм и объемов обмотки, но без имитации тела провода и структуры намотки.

Магнитопровод шихтованный был упрощен и выполнен в виде цельной единой твердотельной 3D модели с невключением изоляционных слоев в модель.

В расчете №1 являющимся упрощенным теплофизические свойства обмотки и шихтованного магнитопровода приняты изотропными, что является значительным допущением, учитывая неоднородности в их структуре и наличие нескольких материалов в составе.

В расчете №2 учитывается анизотропия коэффициентов теплопроводности шихтованного магнитопровода и обмотки, применением трансверсально изотропного метода распределения коэффициентов теплопроводности в объеме материалов. Так в шихтованном магнитопроводе коэффициенты теплопроводности в плоскости изотропии и в направлении оси перпендикулярной этой плоскости равны соответственно 46 и 1 Вт/(м·С). В пазовых и лобовых частях обмотки коэффициенты теплопроводности в плоскости изотропии и в направлении оси перпендикулярной этой плоскости равны соответственно 0.9749 и 249.6 Вт/(м·С). Данные значения были получены предварительным расчетом параметров обмотки и магнитопровода в ANSYS Motor-CAD.

VI. СЕТОЧНАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 3 изображена сеточная модель исследуемого электродвигателя с окружающей средой в последующем, заполняемой воздухом, которая использовалась в каждом из двух проведенных трехмерных расчетов.

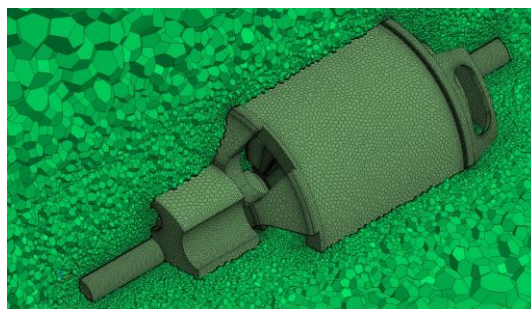


Рис. 3. Сеточная модель электродвигателя и окружающей среды в виде продольных сечений сетки

В таблице 3 показаны основные характеристики расчетной сеточной модели, включающие важные показатели для CFD расчетов, связанные с дискретизацией пограничных слоев. Также для адекватного моделирования течений вблизи поверхностей элементов электродвигателя были выполнены условия, при которых безразмерный коэффициент y^+ не превышал единицу [6-9].

Таблица 3

Характеристики расчетной сеточной модели

Характеристики сеточной модели	Применяемая сеточная модель
Структура	Нерегулярная
Согласованность	Конформная
Форма элементов	Полиэдральная и призматическая
Количество элементов, шт.	7981090
Количество вершин, шт.	33641669
Количество внутренних элементов, шт.	40981050
Число призматических слоев вблизи стенок, шт.	7
Общая толщина призматических слоев, мм.	0.4 – 0.5
Количество элементов в областях газообразной среды, шт.	4358167
Количество элементов в компонентах конструкции, шт.	3622923

VII. ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Расположение и тип используемых в сопряженных расчетах граничных условий, относящихся к сплошной текучей среде, заполняющей все пространство внутри и снаружи конструкции электродвигателя указаны на рисунке 4. Веществом текучей среды в расчетах является воздух.

Граничному условию обозначенному на рис. как скорость на входе соответствуют следующие параметры в расчетах: амплитуда скорости потока – 0.5 м/с статическая температура – 300 К. Направление скорости устремлено в сторону границы, обозначенной на рис 4. как давление на выходе и перпендикулярно ей.

Давлению на выходе соответствуют следующие параметры в расчетах: абсолютное статическое давление – 101325 Па, статическая температура – 300 К.

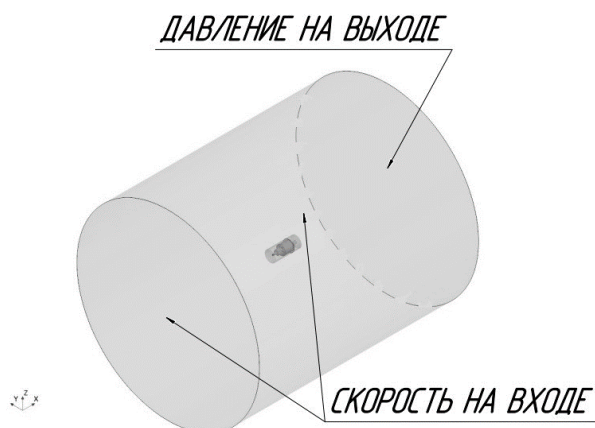


Рис. 4. Расположение и тип граничных условий, применяемых в расчетах сопряженного теплообмена в электродвигателе

Частота вращения ротора электродвигателя, заданная в расчетах, соответствует значению в 5000 об/мин. Вращение осуществляется методом *MRF* (*Moving Reference Frame*).

Основными преимуществами данного метода являются небольшие вычислительные затраты, возможность моделирования вращения без деформации сеточной модели, что позволяет использовать стационарный подход [10].

Необходимо отметить, что метод *MRF* не учитывает относительное движение подвижной области по отношению к смежным областям (которые могут быть как движущимися, так и стационарными). В данном подходе сетка остается неизменной для расчетов. Это похоже на ситуацию, когда движущаяся деталь замораживается в определенном положении, и мгновенное поле потока рассматривается только в этом положении. Поэтому метод *MRF* часто называют "методом с замороженным ротором" [6, 7].

Источниками тепла являются электромагнитные потери энергии в электродвигателе преобразующиеся в тепловую энергию, которая рассеивается в объеме входящих в его конструкцию компонентов, где и возникают потери. Основные потери включают в себя потери в проводнике постоянного и переменного токов в

обмотках, на вихревые токи, на гистерезис, в постоянных магнитах. В таблице 4 представлена интенсивность тепловыделения источников тепла. Потери в электродвигателе рассчитаны с помощью программного комплекса ANSYS Motor-CAD при предполагаемой температуре электродвигателя равной 80 С.

Таблица 4

Интенсивность тепловыделения источников тепла

Источники тепла в электродвигателе	Мощность тепловыделения источника тепла, Вт
Пазовая часть обмотки	10
Лобовая часть обмотки 1	1
Лобовая часть обмотки 2	1
Магнитопровод шихтованный	12.5
Втулка	10.5
Постоянные магниты	3.5
Все источники тепла	38.5

При проведении трехмерного моделирования тепловыделение распределяется по всему объему источника тепла равномерно, что является допущением, так как распределение и интенсивность электромагнитных потерь зависит от величины магнитной индукции и от рассматриваемого момента времени. Таким образом, в расчетную модель закладываются именно интегральные величины рассчитанных потерь. Также величина электромагнитных потерь и соответствующие им значения мощностей источников тепла задаются постоянными, и не зависящими от температуры элементов конструкции где в основном и образуются эти потери, что также является допущением, учитывая непосредственное влияние температуры на свойство материалов из которых состоят элементы электродвигателя, оказывая тем самым воздействия уже на его работу и на протекающие в нем электромагнитные явления, а следовательно и на потери. Механические потери в подшипниках качения в тепловом расчете не учитывались.

VIII. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 5 изображено распределение в продольном сечении установившихся по времени величин скоростей воздуха, окружающего исследуемый электродвигатель, для расчета №1 и №2 изменения в распределении и интенсивности незначительны.

На рисунках 6-10 представлены результаты численного моделирования в расчете

№1 в виде скалярных полей распределения температуры электродвигателя и окружающего его воздуха в различных положениях, векторных полей распределения скоростей воздушной среды в сечениях расчетной области.

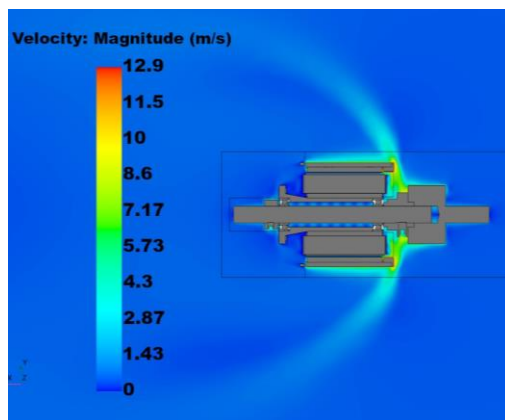


Рис. 5. Скалярное поле скорости окружающего электродвигатель воздуха в сечении по результатам моделирования

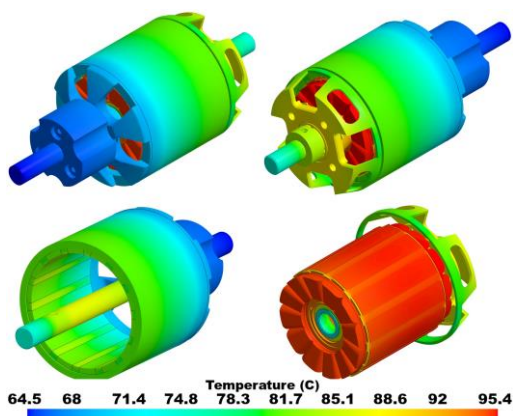


Рис. 6. Тепловое состояние электродвигателя в двух видах сверху, ротора и статора по отдельности снизу по результатам расчета №1

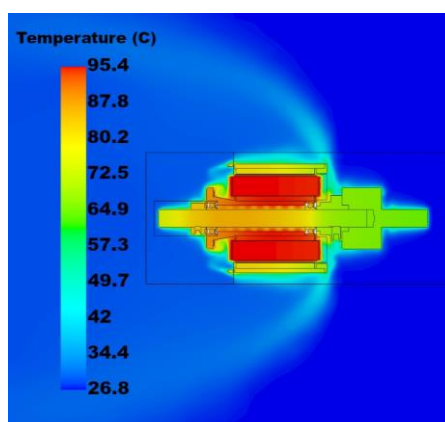


Рис. 7. Тепловое состояние электродвигателя и окружающего воздуха в сечении по результатам расчета №1

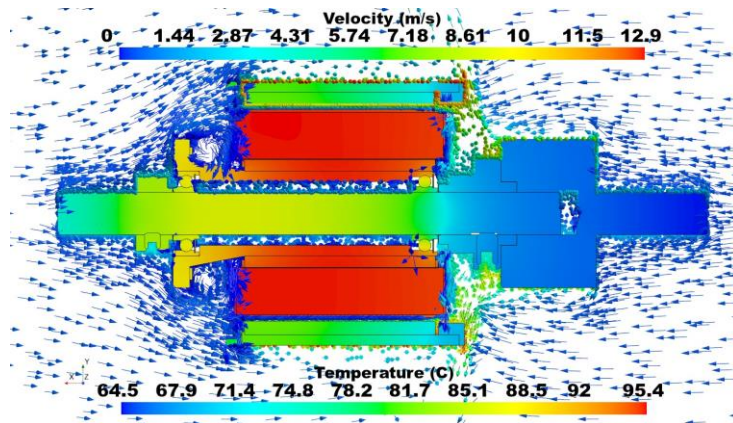


Рис. 8. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в сечении по результатам расчета №1

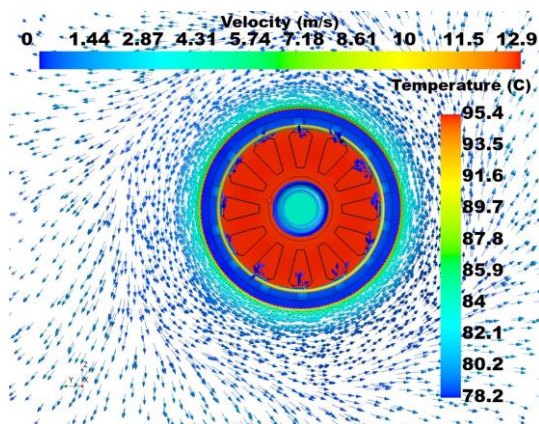


Рис. 9. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в поперечном сечении по результатам расчета №1

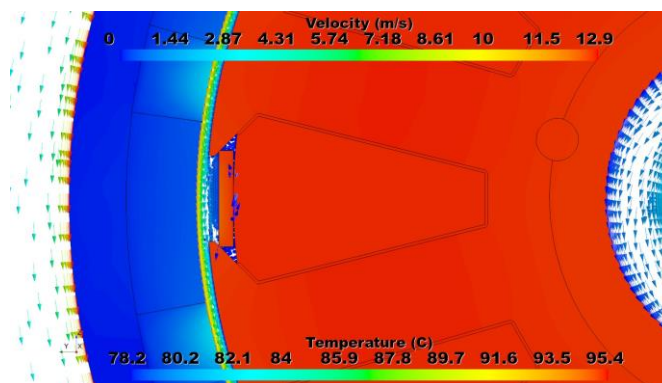


Рис. 10. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в поперечном сечении, вблизи воздушного зазора по результатам расчета №1

На рисунках 11-15 представлены результаты численного моделирования в расчете №2 в виде скалярных полей распределения температуры электродвигателя и окружающего его воздуха в различных положениях, векторных полей распределения скоростей воздушной среды в сечениях расчетной области.

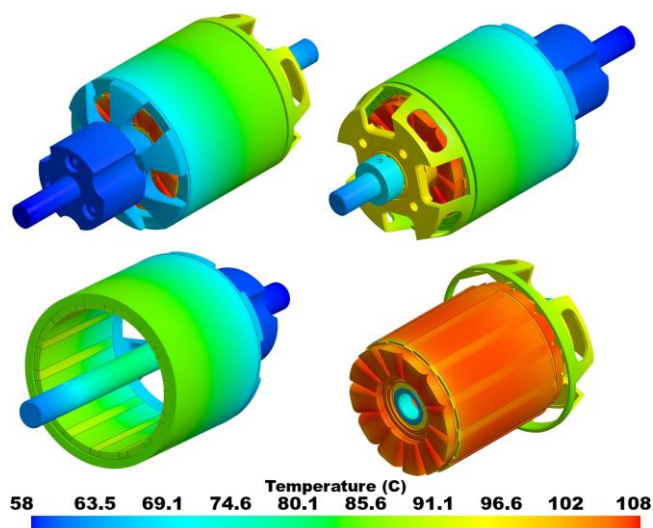


Рис. 11. Тепловое состояние электродвигателя в двух видах сверху, ротора и статора по отдельности снизу по результатам расчета №2

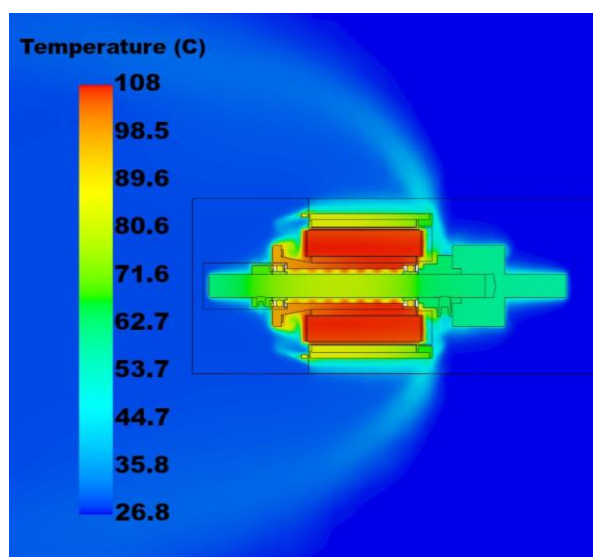


Рис. 12. Тепловое состояние электродвигателя и окружающего воздуха в сечении по результатам расчета №2

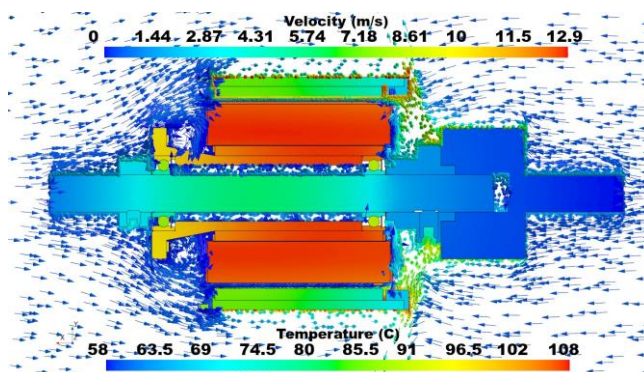


Рис. 13. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в сечении по результатам расчета №2

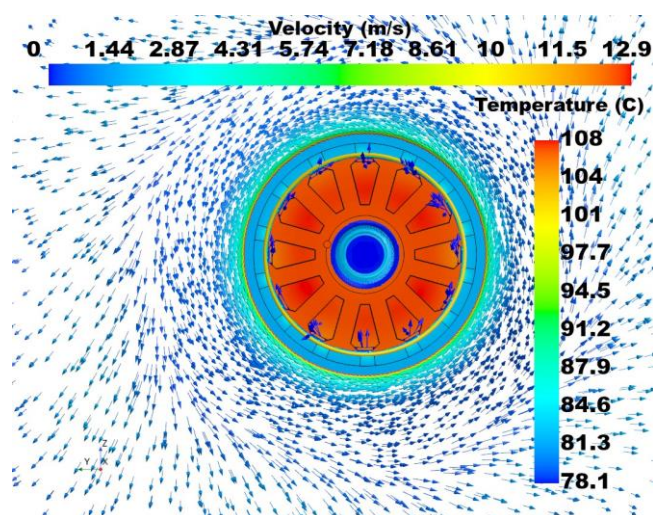


Рис. 14. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в поперечном сечении по результатам расчета №2

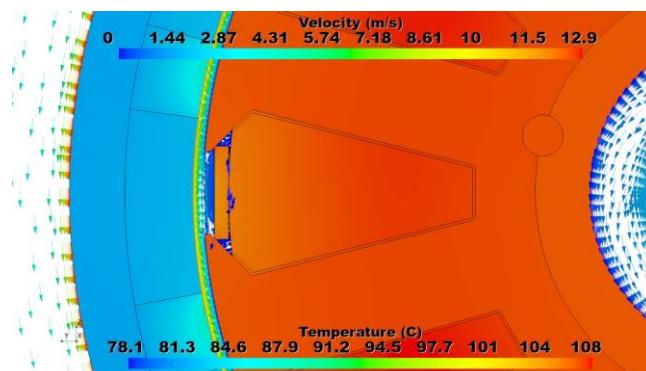


Рис. 15. Тепловое состояние электродвигателя и векторное поле скорости окружающего воздуха в поперечном сечении, вблизи воздушного зазора по результатам расчета №2

В таблице 5 продемонстрированы результаты проведенных трехмерных расчетов в виде средних, максимальных и минимальных температур для всех включенных в численное исследование элементов конструкции электродвигателя.

Таблица 5

Результаты трехмерного моделирования

Номер элемента	Расчет №1			Расчет №2		
	<i>T</i> _{сред.} , °C	<i>T</i> _{макс.} , °C	<i>T</i> _{мин.} , °C	<i>T</i> _{сред.} , °C	<i>T</i> _{макс.} , °C	<i>T</i> _{мин.} , °C
1	95.20	95.37	94.81	106.70	107.65	101.61
2	95.34	95.37	95.26	106.62	107.66	102.85
3	94.84	94.89	94.71	105.60	107.43	100.89
4	95.02	95.36	92.59	106.03	106.92	101.44
5	90.31	95.20	78.59	99.57	106.66	85.41
6	94.91	95.22	94.24	106.62	106.64	106.51

Номер элемента	Расчет №1			Расчет №2		
	<i>T</i> _{сред.} , °C	<i>T</i> _{макс.} , °C	<i>T</i> _{мин.} , °C	<i>T</i> _{сред.} , °C	<i>T</i> _{макс.} , °C	<i>T</i> _{мин.} , °C
7	95.14	95.37	93.69	106.54	107.40	102.18
8	94.85	95.37	84.58	105.36	106.91	89.91
9	94.58	95.37	82.62	104.83	107.26	87.05
10	88.06	88.89	84.63	96.35	97.36	91.85
11	68.24	71.90	66.87	64.67	67.65	61.98
12	78.93	84.30	70.43	83.08	90.16	72.14
13	79.17	86.36	66.29	70.88	80.07	60.69
14	77.09	81.17	68.61	80.22	85.29	68.97
15	78.33	81.84	70.54	81.92	86.31	72.89
16	77.92	84.40	71.02	68.23	71.66	64.78
17	83.66	84.25	83.26	68.96	69.13	68.86
18	66.25	67.24	64.53	59.43	60.30	58.03
19	87.74	90.13	84.22	88.950	97.36	75.17
20	87.61	94.43	71.80	92.16	104.96	72.08
21	71.15	83.83	67.03	64.18	69.20	62.75
22	66.55	67.70	65.93	59.81	61.18	58.65

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного трехмерного численного моделирования сопряженного теплообмена работающего электродвигателя БДПТ для БПЛА и окружающего его воздуха посредством конвективной теплопередачи было выявлено существенное влияние, оказываемое термическими контактными сопротивлениями и анизотропией коэффициентов теплопроводности обмотки и магнитопровода на тепловое состояние электромашины при их соответственном внедрении и учете в трехмерном расчете.

Изменение теплового состояния электродвигателя, выявленное путем сравнения с упрощенным тепловым трехмерным расчетом без учета в нем механизмов контактного теплообмена и неоднородностей теплофизических свойств таких основополагающих элементов как магнитопровод и обмотка проявляется в перераспределении тепловых потоков, значительном увеличении температур некоторых элементов конструкции с сопутствующем повышением рисков перегрева БДПТ.

Результаты математического моделирования показали, что средняя по объему температура магнитопровода, обмотки, станины, втулки, постоянных магнитов

повысилась на 11.6%, 12.1%, 10.3%, 4.1%, 4.6%, соответственно, а средняя по объему температура крышки, вала, цанги, подшипникового щита, винтов установочных соответственно понизилась на 5.2%, 10.5%, 10.3%, 17.6%, 9.8%.

Диапазон рассчитанных температур всего электродвигателя расширился в обе стороны, максимальная температура поднялась на 12.9%, минимальная температура опустилась на 10.1%.

Полученные данные свидетельствуют о том, что для ответственных расчетов необходимо учитывать механизмы и особенности контактного теплообмена и неоднородности в теплофизических свойствах элементов при проведении численного трехмерного моделирования теплового состояния электродвигателя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beiktal D. Building Your Own Drones: A Beginner's Guide to Drones, UAVs and ROVs. Indianapolis, Indiana, QUE Publishing, 2015, 272 p.
2. Kilby T., Kilby B. Getting Started with Drones. San Francisco, California, Make: Community, 2015, 204 p.
3. Beiktal D. Robot Builder: The Beginner's Guide to Building Robots. Indianapolis, Indiana, QUE Publishing, 2014, 408 p.
4. А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев / Охлаждение промышленных электрических машин — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.
5. В.М. Попов / Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - Москва: Энергия, 1971. - 216 с. с ил.
6. Simcenter STAR-CCM+ Documentation, Version 2022.1. Simcenter Digital Industries Software, 2022.
7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 22, ANSYS Inc, USA, 2022.
8. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – California: DCW Industries, 2006. – 522 p.
9. Гарбарук А.В. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчёта турбулентных течений. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. – 127 с.
10. С.Hage, T.Sophy, El-Hassane Aglzim Investigating UAV Propellers Performances Near Moving Obstacles: CFD Study, Thrust Control, and Battery Energy Management // Vehicular Technology. - 2023. - №4.

Жарков Е.О.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

МИНИМИЗАЦИЯ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ЧЕРЕЗ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ПАЗОВ И ПОЛЮСОВ

Аннотация: В данной статье описано влияние количества пазов и полюсов на вибрации, обусловленные радиальными силами притяжения между статором и ротором. Показано каким образом можно минимизировать вибрации электрической машины за счет правильного подбора количества пазов. Демонстрация принципов образования вибрации показана на примере электродвигателя гибридной силовой установки мощность 250 кВт с частотой вращения 250 кВт.

Ключевые слова: электрическая машина, постоянный магнит, вибрации, шум, электродвигатель

I. ВВЕДЕНИЕ

Вибрации и шум, обусловленный ими, является важным аспектом проектирования электрической машины (ЭМ). Особенно сильно проблема вибраций проявляется в ЭМ с невысокой частотой вращения, в которых количество пазов и полюсов значительно. В таких ЭМ ярмо имеет маленькую высотку, что обуславливает низкую жесткость конструкции. Конструкция с низкой жесткостью становится особенно чувствительной к различного рода паразитным силам, которые вызывают вибрации. Вибрации могут быть обусловлены конструкцией активной части генератора, а могут быть связаны с работой инвертора. Основной причиной вибраций ЭМ, связанной с активной частью, являются пульсации вращающего момента. Использование трапецеидального управления, малая частота коммутаций транзисторов могут стать причинами повышения этих пульсаций [1]-[3]. Со стороны активной части на пульсации вращающего момента влияет форма ЭДС, а также зубцовый момент [4]-[5]. Но есть также источник вибраций, не связанный пульсациями вращающего момента. Вектор вращающего момента направлен касательно к поверхности статора и ротора. Радиальные силы, действующие на статор и ротор, никак не влияют на вращающий момент, но тем не менее они могут вносить значительный вклад в вибрацию. Величина этих вибраций в первую очередь зависит от соотношения количества пазов и полюсов. Неправильный выбор количества пазов и полюсов может привести к неприемлемо высоким вибрация и шуму, не позволяющим

эксплуатировать электрическую машину. В данной статье пойдет речь о том каким образом выбрать количество пазов и полюсов, чтобы вибрации, обусловленные радиальными силами притяжения между статором и ротором, были минимальны. Выбор будет производиться на примере электродвигателя для гибридной силовой установки мощностью 250 кВт при частоте вращения 2000 об/мин.

II. ВИБРАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПРИТЯЖЕНИЕМ МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ

Соотношение пазов и полюсов оказывает крайне сильное влияние на вибрации электрической машины. Форма ЭДС — это первое что приходит на ум, когда говорят о вибрациях, но сейчас мы рассмотрим другую природу вибраций, не связанную с формой ЭДС. Для рассмотрения возьмём электродвигатель мощностью 250 кВт при частоте вращения 2000 об/мин. Одно из направлений, обеспечивающее повышение удельной мощности, заключается в увеличении количества полюсов, что приводит к снижению массы ЭМ посредством снижения высоты спинки ротора и статора.

В рассматриваемом электродвигателе количество полюсов составляет 46, а пазов 48. Толщину спинки при таком количестве полюсов удалось снизить до 7,5 мм, что положительно сказывается на массе активной части, но негативно влияет на жесткость конструкции. Рассмотрим то с какой силой притягиваются зубцы к ротору. На рисунке 1 показан график изменения силы притяжения двух соседних зубцов к полюсам от положения ротора.

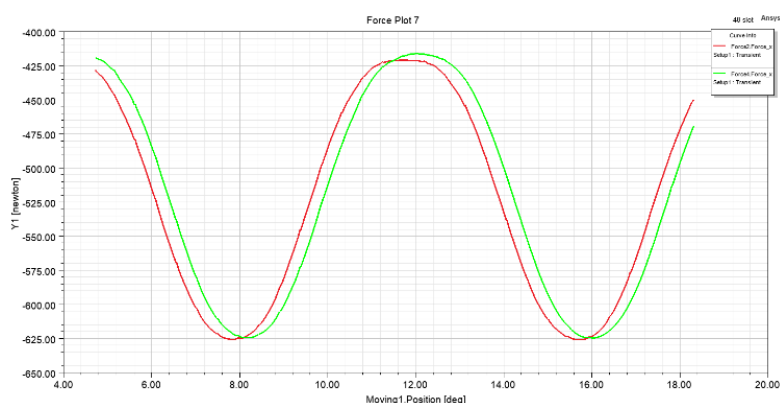


Рис. 1. Силы притяжения между зубцами статора и ротора (Полюсов – 46, пазов – 48)

Как видно из этого графика сила притяжения колеблется от 625 Н, когда зубец совмещен с полюсом и до 425 Н, когда зубец располагается напротив межполюсного

пространства. Если разложить кривую сил притяжения на гармонические составляющие, то окажется, что постоянная составляющая имеет величину 514 Н, а переменная – 107 Н, причем частота равна 46 гармонике от частоты вращения, то есть гармоника кратна количеству полюсов. И плохо даже не то, что зубец притягивает к ротору с большой силой, которая имеет переменную составляющую в 107 Нм в положительную и отрицательную сторону, а то, что сдвиг по фазе у этой силы между соседними зубцами составляет лишь $1/24$. Это приводит к тому, что у 12 зубцов подряд переменные составляющие силы притяжения сонаправлены, они суммируются и образуют большую изгибающую силу, которая прогибает тонкую спинку. Эпюры переменных сил, приложенных к статору показаны на рис. 2.

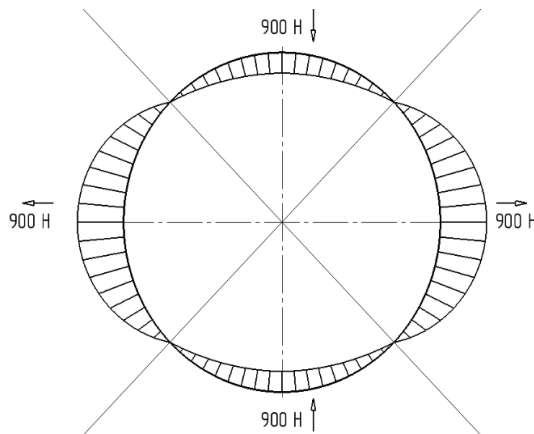


Рис. 2. Эпюры переменных сил (Полюсов – 46, пазов – 48)

Суммарная сила, образованная переменной составляющей, имеет величину около 900 Н и эти 900 Н изгибают угол спинки равный 90 градусов. Решающее значение в образовании вибраций играет сдвиг по фазе между силами притяжения соседних зубцов к ротору. Если сдвиг по фазе высокий, то область, где переменная составляющая силы притяжения зубцов к ротору направлена в одну сторону, маленькая. Это приведет к меньшей суммарной переменной составляющей силы притяжения и меньшей дуге спинки, которая подвергается изгибу. Сдвиг по фазе между силами притяжения зависит от соотношения количества пазов и полюсов. Природу малой величины сдвига можно понять, если рассмотреть картину магнитного поля (рис. 3 и 4).

В картине магнитного поля имеется две области с низкой магнитной индукцией и две с высокой. В области с низкой магнитной индукцией зубцы совмещены с межполюсным пространством, а в области с высоким – с полюсом. Сила притяжения

зубцов к ротору в областях с низкой магнитной индукцией также низкие, в областях с высокой магнитной индукцией – высокие.

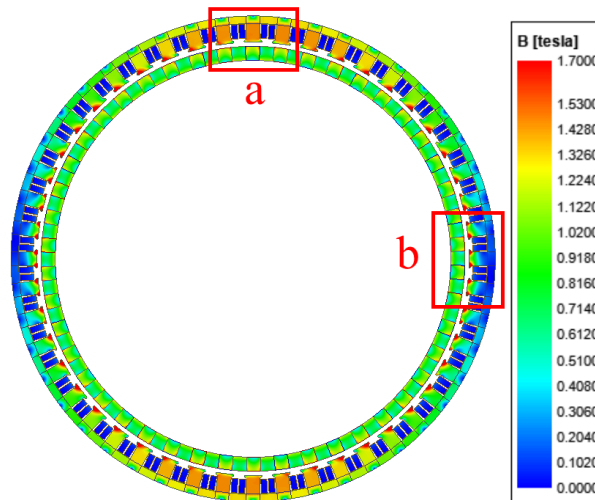


Рис. 3. Картина магнитного поля (Полюсов – 46, пазов – 48)

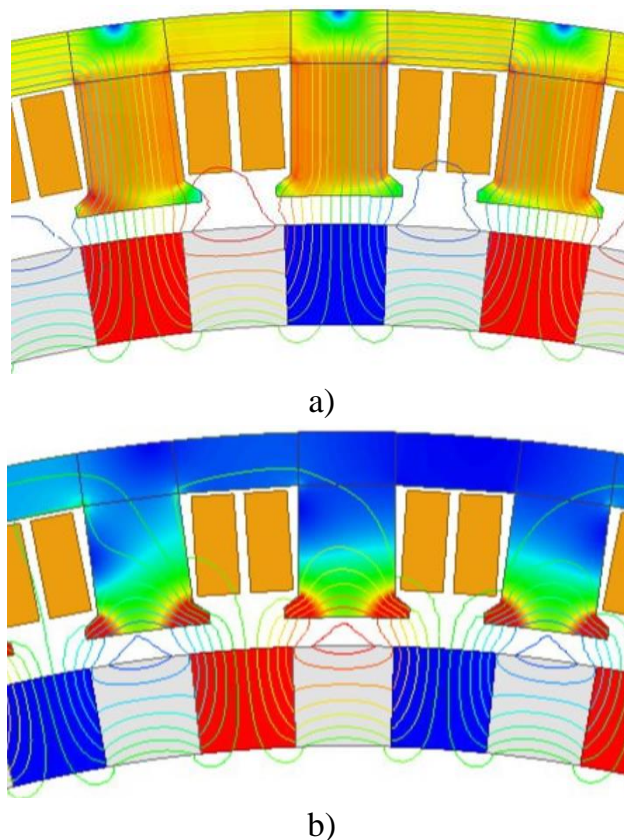


Рис.4. Картина магнитного поля увеличенно (Полюсов – 46, пазов – 48)

Если бы области с высокой и низкой магнитной индукцией чередовались бы реже, как например при количестве пазов равном 45 (рис 5), то сдвиг по фазе между силами притяжения стал бы еще ниже и эпюры сил притяжения выглядели бы как показано на рис. 6.

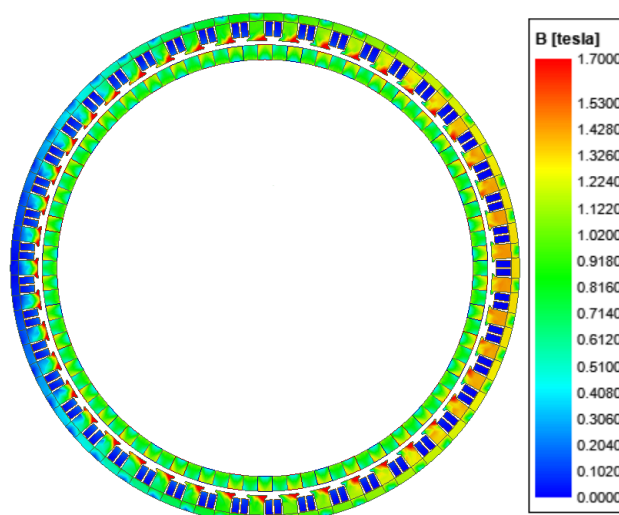


Рис. 5. Картина магнитного поля (Полюсов – 46, пазов – 45)

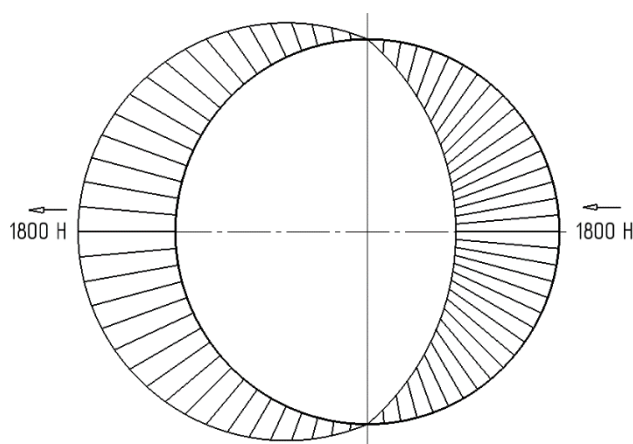


Рис. 6. Эпюры переменных сил (Полюсов – 46, пазов – 45)

Если области с низкой магнитной индукцией (а значит и области с отрицательным и положительным направлением переменной составляющей силы) сменяют друг друга на оборот лишь 2 раза, как это получается при 45 пазов, то сдвиг по фазе между силами оказывается минимальным и большое количество последовательно расположенных зубцов имеют одно направление переменной составляющей. Как результат суммарная величина переменной составляющей составляет уже 1800 Н, а дуга спинки, которую эта сила изгибает – 180 градусов. В таком случае прогиб спинки и уровень вибраций будет максимальным.

Поэтому необходимо для низкооборотных ЭМ с малой толщиной спинки подбирать такие соотношения количества пазов и полюсов чтобы количество чередований областей с высокой магнитной индукцией и низкой было большим, как например в случае с 51 пазом (рис. 7-9) или в случае с распределенной обмоткой с количеством пазов равным 138 (рис. 10-12).

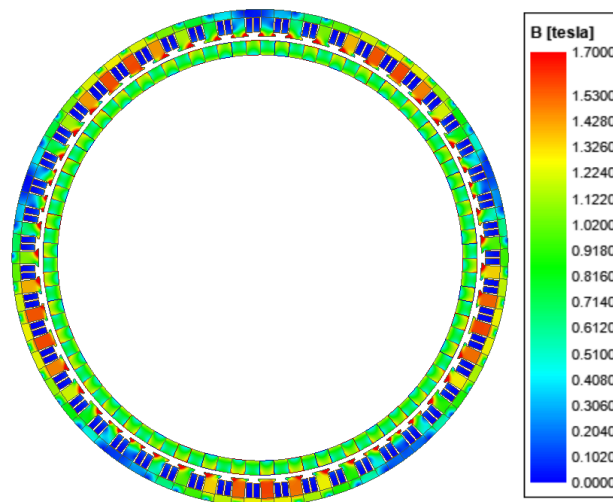


Рис. 7. Картина магнитного поля (Полюсов – 46, пазов – 51)

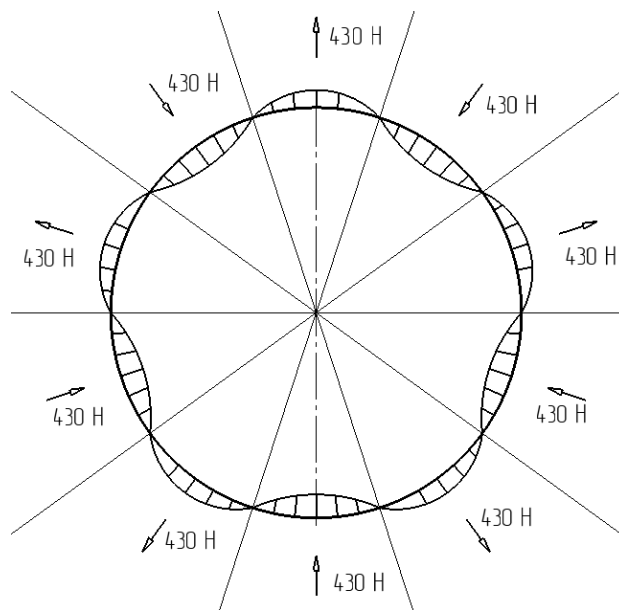


Рис. 8. Эпюры переменных сил (Полюсов – 46, пазов – 51)

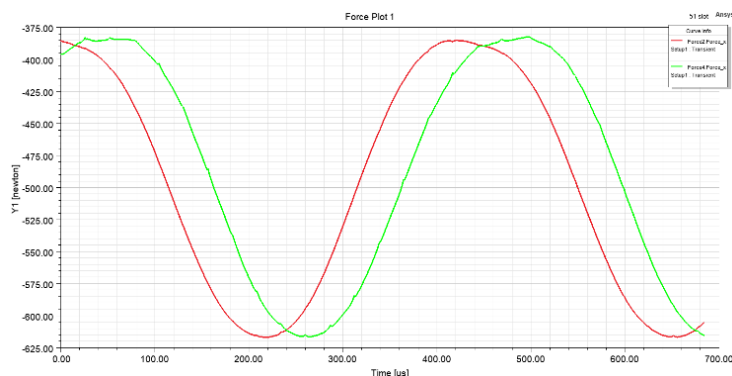


Рис. 9. Силы притяжения между зубцами статора и ротора (Полюсов – 46, пазов – 51)

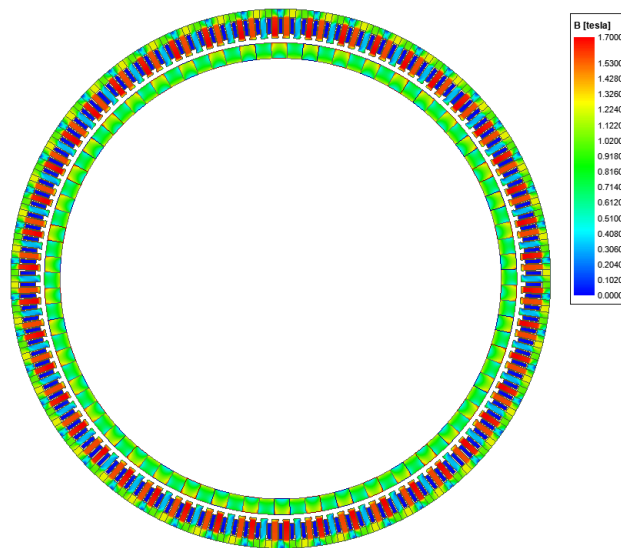


Рис. 10. Картина магнитного поля (Полюсов – 46, пазов – 138)

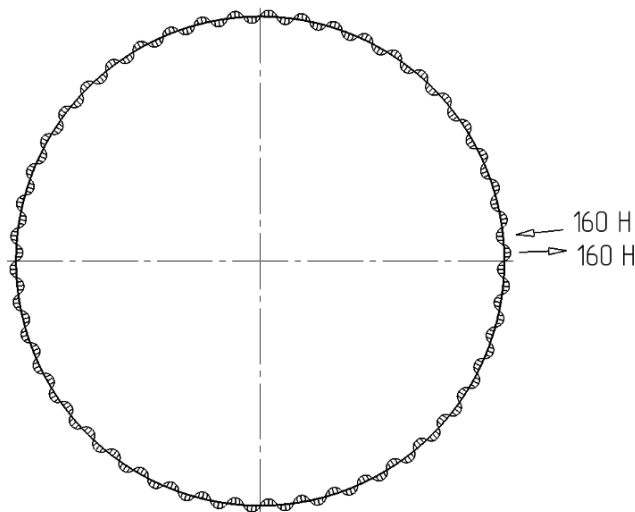


Рис. 11. Эпюры переменных сил (Полюсов – 46, пазов – 138)

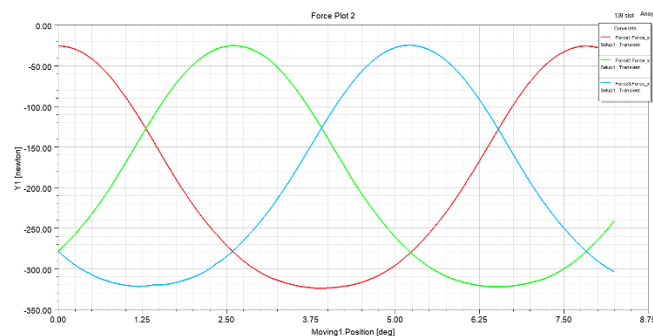


Рис. 12. Силы притяжения между зубцами статора и ротора (Полюсов – 46, пазов – 138.)

Для 51 и 138 пазов растёт сдвиг по фазе между силами притяжения зубцов, поэтому переменная составляющая не оказывает столь сильного влияния. Её наличие приводит к изгибанию небольшого участка спинки, который из-за малой длины

становится на много более жестким, а также сама изгибающая сила имеет меньшую величину. Характер действия изгибающих сил можно охарактеризовать рисунком 13. На нём показана развёртка длины спинки и действующая на эту длину переменная сила, которая стремится прогнуть её.

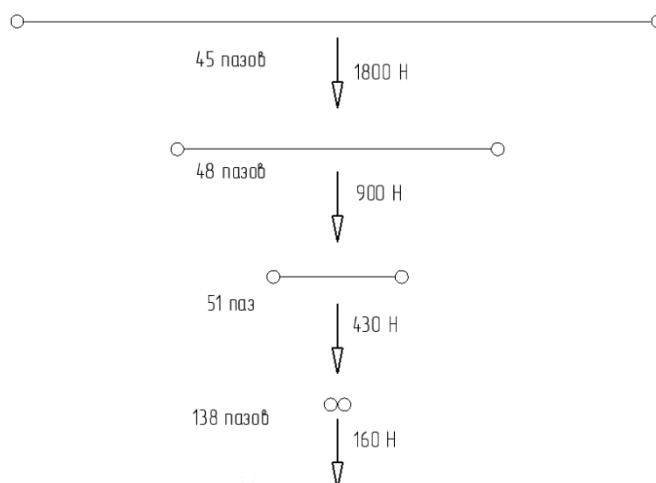


Рис. 13. Сравнение величины сил взаимодействия в зависимости от количества пазов

При 45 пазах большое количество последовательных зубцов имеет одинаковое направление переменной составляющей. По этой причине суммарная действующая сила на эти зубцы составляет 1800 Н, а область спинки, которую изгибает эта сила имеет большую длину. Ситуация становится лучше с увеличением количества пазов, так как при этом уменьшается количество последовательных зубцов с одинаковым направлением переменной составляющей. Суммарная действующая переменная составляющая силы снижается, также как и длина спинки.

III. ВЫВОД

В данной работе представлено сравнение характера действия радиальных сил притяжения между ротором и статором. Показано каким образом неправильный выбор количества пазов и полюсов может привести к высоким вибрациям. Для снижения вибраций, обусловленных притяжением между статором и ротором, рекомендуется применять такие соотношения количества пазов и полюсов при которых в магнитной системе статора области с низкой и высокой магнитной индукцией чередуются как можно чаще. В таком случае знакопеременные составляющие сил притяжения соседних зубцов имеют большой сдвиг по фазе и при их суммировании итоговая изгибающая ярмо сила имеет маленькую величину, а дуга ярма, которая изгибается, оказывается небольшой. Всё это в сумме приводит к тому что под действием

относительно небольшой знакопеременной составляющей малая дуга ярма, имеющая по этой причине высокую жесткость, деформируется незначительно, что обеспечивает низкий уровень вибраций и шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Tabarraee, J. Iyer, S. Chiniforoosh and J. Jatskevich, "Comparison of brushless DC motors with trapezoidal and sinusoidal back-EMF," 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE), Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 000803-000806, doi: 10.1109/CCECE.2011.6030567.
2. J. Chen, "The study on source of vibration and acoustic noise of permanent magnet machines by inverter," 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA), Ottawa, ON, Canada, 2014, pp. 694-696, doi: 10.1109/WARTIA.2014.6976359.
3. K. Xia, Y. Ye, J. Ni, Y. Wang and P. Xu, "Model Predictive Control Method of Torque Ripple Reduction for BLDC Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 56, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2020, Art no. 7503106, doi: 10.1109/TMAG.2019.2950953.
4. D. Wu and Z. Q. Zhu, "Design Tradeoff Between Cogging Torque and Torque Ripple in Fractional Slot Surface-Mounted Permanent Magnet Machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 8108704, doi: 10.1109/TMAG.2015.2436714.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ БЕСПИЛОТНОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОЙ АВИАЦИИ

Аннотация: В представленной работе проведен обзор алгоритмов управления электродвигателями беспилотных летательных аппаратов. Дано описание ключевых особенностей управления бесколлекторных двигателей по шестиступенчатой коммутации с применением датчиков положения ротора, по синусоидальной коммутации с применением датчиков положения ротора и датчиков тока, а также дано описание бездатчикового управления, способа его реализации и запуска двигателей на малых оборотах.

Ключевые слова: шестиступенчатое управление, векторное управление, бездатчиковое управление.

I. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение в современную экономическую жизнь человека и общества беспилотных летательных аппаратов (БЛА) принимает лавинообразный эффект и требует непрерывного улучшения основных параметров БЛА, таких как дальность полета, эффективность винтомоторной группы, грузоподъемность и т. д.

Основное внимание уделяется винтомоторной группе (ВМГ), двигателями для которой в беспилотной летательной авиации в подавляющем большинстве случаев служат бесколлекторные двигатели постоянного тока и бесколлекторные двигатели переменного тока. Выбор представленных электродвигателей обусловлен высокой надежностью за счет бесщеточной конструкции, упрощенной схемой изготовления, возможностью достижения высоких оборотов и относительно малыми геометрическими размерами.

Винтомоторная группа функционирует под управлением специальных алгоритмов, подобранных под определённый тип двигателя. При этом изготовленная с применением передовых технологий и станков ВМГ выдаст неудовлетворительный результат, если в качестве системы управления применен неоптимизированный под установленный в ВМГ электродвигатель алгоритм. Существенной проблемой является дешевизна изготовления бесколлекторных двигателей переменного тока и систем управления с алгоритмами для бесколлекторных двигателей постоянного тока. Из-за

несоответствия алгоритмов двигателям существенно снижается эффективность всей силовой установки БЛА, смене тенденции подбора неэффективного комплекта двигатель – алгоритм препятствует экономической составляющей, системы управления на основе алгоритмов для бесколлекторных двигателей переменного тока значительно дороже.

В представленной статье описаны основные алгоритмы управления электродвигателями, их отличительные особенности, преимущества и недостатки.

II. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ШЕСТИСТУПЕНЧАТОЙ КОММУТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

В беспилотной летательной авиации в качестве движущей силы применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами, различающиеся по типу исполнения якорных обмоток. Двигатели с обратной электродвижущей силой (ЭДС) трапецеидальной формы имеют шестиступенчатую коммутацию и называются бесколлекторными двигателями постоянного тока [1]. Форма обратной ЭДС представлена на рис. 1.

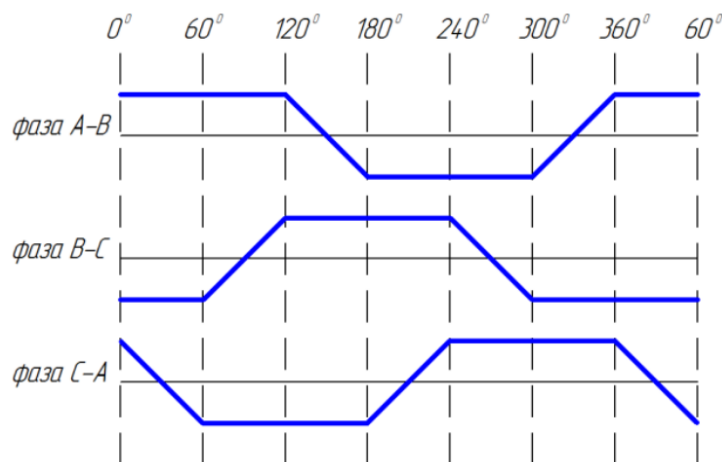


Рис. 1. Трапецеидальная обратная электродвижущая сила

Бесколлекторные двигатели постоянного тока обладают возможностью широко и плавно регулировать скорость вращения [2]. Достигается это тем, что двигатель состоит из трех обмоток, сдвинутых в пространстве на 120 градусов и соединенные в звезду, датчика положения ротора и трех чувствительных элементов, связанных с датчиком и транзисторами полупроводникового преобразователя, выполняющего роль системы управления силовой установкой. Вращение двигателя описывается следующим образом. Датчик положения ротора через чувствительный элемент

открывает соответствующий транзистор и по обмотке протекает ток, при этом каждому чувствительному элементу соответствует своя обмотка и транзистор. На обмотке с током возникает намагничивающая сила и взаимодействует с потоком постоянного магнита ротора, вследствие чего появляется вращающий момент, приводящий двигатель в движение. При повороте свыше 30 градусов с датчиком положения ротора взаимодействуют уже два чувствительных элемента, открывается второй транзистор и ток течет одновременно по двум обмоткам. По достижению угла поворота двигателя в 60 градусов результирующая намагничивающая сила продолжает вращать двигатель не меняя направления, однако свыше 90 градусов первый транзистор закрывается и ток будет протекать лишь по обмотке со вторым транзистором, третий транзистор будет открыт при 120 градусах. Графическое представление коммутаций представлено на рис. 2.

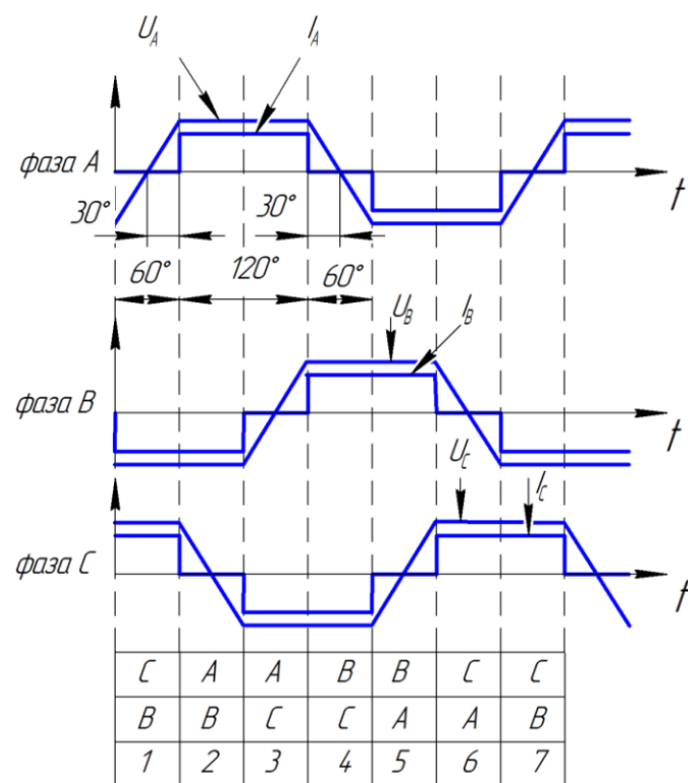


Рис. 2. Шестиступенчатая коммутация

Основными недостатками алгоритма являются значительные пульсации вращающего момента из-за скачкообразного перемещения намагничивающей силы статора (шестиступенчатая коммутация), пульсации токов в обмотках статора требуют применения надежных источников питания, способных к практически мгновенной отдаче большого тока [3...6].

III. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

Двигатели с обратной электродвижущей силой (ЭДС) синусоидальной формы имеют синусоидальную коммутацию и называются бесколлекторными двигателями переменного тока. Форма ЭДС представлена на рис. 2.

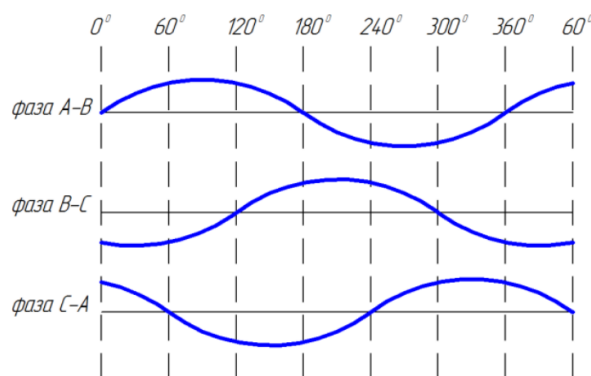


Рис. 3. Синусоидальная обратная электродвижущая сила

Для вращения синусом применяют векторное управление, позволяющее существенно увеличить диапазон вращения, точность регулирования и повысить быстродействие винтомоторной группы относительно шестиступенчатой коммутации. Данный метод обеспечивает непосредственное управление вращающим моментом двигателя.

Последовательность коммутационного процесса принципиально не отличается от шестиступенчатой коммутации. Особенностью коммутации бесколлекторного двигателя переменного тока является то, что в любой момент времени во всех фазных обмотках текут токи. Протекающие токи, напряжения в фазах, представленные на рис. 3 и магнитные потоки статора имеют синусоидальную форму. Такая форма организации питания обмоток позволяет получить постоянство вращающего момента и скорости и при больших и при малых оборотах. Этому способствует также исполнение механической части электрической машины.

Задача управления бесколлекторным двигателем переменного тока состоит в том, чтобы вычислить и задать значения трехфазных токов исходя из требуемого тока или момента на валу, и определить пространственное размещение вектора магнитного потока исходя из текущего положения ротора относительно статора. При построении системы управления с помощью датчиков определяется истинное положение ротора. К

полученному значению угла ротора в зависимости от направления вращения и знака момента прибавляются или вычитаются 90 электрических градусов и рассчитываются требуемые токи фаз. Для каждого углового положения ротора определяется соответствующее положение поля статора, т. е. ротор определяет значение и направление поля статора.

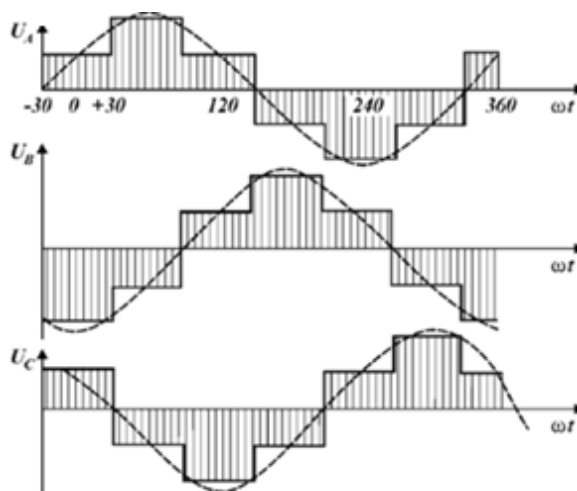


Рис. 4. Форма фазных токов и напряжений

Вращение двигателя описывается следующим образом. Датчиками тока измеряются фазные токи в двух обмотках статора, на третьей обмотке рассчитывается исходя из условия, что сумма всех токов равна нулю. Полученные значения фазных токов проводятся через преобразование Кларка. Вычисленные значения токов и измеренный датчиком положения ротора угол поворота проводятся через преобразование Парка, на выходе получаем токи, характеризующие магнитный поток ротора и выходной момент двигателя во вращающейся системе координат. Исходя из полученных преобразованием Парка значений токов вычисляются сигналы ошибок, подаваемые далее на ПИ-регуляторы для получения напряжений, описывающих вектор напряжения, подаваемого на двигатель. Далее вычисляется новое значение угла поворота ротора и по данным с ПИ-регуляторов проводят обратное преобразование Парка для получения новых значений напряжений на обмотках с учетом нового угла. Последним шагом проводят обратное преобразование Кларка, получая тем самым фазные напряжения.

Бесколлекторные двигатели переменного тока сложны в изготовлении по сравнению с бесколлекторными двигателями постоянного тока. Несмотря на это они

превосходят последние по массогабаритным показателям, обеспечивают минимальные пульсации вращающего момента.

IV. АЛГОРИТМ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Развитие современных микроконтроллеров и производительности встроенных в них аппаратов обработки входных аналоговых и цифровых сигналов позволило реализовать бездатчиковое управление бесколлекторными двигателями постоянного тока на основе анализа электромагнитных переменных, измеренных непосредственно на клеммах полупроводникового преобразователя [7..10]. На БЛА бездатчиковое управление основано на оценке противо-ЭДС в отключенной обмотке. При вращении двигателя в каждой обмотке создается противо-ЭДС в соответствии с законом Ленца и зависит от трех параметров двигателя: числа витков в обмотках статора, угловой скорости ротора и магнитного поля, создаваемого магнитами ротора. Значение противо-ЭДС прямо пропорционально числу обмоток на фазу, длине ротора, внутреннему радиусу ротора, магнитной индукции ротора и угловой скорости. Переменной величиной является только угловая скорость. Величина наводимого противо-ЭДС двигателя изменяется в зависимости от положения и скорости ротора, поэтому определить противо-ЭДС при малых скоростях невозможно. Наводимый в обмотках ЭДС знакопеременный.

Методы, основанные на противо-ЭДС, подходят для применений, где не требуется контроль положения и применения обратной связи на малых скоростях. Существует несколько различных способов использования противо-ЭДС: определение пересечения нуля противо-ЭДС, определение третьей гармоники, интегрирование противо-ЭДС, метод обратного диода.

Для управления бесколлекторными двигателями постоянного тока может быть использовано значение противо-ЭДС обесточенной фазы с целью определить последовательность коммутации инвертора. Определить пересечение нуля противо-ЭДС можно путем определения либо напряжения на зажимах двигателя, либо напряжения средней точки – нейтральной точки двигателя. В подавляющем большинстве случаев производители двигателей не выводят её на клеммы, что усложняет получение информации о значении её напряжения относительно зажимов источника питания. Поэтому для определения напряжения создается виртуальная нейтральная точка с помощью резисторов.

Схема обнаружения противо-ЭДС является простой и имеет свои недостатки. Из-за ШИМ нейтральная точка непостоянна, и её потенциал непрерывно изменяется. ШИМ также генерирует шумы высокой частоты с большим диапазоном напряжений, что может препятствовать адекватному управлению электроникой. Поэтому эта схема нуждается в делителях напряжения и низкочастотных фильтрах для уменьшения пульсации и сглаживания высокочастотных шумов. Однако делитель напряжения будет уменьшать чувствительность сигнала на малой скорости, особенно на начальном этапе (момент пуска), где это необходимо больше всего. Слишком большие номиналы резисторов в делителе зачастую не позволяли компаратору схемы управления детектировать пересечения и приводили к критическому сбою. Низкочастотный фильтр будет порождать постоянную задержку, не зависящую от скорости двигателя. При возрастании скорости вращения ротора процентный вклад задержки по отношению на период будет возрастать. Эта задержка будет нарушать согласование тока с противо-ЭДС и является причиной серьёзных проблем при коммутировании на высокой скорости. Следовательно, этот метод имеет, как правило, узкий диапазон скоростей.

При трапецеидальном алгоритме коммутации в каждый момент времени одна из фаз двигателя подключена к высокому уровню питания, вторая – к низкому, а третья остается свободной. Вращаясь, двигатель наводит ЭДС в свободной обмотке. По мере вращения напряжение на свободной фазе изменяется. Измеряя его, можно определить момент переключения к следующему положению ротора. Обычно определяют момент перехода напряжения на свободной фазе через нулевую точку (половину питающего напряжения). Требуется отследить момент, когда напряжение на свободной фазе сравняется со средней точкой. Для того чтобы данный метод выполнялся, двигатель должен вращаться. Этот метод хорошо работает при сравнительно высоких оборотах двигателя. При низких оборотах наводимая ЭДС может оказаться недостаточной для четкого определения положения ротора, из-за чего запуск таких систем разрабатывается в программном обеспечении отдельно, в виде череды тестовых сигналов и попыток раскрутить двигатель, поэтому применение в критически важных областях производства подобная технология представляет опасность.

Задача корректного запуска бесколлекторного двигателя постоянного тока является одной из главных в современных системах управления. Для этого необходимо

знать точное положение ротора. В том случае, когда отсутствует абсолютный датчик положения, самое простое решение – подать напряжение на одну из фаз и дождаться, пока ротор сориентируется по полю. Но если положение полюсов ротора не совпало с этой фазой, ротор может совершить неконтролируемое движение назад, а если ротор имеет всего одну пару полюсов (такие чаще всего используются на высокооборотистых электродвигателях), и вовсе не принять необходимое положение. Так как ротор электрической машины в начальный момент находится в неподвижном состоянии, он не создает обратной ЭДС, которая позволяет определить его положение, поэтому все методы определения начального положения ротора используют специальный тестовый сигнал, который подается на статор машины, и специальный алгоритм анализа отклика на него. Самый простой способ – установить ротор в заведомо известное положение, подав напряжение на две из обмоток двигателя. Выждать паузу, пока ротор займет положение, после чего начать коммутировать согласно программному обеспечению микроконтроллера в системе управления.

Время установки ротора в начальное положение зависит не только от напряжения, приложенного к обмоткам статора, но и от инертности двигателя и нагрузки на валу. Чем больше масса ротора и приводимого им устройства на валу, тем медленнее он будет устанавливаться в начальное положение. Важно правильно определить время, которое нужно выждать между подачей напряжения на обмотки и окончанием позиционирования ротора, существенным ограничением является и мощностные возможности системы управления, так как токовые выбросы в момент запуска двигателя самые высокие.

Если двигатель разогнался до требуемой скорости, то величина генерируемой ЭДС на свободной фазе достаточна для измерения. Напряжение измеряется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) или компараторов. Виртуальная средняя точка статора бесколлекторного двигателя постоянного тока для определения противо-ЭДС выполнена на трёх резисторах, соединённых звездой. Блоки датчиков напряжения, встроенные в микроконтроллер, измеряют величину противо-ЭДС на обмотках двигателя. Далее полученные сигналы преобразуются в числовую форму и фильтруются фильтром нижних частот. Так как противо-ЭДС имеет трапецеидальную форму, то для определения скорости достаточно вычислить длительность между

импульсами противо-ЭДС одной фазы, а импульсы следующей фазы использовать для определения направления вращения.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного обзора описана шестиступенчатая коммутация как с применением датчиков положения ротора, так и без него, выделены преимущества и недостатки обоих методов управления. В противовес представлено векторное управление с синусоидальной коммутацией, значительно превосходящее предшественников в плавности изменения скорости вращения двигателя и эффективности расхода энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев В.Е. Основы электромеханики: Письменные лекции. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2003. – 79 с.
2. Гаврилов Р. С. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие / Р. С. Гаврилов, Ю. Н. Мустафаев; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019–78 с.
3. Стариков А. В., Рокало Д. Ю. Влияние трапецеидальной формы напряжения на вращение магнитного поля в электродвигателях переменного тока // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. №3 (47).
4. A Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on Single-Loop SVPWM / Q. Zhou [et al.] // Adv. Technol. Teach. – 2012. – No. 9. – P. 333–342.
5. Воронин С., Султонов О., Давлатов А. Особенности балансировки трехфазного ступенчатого напряжения на выходе полупроводниковых преобразователей // Российский семинар по энергетике и автоматизации металлургической промышленности: исследования и практика (РЕАМИ). – 2020. – С. 119–123.
6. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Панкратов В. В.. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. 2007. №2.
8. Вычужанин В. Система управления бесщеточным электродвигателем на основе логики FPGA // Современная электроника. 2012. №5. С.18 – 23.
9. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2001. С. 155 –159.
10. Сизякин А., Румянцев М. Без датчика положения ротора: решения компании IR для управления вентильными двигателями // Новости электроники. 2011. №10.

Охотников М.В., Мужайлов В.Н., Насибуллин Д.Д., Блинов А.Я.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ

Аннотация: В работе приведен литературный обзор технической литературы в области электродвижения, проведен анализ применения электротяги на самолетах, а также приведены характеристики уже существующих электродвигателей.

Ключевые слова: авиация, электродвижение, электротяга, гибридные силовые установки, электродвигатели.

I. ВВЕДЕНИЕ

С 2011 года перспективным направлением развития Российской авиации является разработка самолетов на электрической тяге. Подкрепляющим фактором является то, что с каждым годом на международном авиационно-космическом салоне МАКС презентуется все больше электросамолетов. В мировой практике множество инновационных проектов инициировано и воплощено в реальность такими гигантами как: Airbus, Boeing, NASA.

Согласно постановлению правительства, N 1693-р от 25.06.2022, в России поддерживается курс на повышение уровня электрификации авиационной техники. Отдельным пунктом идет разработка стартер-генераторов (СтГ) и электродвигателей для всей линейки воздушных судов.

Немаловажным фактором является то, что очевидной причиной актуальности данного направления развития авиации является тот факт, что электрический самолет не создает никаких выбросов в атмосферу. Стоит выделить еще два немаловажных фактора – снижение затрат на эксплуатацию и топливо.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

С развитием авиационной отрасли, технологий электродвижения, увеличением энергоемкости аккумуляторов и удельной мощности электромеханических преобразователей энергии появилась возможность серийного применения самолетов на электрической тяге. Все чаще начинают говорить о переходе к концепции “полностью электрического самолета” и самолетов с гибридной силовой установкой (ГСУ).

Полностью электрический самолет использует в качестве тяги электродвигатели и все оборудование заменено на электропривода. У такого летательного аппарата отсутствуют двигатели внутреннего сгорания. Преимуществом такой концепции является снижение выбросов углекислого газа [1]-[3]. Согласно статистике [4] Международной ассоциации воздушного транспорта IATA, на авиацию приходится 2% выбросов, например, перелет из Лондона в Рим на одного человека приходится 234 кг углекислого газа. При переходе к использованию электрической тяги удастся снизить эти показатели. Полностью электрический самолет вообще не создает выхлопа. Хотя все еще стоит вопрос в производстве и утилизации аккумуляторов [5].

Другим преимуществом является снижение затрат на топливо. Так на примере авиационного керосина в РФ, стоимость авиационного топлива за тонну в 2015-2017 году была 32 тысячи рублей, в 2019 году - 45 тысячи рублей [6], а уже по состоянию на октябрь 2023 года 81,6 тысяч рублей [7], что непосредственно отражается на цене полета, в будущем полеты на электротяге будут обходиться на 50-80% дешевле. Например, цена топлива на 200 километров полета на Cessna-208 будет стоить 400 долларов США, а на электротяге цена электроэнергии обойдется в 20 долларов США [8].

Также большим преимуществом переход на электрические двигатели является простота эксплуатации, связанная с конструктивом.

- Электрическому двигателю не нужна редукторная часть, так как он способен выдавать стабильную мощность и частоту вращения, а управление выходными параметрами в некотором диапазоне происходит с помощью электроники. Отсутствие редуктора уменьшает количество движущихся и соприкасающихся частей.
- Высокая удельная мощность, что существенно снизит массогабаритные показатели, электродвигатель может весить до 10 раз меньше двигателя внутреннего сгорания.

III. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЯГИ НА САМОЛЕТАХ

В 2021 году на летных испытаниях была представлена уникальная летающая лаборатория на базе самолета Як-40. Для достижения нового уровня эффективности и надежности, один из трех двигателей Як-40 был заменен на прогрессивный турбовальный газотурбинный двигатель с электрическим генератором. Такое решение

было разработано Центральным институтом авиационного моторостроения им. П.И. Баранова совместно с Уфимским авиационным техническим университетом.

Особенностью лаборатории является также установленный электродвигатель мощностью 500 кВт, использующий эффект высокотемпературной сверхпроводимости и криогенную систему. Этот инновационный электродвигатель был разработан ЗАО "СуперОкс" по заказу Фонда перспективных исследований. Такое сочетание прогрессивных технологий впервые применено в авиации и открывает новые горизонты для разработки электрических трансмиссий в воздушном транспорте.

Созданный в ходе выполнения проекта «Контур» научно-технический задел обеспечивает возможность: повышения удельной мощности электрических машин до 5 кВт/кг и более; снижения расхода топлива до 30%; снижения шумности на 20%; повышения транспортной эффективности на 10% (рисунок 1) [9].



Рис. 1. Электрический двигатель для винта на Як-40ЛЛ

В январе 2019 года компания MagniX презентовала свой электродвигатель для авиации magni550. Разработка австралийской компании выдает до 750 л. с. (560 кВт), крутящий момент на валу 2800 Нм, максимальная частота вращения 3000 об/мин. Предполагается, что установка станет аналогом турбовинтового авиационного двигателя Pratt and Whitney PT6, которым оснащены популярные модели легких пассажирских самолетов Beechcraft King Air и Cessna 208 (рисунок 2) [10]

Этот первый полет eCaravan - еще один шаг на пути к эксплуатации этих самолетов средней дальности с минимальными затратами и нулевым уровнем выбросов в небольших аэропортах. Эти коммерческие самолеты с электроприводом позволят предлагать услуги по перевозке людей и посылок таким образом, который ранее был невозможен".



Рис. 2. Электромотор magni500

В таблице 1 приведены технические характеристики данного двигателя.

Таблица 1

Технические характеристики электромотора MAGNI500

Крутящий момент	2814 Нм
Мощность	560 кВт/ 750 л.с.
Базовая частота вращения	1900 об/мин
Максимальная частота вращения	3000 об/мин
Масса двигателя	135 кг

В 2015 году авиационная компания Siemens представила свой новый электромотор, который стал настоящим прорывом в области авиационной технологии. Этот легкий и компактный двигатель весит всего 50 кг, но обладает невероятной мощностью в 260 кВт. Это позволяет создавать воздушные суда, стартовая масса которых составляет до двух тонн, используя только один такой двигатель.

Одной из самых удивительных особенностей этого мотора является его вращающийся воздушный винт. В отличие от традиционных двигателей, этот электромотор не требует трансмиссии для привода винта. Способность вращаться со скоростью 2500 оборотов в минуту позволяет ему достичь максимальной эффективности и оказать существенное влияние на производительность самолета.

Необычайное соотношение веса к мощности этого электродвигателя, превышающее 5 кВт на килограмм, делает его еще более впечатляющим. Фактически, эта характеристика превосходит даже турбореактивные двигатели, которые являются основными источниками тяги для большинства коммерческих самолетов.

Благодаря такому прогрессивному электромотору, воздушные суда с массой до двух тонн могут легко взлетать и демонстрировать высокие скоростные и маневренные характеристики без необходимости использования нескольких моторов или сложных систем передачи. Это создает новые возможности для разработки малых самолетов и

даже личных авиационных аппаратов, которые могут использоваться в таких областях, как личная авиация, наблюдение и патрулирование, грузоперевозки и экспедиции.

В апреле 2017 года компания Siemens удивила мир, представив прототип уникального электрического самолета Extra 330LE. Этот революционный аппарат не только установил два мировых рекорда скорости в классе электрических самолетов с аккумуляторным питанием, но и впечатлил своим прогрессивным двигателем, разработанным именно Siemens.

Благодаря инновационному двигателю от Siemens, самолет Extra 330LE достиг невероятной скорости 337,50 км/ч на дистанции 3 км при весе до 1000 кг, а при весе более 1000 кг - даже 342,86 км/ч. Этот ошеломительный успех был возможен благодаря высокой энергетической плотности, невероятной мощности и непревзойденно низкому весу нового двигателя от Siemens (рисунок 3) [11].

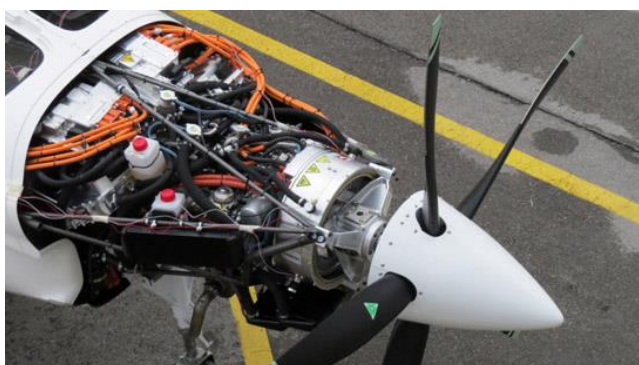


Рис. 3. Электродвигатель Siemens

«Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.Баранова» (ЦИАМ) в сотрудничестве с компанией «Наука Софт» представляют инновационную электрическую силовую установку для легкого двухместного самолета «Сигма-4». Уникальность данной системы основывается на использовании литиевых аккумуляторов и электродвигателя мощностью 60 кВт (80 л.с.), что обеспечивает высокую скорость разгона и маневренность самолета. Производство компактного электродвигателя, системы управления и блоков аккумуляторов уже завершено и успешно протестировано на специальном стенде. В дальнейшем планируется интегрировать твердополимерные топливные элементы, что позволит значительно увеличить полетное время до двух часов. В результате данной разработки легкий самолет «Сигма-4» станет еще более эффективным и экологически чистым вариантом воздушного транспорта [12].

Двигатель ДТ-60 НС заменит на самолете «Сигма-4» поршневой австрийский ROTAX. Электрическая силовая установка представлена в двух вариантах с одним источником энергии в виде литий-ионных аккумуляторов, емкость которых рассчитана на 40 минут полета, и с двумя источниками энергии. Во втором случае обеспечивать мощность, необходимую для поддержания крейсерского полета, будут водородные топливные элементы, а литий-ионные аккумуляторы помогут увеличить мощность двигателя во время взлета и набора высоты (рисунок 4) (таблица 2)



Рис. 4. Электромотор magni500

Таблица 2

Технические характеристики электромотора ДТ-60НС

Номинальный момент	250 Нм
Номинальная мощность	50 кВт
Максимальная мощность	60 кВт
Диапазон скоростей	1600-2100 об/мин
Масса двигателя	22 кг

IV. ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

На данный момент согласно [13]-[15] самолеты на электрической тяге не смогут полностью заменить поршневые или реактивные двигатели из-за энергоемкости аккумуляторных батарей. Реактивное топливо примерно в 30 энергоэффективнее

литий-ионных аккумуляторов. Так в самолете-демонстраторе X-57 Maxwell 70% объема занимают аккумуляторы, что ограничивает его применение.

Другим критерием является то, что летательный аппарат на традиционной тяге во время полета вырабатывает топливо, что снижает его вес. А при использовании электрической тяги вес остается постоянным на протяжении всего полета, даже при разряженных аккумуляторах.

Также основным препятствием распространения является относительная неразвитость технологий, отсутствие нормативной базы и опыта эксплуатации.

На данный момент основными применениями самолетов на электрической тяге является: спортивные соревнования, учебные и туристические полеты благодаря своим высоким удельным характеристикам и относительно дешевизны полета.

В судостроении, железнодорожном транспорте, тяжелой автомобильной и гусеничной технике широко распространены электрические трансмиссии. Однако, на самолетах не получается применить подобные технологии из-за высокой массы оборудования, отсутствия безопасного охлаждающего вещества и других проблем, связанных с особенностями авиационной техники.

Несмотря на препятствия, возникающие при применении электрических трансмиссий в авиации, можно использовать знания и опыт, накопленные в смежных отраслях, для разработки подходящих технологий. В свою очередь, технологии, созданные для авиации, могут быть полезны и в других сферах транспорта и экономики. Однако воздушные суда предъявляют очень высокие требования к технологиям электрической трансмиссии, сравнимые, возможно, только с требованиями к космической технике. Поэтому задача разработки электрических технологий для авиации состоит в достижении принципиально нового уровня эффективности и надежности этих решений.

Так, в России больших успехов в области гибридных силовых установок добились в ФГУП «НАМИ» при реализации программы «Единая модульная платформа». Есть своя программа разработок в группе компаний КамАЗ. В судостроении в Крыловском государственном научном центре и ЦКБ «Рубин» работают над созданием силовых установок для подводных лодок на основе топливных элементов большой мощности.

Что касается авиации, то ведущую и координирующую роль здесь играет ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», объединяющий все ведущие научно-

исследовательские центры авиационной промышленности – ЦАГИ, ЦИАМ, ГосНИИАС, СибНИА. С целью координации работ в рамках НИЦ сформирована комплексная научно-техническая платформа «Электрический ЛА» (ЛА — летательный аппарат). Каждый из институтов, входящих в НИЦ, работает в рамках своих основных компетенций. ЦАГИ отвечает за новые компоновочные решения, возможности по улучшению аэродинамических качеств, ГосНИИАС – за электрификацию бортового оборудования и системы управления. Особое место в этих работах принадлежит ЦИАМ, так как критические знания и технологии предстоит разрабатывать именно в части силовых установок.

При этом от поколения к поколению двигателей для повышения их надежности и эффективности разрабатывались и внедрялись новые технические решения. И сейчас работы в этом направлении не прекращаются, но достигать поставленных целей все труднее и труднее. Радикально ситуация может измениться именно с переходом к электродвижению.

V. ВЫВОД

В данной статье проведен анализ технической литературы в области электродвижения и электродвигателей, приведены тенденции развития авиационной промышленности и обозначены возможности и трудности перехода от поршневого двигателя для винта самолета к электрическому. А развитие смежных отраслей, где использование технологии электродвижения обуславливается рядом высоких технических требований, даст необходимый опыт разработки и эксплуатации электромеханических преобразователей энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barzkar, A., & Ghassemi, M. (2020). Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review. *IEEE Access*, 8, 169314–169332. doi:10.1109/access.2020.3024168
2. Wheeler, P. (2016). Technology for the more and all electric aircraft of the future. 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). doi:10.1109/ica-acc.2016.7778519
3. Schefer, H., Fauth, L., Kopp, T. H., Mallwitz, R., Friebe, J., & Kurrat, M. (2020). Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft. *IEEE Access*, 8, 84188–84216. doi:10.1109/access.2020.2991804
4. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>
5. <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>

6. <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2019/10/15/813726-kerosinovaya-dieta>
7. <https://www.ptlc.ru/news/stoimost-aviakerosina-v-rf-prevysila-81-6-tys-rub-t/>
8. <https://skiesmag.com/news/largest-electric-commercial-plane-takes-flight/>
9. <https://ciam.ru/?ysclid=lp6qysf8331373927>
10. <https://www.emobility-engineering.com/magnix-magni350-650-and-magnidrive-100/>
11. <https://www.aerospace-technology.com/projects/extra-330le-electric-aircraft/>
12. <https://www.soci.org/chemistry-and-industry/cni-data/2020/4/clean-aviation>
13. Thapa, N., Ram, S., Kumar, S., & Mehta, J. (2021). All electric aircraft: A reality on its way. *Materials Today: Proceedings*, 43, 175–182. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.611
14. Freeman, J., Osterkamp, P., Green, M., Gibson, A., & Schiltgen, B. (2014). Challenges and opportunities for electric aircraft thermal management. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86(6), 519–524. doi:10.1108/aeat-04-2014-0042
15. Sarlioglu, B., & Morris, C. T. (2015). More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(1), 54–64. doi:10.1109/tte.2015.2426499

Обух Ф.А., Терегулов Т.Р.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЕМКОСТЬ¹

¹Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по гранту УМНИК 2023

Аннотация: Представленная статья описывает различные схемы гашения магнитного поля ротора синхронного генератора, которые были пущены в производство и которые остались на стадии прототипов, из-за связанных с ними проблем.

Более подробно рассмотрена схема устройства гашения магнитного поля на электрическую емкость (далее – конденсатор), и представлен расчет схемы гашения на конденсатор на примере турбогенератора ТВВ-320-2, на основе которого будут приведены способы реализации и оптимизации схемы относительно времени гашения магнитного поля с подбором существующих емкостей.

Ключевые слова: гашение магнитного поля, синхронные машины, турбогенератор, защита, система возбуждения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Гашением магнитного поля ротора называется процесс снижения тока в обмотке возбуждения до нулевых или околонулевых значений [1, стр. 6]. Процесс предназначен для остановки турбогенератора в плановых и чрезвычайных ситуациях. В зависимости от мощностей возбудителя и типа системы возбуждения применяются различные схемы гашения. На данный момент в энергетике преимущественно используются схемы гашения магнитного поля ротора синхронного генератора на постоянное / переменное сопротивление и на дугогасительную решетку. Однако было разработано множество схем, которые имели хороший потенциал при гашении магнитного поля, но не были востребованы из-за сложности их создания или же вовсе их использование было невозможно и нецелесообразно при уровне технологий того времени. В статье будут рассмотрены известные схемы гашения и их уровень технологий на момент

написания статьи, также будет представлено и рассчитано возможное решение для схемы устройства гашения магнитного поля ротора на конденсатор.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В данном разделе будет произведен анализ всех известных схем гашения [2, стр. 13-32], будут рассмотрены их базовые схемы и, при наличии, их оптимизированные версии.

А. Схема устройства гашения магнитного поля на постоянное / переменное сопротивление

Данная схема устройства гашения, представленная на рис. 1 основана на рассеивании энергии обмотки возбуждения на активном сопротивлении, которое может быть представлено в виде резистора или варистора.

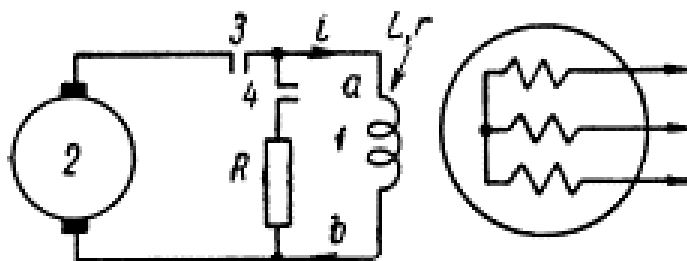


Рис. 1. Схема устройства гашения на активное сопротивление, где: 1 – обмотка возбуждения синхронного генератора, 2 – возбудитель, 3 – контакт возбудителя, 4 – гасительный контакт

При получении команды на гашение замыкается гасительный контакт 4 и размыкается контакт 3 возбудителя, ток с обмотки возбуждения (ОВ) 1 попадает на разрядное сопротивление R , тем самым происходит перенапряжение и ток начинает спадать до нулевого значения. В зависимости от типа активного сопротивления график тока при гашении будет отличаться. При гашении на резистор, ток экспоненциально спадает, это связано со снижением энергии в обмотке, которая в свою очередь снижается из-за падения тока. Из-за этого время гашения значительно увеличивается.

Для решения этой проблемы сопротивление в самом процессе гашения увеличивают за счет включения новых ветвей резисторов последовательно первичному разрядному сопротивлению [3], когда ток доходит до определенной уставки, которая рассчитывается из допустимого перенапряжения на обмотке в соответствии с ПУЭ 7 [4, разд. 1.8.15]. Тогда при подключении новой ветви с резистором будет происходить

очередной пик перенапряжения, а ток снова начнет спадать со скоростью, характерной для начала экспоненциального спада. Другим способом решения проблемы большого времени гашения будет гашение на варистор, в таком случае сопротивление на варисторе будет увеличиваться с снижением тока в ОВ, при точно подобранных параметрах варистора возможно получить максимально малое время гашения для данной схемы при установившемся перенапряжении. Тогда график тока в процессе гашения магнитного поля принимает более линейный вид и доходит до нуля значительно быстрее. В настоящее время подобные разрядные варисторы создаются за счет соединения дисков из карборунда, более известного как карбид кремния. Большая доля современных систем гашения основана именно на них, так как этот подход представляет низкую стоимость устройства гашения и простоту схемы. Слабая сторона этого метода заключается в самих характеристиках материала. Карборунд сильно ограничен в допустимой плотности тока, что приводит к увеличению числа дисков с ростом мощности возбудителя. Необходимость соблюдения допустимой плотности тока обусловлена тем, что при превышении значений этого параметра, диски начнут крошиться и окончательно придут в негодность, что недопустимо для устройства гашения магнитного поля.

В. Схема устройства гашения магнитного поля на дугогасительную решетку

Вторая по частоте использования схема устройства гашения магнитного поля ротора синхронного генератора — это схема гашения на дугогасительную решетку (ДГР), показанная на рис. 2.

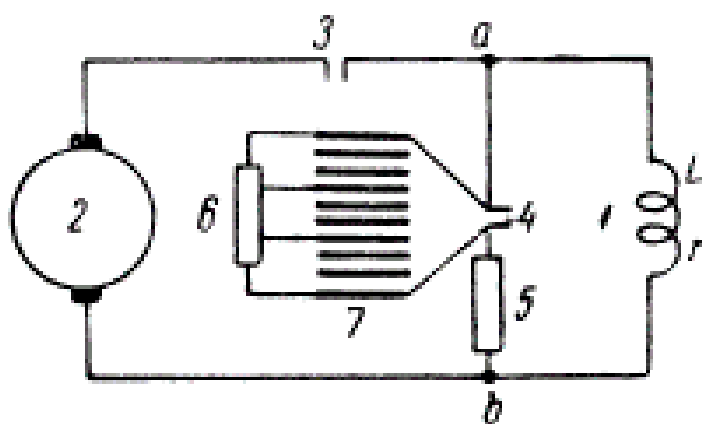


Рис. 2. Схема устройства гашения на ДГР, где: 1 – обмотка возбуждения генератора, 2 – возбудитель, 3 – контакт возбудителя, 4 – силовые контакты ДГР, 5 – токоограничивающий резистор, 6 – шунтирующий резистор, 7 – ДГР.

Гашение магнитного поля ротора начинается с замыкания силовых контактов 4 ДГР и размыкания контактов 3 возбuditеля, ток с обмотки возбуждения 1, проходя через токоограничивающий резистор 5, попадает на ДГР 7 и образует дугу на разомкнутых силовых контактах. Дуга затем разделяется на элементарные маленькие дуги, которые гасятся о пластины решетки. Для предотвращения явления срыва тока, при котором ток резко падает до нуля и резко растет напряжение, в схему включен шунтирующий резистор 6. Схема изначально показывала отличные результаты по времени гашения и значительно обгоняла схему устройства гашения на активное сопротивление, максимально приблизившись к параметрам теоретического оптимального гашения, которые определялись при экспоненциально растущем разрядном сопротивлении при постоянном допустимом перенапряжении, где ток вел себя по линейному закону. Схема имеет два варианта подключения – параллельное и последовательное подключение (относительно ОВ). При последовательном подключении исключается необходимость токоограничивающего резистора и число контактов снижается до одного, остаются только силовые контакты ДГР, схема тем самым получается еще проще и надежнее. В настоящее время по этой схеме устроены автоматы гашения поля (АГП), в отличие от представленной на рис. 2, в схеме у ДГР появляется четыре катушки индуктивности, которые в начале процесса гашения создают радиальное магнитное поле, которое в свою очередь раскручивает дугу, равномерно нагревая решетки устройства. Такой подход позволил снизить температурные нагрузки на АГП, теперь температура в камере ДГР не превышала 200°С, а число возможных последовательных срабатываний устройства увеличилось. Несмотря на низкое время гашения, устройство не получило ожидаемой популярности из-за высокой стоимости и было быстро заменено на модифицированные устройства по схемам гашения на активное сопротивление.

С. Схема устройства гашения магнитного поля противовключением возбuditеля

В качестве метода гашения магнитного поля ротора синхронного генератора также рассматривалась возможность инвертирования полярности ОВ, это позволило бы не только погасить ток в цепи возбуждения, но и создать противодействующий момент, который останавливал бы ротор генератора. Схема предполагаемого устройства представлена на рис. 3.

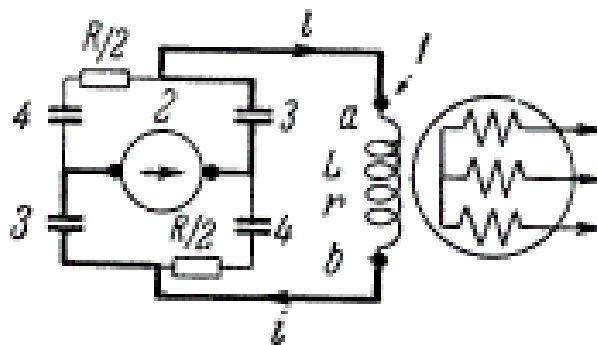


Рис. 3. Схема устройства гашения противовключением, где: 1 – обмотка возбуждения, 2 – возбудитель, 3 – первая группа контактов, 4 – вторая группа контактов.

Изначально в схеме замкнуты контакты первой группы 3, а контакты второй группы 4 разомкнуты. При получении команды на гашение, происходит переключение групп контактов – контакты второй группы 4 замыкаются, а контакты первой группы 3 размыкаются. В цепь также включается отдельное сопротивление $R/2$ с обеих сторон возбудителя, на этом этапе полярность обмотки уже инвертирована. Метод сам по себе не требовал больших материальных затрат, однако был сильно ограничен в применении. Генераторы большой мощности, для которых нужно подобное устройство гашения, уже изначально используют в основе своих систем возбуждения диодные и тиристорные преобразователи (выпрямители). При необходимости в гашении магнитного поля они могут быть переключены в инверторный режим и изменить полярность ОВ.

D. Схема устройства гашения магнитного поля по схеме Мандля

Схема устройства гашения магнитного поля по схеме Мандля, представленная на рис. 4, предназначена для гашения магнитного поля в каскадных системах возбуждения и также в основе своей работы содержит противовключение возбудителя.

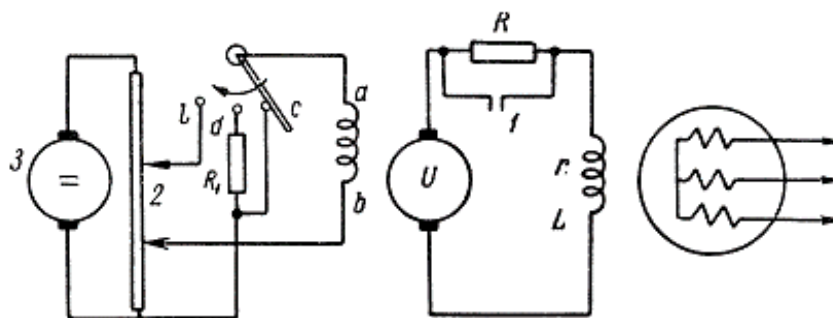


Рис. 4. Схема устройства гашения Мандля, где: 1 – контакт резистора, 2 – потенциометр, 3 – возбудитель

Процесс гашения начинается с введения разрядного сопротивления R путем размыкания контакта 1 резистора, затем происходит противовключение возбuditеля, но не сразу, а через переходные клеммы. Изначально обмотка возбуждения 1 подключена к клемме c , затем происходит переключение на клемму d с дополнительным сопротивлением, для снижения перенапряжения между витками, под конец происходит переключение на клемму l и завершается процесс противовключения и гашения. Схема отличается тем, что способна полностью размагнитить генератор, снизив остаточное ЭДС в обмотке до нуля. Тем не менее, схема помимо своей специфики использования, обладает большим количеством элементов, что негативно сказывается на ее надежности.

Е. Схема устройства гашения магнитного поля Р. Рюденберга

Схема устройства гашения магнитного поля Р. Рюденберга, представленная на рис. 5, также относится к схемам противовключения возбuditеля.

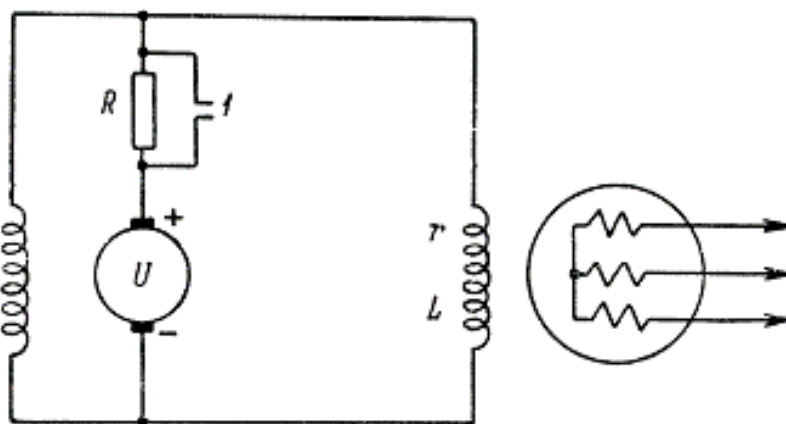


Рис. 5. Схема устройства гашения магнитного поля Р. Рюденберга, где 1 – контакт.

Принцип работы схемы заключается в следующем – процесс гашения начинается с размыкания контакта 1, это вводит в цепь так называемое «колебательное сопротивление», ток ротора замыкается через шунтовую цепь возбuditеля и изменяет его полярность. В следствии этого направление ЭДС и тока меняются на противоположенное. Схема также способна привести к полному размагничиванию генератора.

Д. Схема устройства гашения магнитного поля на выпрямитель

Схема устройства гашения магнитного поля на выпрямитель представлена на рис. 6.

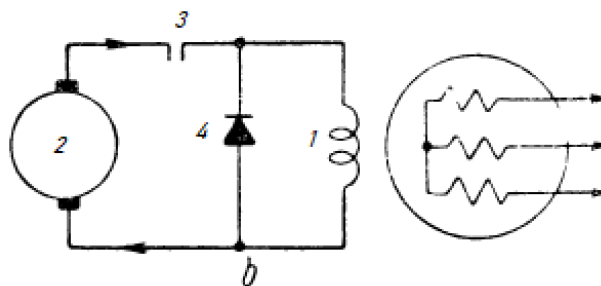


Рис. 6. Схема устройства гашения магнитного поля на выпрямитель, где 1 – обмотка возбуждения, 2 – возбудитель, 3 – контакт, 4 – диод (выпрямитель)

Процесс гашения в такой схеме начинается с размыкания контактов 3, обмотка возбуждения 1 замыкается через выпрямитель 4, где вся энергия поля, подобно схеме устройства гашения на активное карборундовое сопротивление, преобразуется в тепло, сопротивление выпрямителя растет с снижением тока в цепи. Несмотря на относительную простоту схемы, она может быть только применена для гашения генераторов малой мощности, так как производство полупроводников высокой мощности требует больших затрат ресурсов. Также в очередной раз поднимается проблема ограничения плотности тока для карбида кремния, которая ставит под вопрос габариты такого устройства и простоту его эксплуатации.

Г. Схема устройства гашения магнитного поля на электрическую емкость

Схема устройства гашения магнитного поля на электрическую емкость (конденсатор) показана на рис. 7.

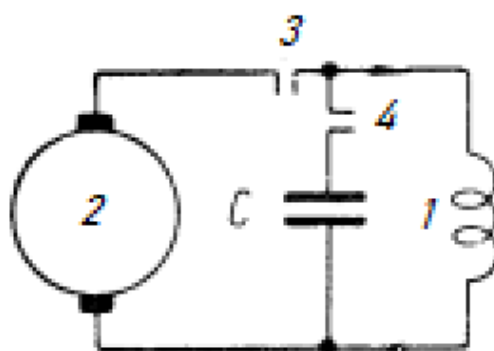


Рис. 7. Схема устройства гашения магнитного поля на конденсатор, где: 1 – обмотка возбуждения, 2 – возбудитель, 3 – контакт возбудителя, 4 – гасительный контакт

При работе данной схемы происходит не столько гашение магнитного поля, сколько накопление энергии поля в конденсатор C . При получении команды на гашение, контакт 3 размыкается, и обмотка возбуждения 1 замыкается на конденсатор

C , тем самым формируя колебательный контур, частота колебаний которого описывается формулой Томпсона. Ток в цепи возбуждения ведет себя по закону синуса, а напряжение по закону косинуса, при прохождении током нуля гасительный контакт 4 размыкается. Таким образом ток и магнитный поток в цепи равны нулю. Для генераторов малой мощности такая схема гашения показала лучшее время гашения, наиболее близкое к оптимальным значениям.

Для данной схемы также накладывается множество ограничений, теперь время гашения, которое рассчитывается из $\frac{1}{4}$ периода колебаний, напрямую связано с номиналом емкости и, казалось бы, с уменьшением емкости будет снижаться и время гашения. Однако это будет невозможно, так как при подаче на малую емкость большой энергии, конденсатор не выдержит, набухнет и его разорвет. Связано это с тем, как себя ведут конденсаторы в цепи постоянного тока. Когда на них подается постоянный ток, конденсаторы накапливают заряд. При полной зарядке конденсатор прекращает пропускать ток, сопротивление станет стремиться к бесконечности. Для схемы это будет выглядеть как разрыв цепи, напряжение скакнет выше допустимого значения, пробьет изоляцию и разорвет конденсатор. Поэтому емкость конденсатора рассчитывается через энергию поля ОВ. На генераторах высокой мощности необходимая емкость может достигать нескольких десятков Фарад. Что приводит к сложности создания устройства гашения с высокой номинальной емкостью на подходящую для цепи возбуждения номинальную мощность.

В настоящее время такие схемы не используются, а конденсаторы в схемах устройств служат скорее для предотвращения перенапряжений при коммутации, а не как самостоятельные элементы гашения. Тем не менее, создание таких схем возможно.

Н. Расчет устройства гашения магнитного поля на конденсатор

В данном пункте на примере турбогенератора ТВВ-320-2 будет рассчитана и подобрана необходимая емкость. Расчет начинается с приравнивания двух формул для расчета энергии. Одна из них определяет энергию поля в обмотке, вторая определяет энергию в конденсаторе:

$$W = \frac{L \cdot i^2}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

где W – энергия, L – индуктивность обмотки возбуждения, i – ток в цепи возбуждения, C – емкость, U – напряжение в цепи возбуждения.

При известных индуктивности и токе ОВ получаем энергию поля равную 1,38 МДж. Зная это, можно вывести формулу для определения минимально необходимой емкости:

$$C = \frac{2W}{U^2}$$

Минимальная необходимая емкость для гашения магнитного поля в роторе турбогенератора ТВВ-320-2 составляет 14 Ф. Это огромное значение и его можно достичь засчет конденсаторных батарей, но даже самые мощные батареи имеют емкости порядка 1-10 мФ, понадобится несколько тысяч таких батарей, потому нецелесообразно их использовать. Другим вариантом будет использовать ионисторы – конденсаторы высокой емкости. Российская компания ООО «Ультраконденсаторы Феникс» предоставляет огромный список как самих ионисторов на разные емкости и мощности, так и сборочные батареи на высокую мощность. При использовании 11 конденсаторных сборок ССКБК-1,3-670 общей емкостью 1,3 Ф и номинальным напряжением 670 В, удастся достичь требуемых параметров для схемы гашения. В случае использования таких батарей остается определить время гашения для ТВВ-320-2 через следующую формулу:

$$t_{\text{гаш}} = \frac{1}{2} \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Тогда время гашения магнитного поля составит 3,38 сек, это время считается очень большим, так как у других схем и способов время варьируется от 0,05 до 1 сек. Такое время охарактеризовано высокой емкостью, которая связана с необходимостью поглощения всей энергии ОВ.

Однако, если установить параллельно конденсатору разрядное сопротивление, то открывается возможность использовать емкость значительно меньшего номинала. В данном случае колебательный контур уже будет рассчитываться как затухающий. Важную роль в данном случае играют такие параметры как добротность контура и частота резонанса. Важно соблюдать определенное отношение реактивного и активного сопротивления в цепи возбуждения, а также держать частоту контура чуть ниже резонансной частоты, это обеспечит преобладание емкостного сопротивления в

процессе гашения [5, стр. 26]. При выполнении перечисленных условий конденсатор будет накапливать часть энергии обмотки, а другая часть будет рассеиваться на разрядном резисторе, произойдет линейное снижение графика тока в процессе гашения. Более того, за счет преобладания емкостного сопротивления при формировании колебательного контура, напряжение отстает от тока на 90° , т.е. перенапряжение произойдет только когда ток уже опустится до половины своего значения, что дает возможность использовать разрядное сопротивление в 2 раза превышающее расчетное активное сопротивление для схемы устройства гашения на резистор. График тока и напряжения в схеме устройства гашения на конденсатор с разрядным резистором представлен на рис. 8.

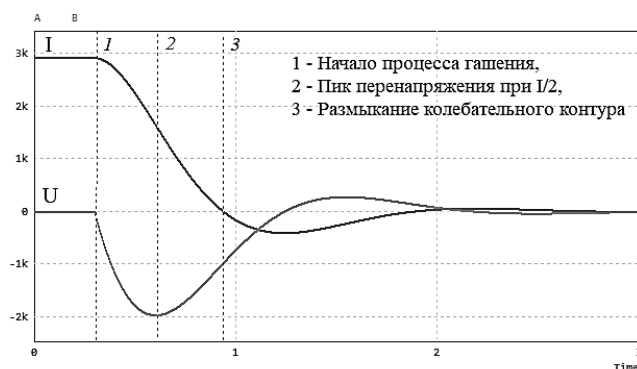


Рис. 8. График тока и напряжения для устройства гашения магнитного поля на конденсатор и разрядное сопротивление

Моделирование и перерасчеты производились для 10 конденсаторных батарей постоянного тока ДКМЖ-S суммарной емкостью 200 мФ, эти же батареи используются в железнодорожных преобразователях тяги, потому способны выдержать высокие импульсные токи и напряжения (2600 В и 60 кА в течении 1 минуты не более 1 раза за сутки). По стоимости эти батареи примерно в 10 раз дешевле ионисторных сборок, они также превосходят ионисторы по надежности. При разрядном сопротивлении равном 1,2 Ом, время гашения для такого варианта устройства составило 0,64 сек, что в 5,28 раз быстрее устройства гашения магнитного поля на ионисторы.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены различные схемы устройств гашения, были выделены самые используемые схемы, такие как схемы устройств гашения на активное сопротивление и на ДГР. Также были выделены такие схемы, которые не получили массового распространения из-за своей неактуальности и ненадежности, такие как

схемы устройств гашения магнитного поля противовключением возбuditеля (схемы Мандля и Рюдeнберга), схемы гашения магнитного поля на выпрямитель и на электрическую емкость.

Помимо аналитической части в статье представлен расчет устройства гашения магнитного поля на электрическую емкость на примере турбогенератора ТВВ-320-2, где в качестве емкости были использованы батареи ионисторов общей емкостью 14,3 Ф, итоговое время гашения которой составило 3,38 сек, чем была показана нерентабельность схемы, из-за которой в литературе она описывается как «неосуществимая». Эта схема была оптимизирована с целью снижения затрат и увеличения скорости протекания процесса гашения магнитного поля. В схему был добавлен разрядный резистор на 1,2 Ом и конденсаторные батареи постоянного тока общей емкостью 200 мФ. В итоге стоимость схемы была снижена, повышена надежность за счет использования сухих конденсаторных батарей, уменьшено время гашения в 5,28 раз до 0,64 сек.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Фонд содействия инновациям за финансовую поддержку данной исследовательской работы в рамках грантовой программы УМНИК 2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21558-2018. Межгосударственный стандарт. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – Введ. 2019-06-01. – М.: Стандарт информ, 2019. – 18 с.
2. Брон О. Б. Автоматы гашения магнитного поля. –М.: Изд-во Государственное Энергетическое Издательство, 1961. – 138 с.
3. Патент РФ № 2005111665/09, 19.04.2005. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) // Патент России № 2282925. 2006. Бюл. №24. / Крекер Е. Я., Гольдштейн М. Е., Андреев А. Н.
4. Правила устройства электроустановок. Издание 7. Изд-во Норматика, 2022. – 456 с.
5. Резонансные свойства RLC-цепей: [учеб. -метод. пособие] / [сост. В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова, Ю. А. Кандрина]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 64 с.

Юшкова О.А., Пронин Е.А., Саяхов И.Ф., Гарипов И.Р.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ СО СВЕРХВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ: ДОСТИЖЕНИЯ 2023 ГОДА¹

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №24-29-00177.

Аннотация: Электрические машины с постоянными магнитами являются одним из самых привлекательных решений в задачах, где необходимы небольшие массогабаритные показатели и высокая удельная мощность. Однако достижение удельной мощности 5-7 кВт/кг для электрических машин с постоянными магнитами уже можно считать выдающимися характеристиками.

Однако различные компании и исследовательские группы на этом не остановились и продолжают работу по достижению более высоких удельных показателей. В данной работе представлена информация о зарубежных достижениях в области электрических машин с постоянными магнитами в 2023 году, которые получили освещение в новостных источниках или научно-технической литературе.

Ключевые слова: электрические машины с постоянными магнитами, обзор, достижения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины с постоянными магнитами привлекли большое внимание в областях, где массогабаритные и выходные удельные показатели являются критически важными, например, автомобильная [1] и аэрокосмическая промышленности [2]. Указанные области имеют большую заинтересованность в увеличении выходной удельной мощности. Достижение 5-7 кВт/кг в электрических машинах с постоянными магнитами еще несколько лет назад считалось показателем передового уровня разработчиков и свидетельствовало об их высоких компетенциях [3]. В настоящее время 5-7 кВт/кг для электрических машин с постоянными магнитами всё еще является выдающимся показателем, однако промышленность и исследовательское сообщество не стоит на месте и продолжает дальнейшие совершенствования конструкций электрических машин с постоянными магнитами для достижения более высоких удельных показателей. В данной статье представлены

зарубежные достижения в области проектирования и разработок электрических машин с постоянными магнитами в 2023 году, которые были представлены в научно-технической литературе и в новостных источниках.

II. МЕТОД ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ

Для поиска информации по новостным источникам использовался *Google Search* в вкладке *News* [4]. Поиск научно-технических публикаций осуществлялся в *Google Scholar* [5]. Для охвата более широкого диапазона публикаций в обоих поисковиках используются поисковые запросы «*permanent magnet*», «*magnet*», «*electric machine*», «*electric motor*», «*electric generator*», «*kW/kg*» в различных комбинациях. Срок поиска – от начала 2023 года. В результате в обзор включаются только те работы, где удельная мощность электрических машин с постоянными магнитами превышает 7 кВт/кг.

III. НОВОСТНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

A. HPDM-30 от H3X

Компания *H3X* официально выпустила электропривод под названием *HPDM-30* мощностью 33 кВт при весе 4.1 кг (рис. 1) [6].



Рис. 1. Концептуальный прототип *HPDM-30* [6]

Такие показатели стали возможными за счет особой рубашки охлаждения, проектирование и изготовление которой осуществлялось при помощи аддитивных технологий.

Также стоит отметить другие особенности конструкции. К ним относятся большой коэффициент заполнения паза, усовершенствованное производство пакетов

статора и ротора и отсутствие необходимости использования резольвера [6].

В. Электродвигатель от ZeroAvia

ZeroAvia известен в аэрокосмической отрасли как британско-американский разработчик водородно-электрических самолетов. На одном из своих мероприятий представили свой прототип мощностью 1.8 МВт, который располагался на испытательном стенде *HyperTruck ZeroAvia* на базе 8-колесного грузовика (рис. 2). Представленная конфигурация состоит из двух радиальных электрических машин с постоянными магнитами мощностью 900 кВт каждая с водородным охлаждением, работающие при 20000 об/мин и имеющие удельную мощность 15 кВт/кг [7].



Рис. 2. Концептуальный прототип *HDPM-30* [7]

С. Электрические машины от Wright Electric

Wright Electric раскрыли результаты своих испытаний для мотора-генератора с постоянными магнитами, разрабатываемого в рамках программы *NASA* (рис. 3). Для улучшения массогабаритных характеристик и увеличения выходных удельных показателей используются высокочастотные инверторы из карбида кремния и внутрипазовое масляное охлаждение обмотки статора. В пике на динамометрическом стенде удалось получить мощность 1 МВт. По словам гендиректора, удельная мощность составила около 12 кВт/кг [8].

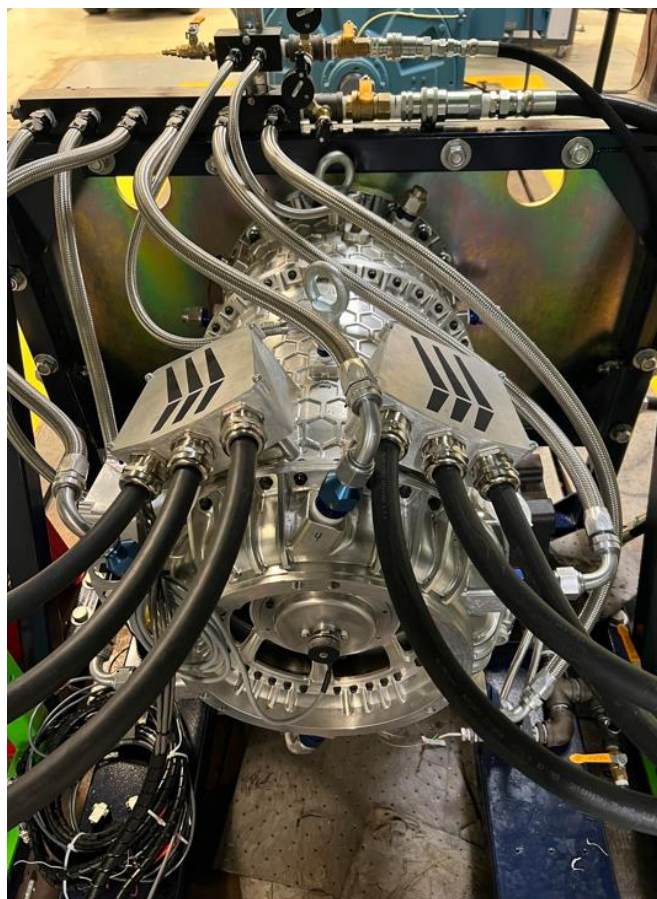


Рис. 3. Динамометрический стенд с электрической машиной [8]

Во время Саммита энергетических инноваций *Wright Electric* представили макет электрической силовой установки мощностью 2 МВт и заявленной удельной мощностью 10 кВт/кг, разрабатываемую в рамках программы *ARPA-E ASCEND*. По заявлению *Wright Electric*, данный двигатель может быть масштабирован в диапазоне 0.5-4 МВт для различных задач (рис. 4) [9].



Рис. 4. Динамометрический стенд с электрической машиной [9]

D. *Hyper SSR*

На китайском автомобильном рынке представлен самый дорогой полностью электрический суперкар, в котором используется высокопроизводительный интегрированный электропривод с постоянными магнитами с удельной мощностью 10.5 кВт/кг и КПД 94.5% (рис. 5). Максимальная мощность достигает 900 кВт при 22000 об/мин [10-12]. Подробная информация про электрическую машину отсутствует.



Рис. 5. Hyper SSR [12]

IV. НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

A. *Коллектив из Франции*

Коллективом из Франции опубликована работа, целью которой было повышение удельной мощности осевой синхронной машины с постоянными магнитами, имеющей двойной ротор. Суть работы заключалась в использовании различных магнитных материалов для оптимальной конструкции магнитных цепей статора и ротора с целью улучшения характеристик. Рассматривались неориентированная зернистая электротехническая сталь *Si-Fe*, зернисто ориентированная электротехническая сталь *Si-Fe (GOES)* и железо-кобальтовая электротехническая сталь *Permendur (Co-Fe)*. Смешанная структура *GOES-Co-Fe* позволяет достичь номинальной удельной мощности 10 кВт/кг [13].

B. *Массачусетский технологический институт*

На конференции *AIAA Aviation 2023* Массачусетский технологический институт раскрыл некоторые подробности своей работы над интегрированным электроприводом мегаваттного класса с воздушным охлаждением. В добавок к представленным докладом, опубликована большая обзорная работа, кратко описывающая критические

технологии разрабатываемого устройства. Среди них выделены высокоскоростной ротор с магнитной сборкой Хальбаха, статор с низкими потерями, теплообменник и силовая электроника.

С учетом веса электромашин, системы силового преобразователя, системы терморегулирования и несущей конструкции удельная мощность всего электропривода оценивается в 10.5 кВт/кг (рис. 6).

В статье приведено обоснование конструкции электропривода для высокой удельной мощности. Рассмотрены 4 различные конструкции (рис. 7).

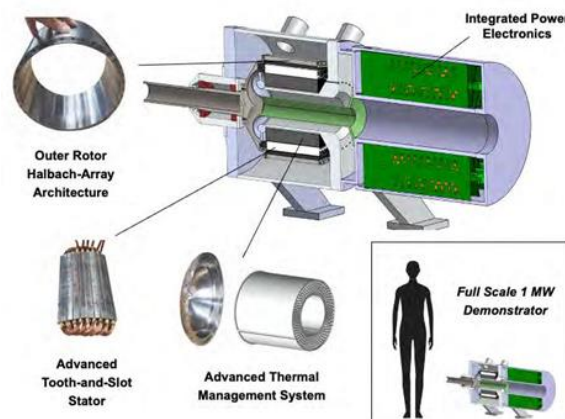


Рис. 6. Критические технологии демонстратора [14]

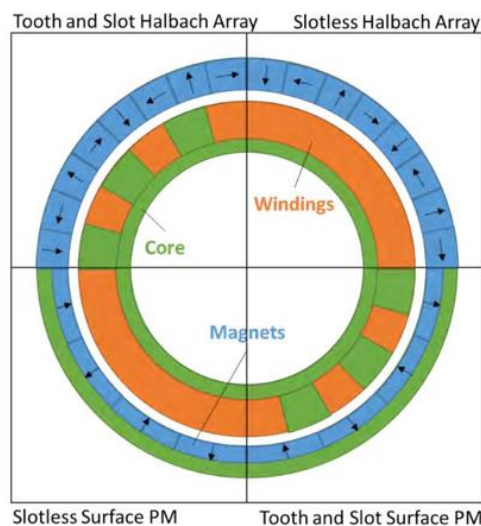


Рис. 7. Критические технологии демонстратора [14]

Их сравнение показывает, что наиболее эффективным вариантом является статор с зубцами и пазами со сборкой Хальбаха. График изменения удельной мощности от мощности для всех конструкций показывает, что при увеличении мощности жидкостное охлаждение оказывается эффективнее (рис. 8).

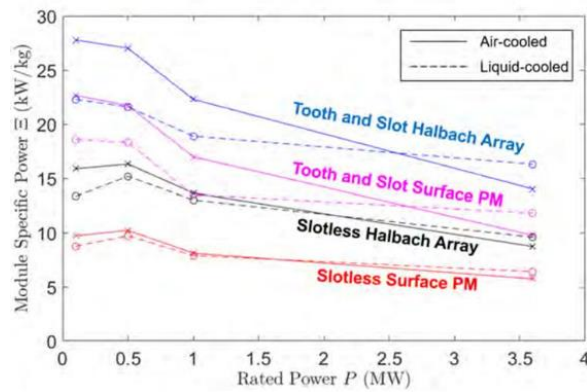


Рис. 8. Сравнение конструкций [14]

Конструкция проходит большую оптимизацию (рис. 9).

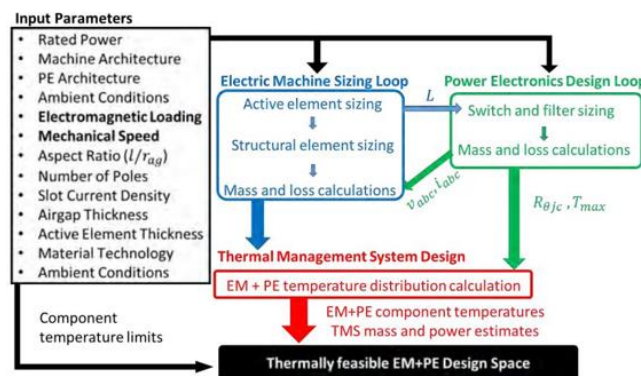


Рис. 9. Алгоритм оптимизации [14]

Система терморегулирования с воздушным охлаждением представлена на рис. 10.

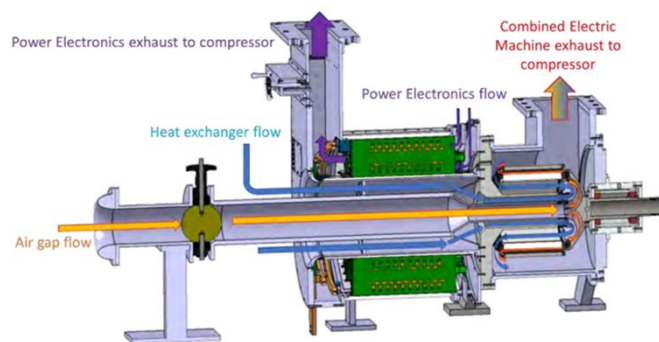


Рис. 10. Система терморегулирования [14]

Отдельно выделены вопросы производства и сборки электропривода. Обсуждаются вопросы дальнейшего масштабирования демонстратора [14].

С. *Норвежский университет науки и технологий*

В журнале *IEEE Access* опубликована работа Норвежского университета науки и технологий, где описывается проектирование высокоскоростного генератора мощностью 2.5 МВт со скоростью вращения 15000 об/мин и напряжением 3 кВ. Восьми

полюсный генератор достигает удельной мощности 24.4 кВт/кг по активной части и КПД более 99% при плотности тока 15 А/мм². Предположение об использовании фильтра между генератором и преобразователем частоты для улучшения эффективности не подтвердилось. Раскрыты применяемые материалы для различных частей электрической машины (таблица 1).

Таблица 1

Используемые материалы

<i>Часть</i>	<i>Материал</i>
Постоянные магниты	NdFeB (N50) сборки Хальбаха
Кожух ротора	Карбоновый бандаж
Обмотка якоря	Медь
Концевые обмотки	Медь
Изоляция обмотки	Nomex 993
Ярмо статора	10JNEX900

Помимо этого, исследована другая конструкция, которая покажет влияние увеличения плотности тока до 20-27.5 А/мм². Это решение может существенно повысить удельную мощность по активной части – 35-40 кВт/кг. Выбор 12-полюсной конструкции может помочь преодолеть порог 40 кВт/кг по активной части (таблица 2).

Таблица 2

Сравнение между двумя машинами [15]

Параметр	Версия	
	<i>Старая</i>	<i>Улучшенная</i>
Номинальная электрическая мощность, МВт	2.5	3.6
Номинальная скорость вращения, об/мин	15000	
Электрический крутящий момент, Нм	1592	1592
Коэффициент мощности	0.992	0.991
Напряжение шины постоянного тока, В	3000	
Количество полюсов	8	12
Электрическая частота, Гц	1000	1500
Количество фаз	4 x 3	4 x 3
Фазное напряжение (действующее значение), В	640.3	922.9
Фазный ток (среднеквадратичное значение), А	328	
Плотность тока статора (среднеквадратичное значение), А/мм ²	15	27.5
Номинальная эффективность, %	99.4	98.5
Общая удельная мощность, кВт/кг	21.3	12.2
Активный удельный крутящий момент (**), Нм/кг	27.1	15.5
Общий удельный крутящий момент, Нм/кг	13.6	7.8

V. ВЫВОД

Электрические машины с постоянными магнитами прочно укрепились в автомобильной и аэрокосмической отрасли. Научные работы и новостные публикации показывают, что для автомобильной промышленности уже применяются электрические машины с постоянными магнитами с удельной мощностью выше 10 кВт/кг. В свою очередь аэрокосмическая промышленность нацелена на электрические машины с постоянными магнитами с удельной мощностью более 15 кВт/кг. В большинстве новостей и научных публикаций, как правило, не раскрываются основные положения, касающиеся конструкций, кроме общих моментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Ramesh and N. C. Lenin, "High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles—Comprehensive Review Based on Material Technology," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 11, pp. 1-21, Nov. 2019, Art no. 0900121, doi: 10.1109/TMAG.2019.2929145.
2. E. Sayed et al., "Review of Electric Machines in More-/Hybrid-/Turbo-Electric Aircraft," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 4, pp. 2976-3005, Dec. 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3089605.
3. A. El-Refaie and M. Osama, "High specific power electrical machines: A system perspective," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 88-93, March 2019, doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00012.
4. «Google». – URL: <https://www.google.ru> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
5. «Академия Google». – URL: <https://scholar.google.com> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
6. «H3X launches HPDM-30 high power density electric motor». – URL: <https://www.3dprintingmedia.network/h3x-launches-hpdm-30-high-power-density-electric-motor/> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
7. «Alaska Airlines and ZeroAvia developing world's largest zero-emission aircraft». – URL: <https://www.zeroavia.com/alaska-airlines-zero-emission-q400> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
8. «Wright Achieves 1 Megawatt In Aircraft Electric Motor Tests». – URL: <https://aviationweek.com/aerospace/advanced-air-mobility/wright-achieves-1-megawatt-aircraft-electric-motor-tests> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
9. «Wright presents the model of its 2 MW electric propulsion unit». – URL: <https://aircosmosinternational.com/article/wright-presents-the-model-of-its-2-mw-electric-propulsion-unit-3805> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
10. «Aion Hyper SSR». – URL: <https://www.licarco.com/aion-hyper-ssr> (дата обращения: 01.12.2023 г.).

11. «售128.6-168.6万元昊铂SSR正式上市». – URL: <https://www.autohome.com.cn/news/202310/1289152.html#pvareaid=102624> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
12. «最贵国产纯电超跑量产上市! 128万起售, 506公里续航, 零百加速1秒9». – URL: <https://www.eet-china.com/mp/a257304.html> (дата обращения: 01.12.2023 г.).
13. M. A. Hebri, A. Rebhaoui, G. Bauw, J-P. Lecointe, S. Duchesne, G. Zito, A. Abdenour, V. M. Santos, V. Mallard, A. Maier, "Power density improvement of axial flux permanent magnet synchronous motor by using different magnetic materials," in *COMPEL- The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 929-946, 2023, doi: 10.1108/COMPEL-09-2022-0318.
14. D.A. Perreault, "Megawatt-Class Electrical Machine Technology Demonstrator For Turbo-Electric Propulsion", 2023.
15. E.K. Mikkelsen, A. Matveev and J. K. Nøland, "High-Speed MW-Class Generator With Multi-Lane Slotless Winding for Hybrid-Electric Aircraft," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84759-84771, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3302772.

Терезулов Т.Р., Валеев А.Р.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

АЛЮМИНИЕВЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: В данной статье приведены результаты научно – технической работы по замене медных обмоток статоров серии асинхронных двигателей. Показана возможность применения алюминиевых обмоток статоров, без значительного ухудшения основных характеристик двигателей.

Ключевые слова: алюминиевая обмотка статора, асинхронные двигатели, обмотка электрических машин.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается устойчивое повышение стоимости цветных металлов, что вызывает рост себестоимости электротехнической продукции. Дополнительное осложнение вызывает наложение санкций недружественными государствами. Снижение себестоимости продукции предприятий и повышение производительности труда является важной задачей.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Алюминий является самым распространенным металлом в земной коре и составляет 7,45 % ее массы. Для сравнения следует отметить, что меди в земной коре содержится лишь 0,0001 % ее массы. Содержание алюминия в руде достигает 40-60%.

Несмотря на широкое распространение в природе, алюминий удалось получить в количестве, необходимом для определения его основных свойств, только в 1845 г. В 1910 г. во всем мире было произведено 10 тыс. т алюминия, в 1938 г. – 567 тыс. т, а в настоящее время производство алюминия достигает нескольких миллионов тонн в год.

При изготовлении электродвигателей алюминий первоначально нашел применение для литых короткозамкнутых обмоток роторов (беличьих клеток). Алюминиевые обмотки широко применяются для роторов электрических машин мощностью 100 кВт и выше; изготовлены опытные электродвигатели в которых алюминиевая беличья клетка ротора весит более 120 кг.

Идея замены медного обмоточного провода не нова. Еще ГОСТ 9761-61 Провода алюминиевые обмоточные распространялся на алюминиевые провода обмоточные

применяемые в электро-аппарато-машиностроении предусматривают промышленное изготовление обмоточных алюминиевых проводов. На протяжении многих десятилетий производится большое разнообразие трансформаторов с алюминиевыми обмотками, которые составляют достойную конкуренцию трансформаторам с медными обмотками.

В связи с опережением темпа выпуска электрических машин по сравнению с темпом выплавки меди, годовой прирост производства которой составляет 5-6 %, помимо применения алюминия для изготовления обмоток роторов, разработаны конструкции и изготавливаются электродвигатели, в которых обмотка статора выполнена алюминиевым проводом.

Помимо основного исполнения с медной обмоткой статора и короткозамкнутым ротором, одной из модификаций является выполнение обмотки статора из алюминиевого провода, причем электродвигатели выполняются в размерах электродвигателя большей длины этого же габарита, что вызывается дополнительной разницей в удельных сопротивлениях меди и алюминия.

Шкала номинальных мощностей и диапазоны частот вращения электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора такие же, как у электродвигателей основного исполнения, но номинальные мощности на одну ступень ниже, чем для соответствующих по типоразмеру электродвигателей основного исполнения.

При этом перевод на алюминиевую обмотку электродвигателей позволяет высвободить до 50% общего количества меди, расходуемой на изготовление электродвигателей. Недостатком медной обмотки является значительный удельный вес меди, вследствие чего повышается стоимость и вес обмотки и самой электрической машины. *Алюминиевая обмотка* в асинхронном двигателе примерно в два раза легче и на 20-40 % дешевле медной.

Поскольку у электродвигателей первой и второй длины каждого габарита совпадают установочные размеры (за исключением расстояния между отверстиями вдоль оси вращения электродвигателя, что не имеет существенного значения для монтажа), сохраняется взаимозаменяемость электродвигателей с медными и алюминиевыми обмотками.

Утверждается, что значение $\cos\varphi$ электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора практически находится на уровне значений у двигателей с медной обмоткой, а значение КПД ниже в среднем на 1,2% [1]. Однако проведенные расчеты показывают, в

отдельных случаях, значение КПД не отличается, а в некоторых случаях даже выше. Что объясняется несколько низкими удельными электромагнитными нагрузками. Отношения начального пускового, максимального и минимального моментов вращения к номинальному, а также начального пускового тока к номинальному практически соответствуют значениям для электродвигателей основного исполнения той же мощности и частоты вращения. Значение махового момента соответствует значениям, относящимся к электродвигателям основного исполнения данного габарита.

По конструктивному исполнению электродвигатели с алюминиевой обмоткой статора отличаются от электродвигателей основного исполнения только обмоточными данными при совпадении установочно присоединительных размеров.

Для сохранения уровня допустимых значений превышения температуры обмотки статора, а также скорости нарастания температуры обмотки статора при пуске электродвигателей с алюминиевой обмоткой желательны отличия от электродвигателей основного исполнения (с медной обмоткой статора) не только обмоточными данными, но также и размерами паза.

Хотя алюминий уступает меди как материал для изготовления обмотки статора и переход на алюминий является обоснованным решением, следует отметить, что замена медных проводов алюминиевыми, рентабельна и технически целесообразна, алюминий значительно легче меди, алюминиевый провод с сечением в полтора раза больше, чем медный провод, равноценен ему по электрическим свойствам. Мягкость алюминия, по сравнению с медным проводом, позволяет упростить технологию изготовления катушек обмотки, либо непосредственную намотку обмоток в пазы.

В связи с этим, использование алюминиевой обмотки облегчает и удешевляет электродвигатель. При сравнении стоимости обмоточных материалов и изоляции, припоя и флюса, так же, как и расход остальных материалов практически не изменяется.

В настоящее время промышленностью освоен широкий спектр обмоточных алюминиевых проводов в эмалевой изоляции. Проведено большое количество работ по сравнению и выбору материала для алюминиевых обмоток [2]

Удельное электрическое сопротивление меди намного меньше, чем у алюминия, однако при анализе свойств алюминиевых и медных эмалированных проводов, обладающих одинаковым сопротивлением, площадь поперечного сечения и диаметр алюминия больше, чем у меди, что является недостатком при миниатюризации. При этом

масса таких проводов намного меньше, что является особенно важным фактором в тех случаях, когда снижение массы имеет критическое значение. Стоимость алюминия намного меньше стоимости меди. Рассмотрение стоимости 1 км эмалированного провода показывает, что цена эмалированных алюминиевых проводов намного меньше цены медных проводов, несмотря на больший объём переработанного материала и на большее количество использованного лака. Теплоёмкость алюминия примерно в два раза больше, чем у меди. Это очень важно, поскольку для увеличения температуры той же массы алюминия требуется намного больше энергии. Это обстоятельство имеет большое значение в электрических устройствах из-за больших плотностей тока и температурных перегрузок.

Важное значение имеют параметры, связанные с технологическими процессами изготовления проводов или обмоток, таких, как механические свойства, они имеют большое значение для процесса нанесения эмали и во время изготовления обмоток. В то время как расчётное упругое последствие алюминия меньше, чем у меди (требуется только изменение настройки оборудования), некоторые механические свойства алюминия создают сложности при намотке тонких проводов. Существуют и другие причины, по которым алюминию отдаётся предпочтение для изготовления обмоточных проводов [3].

Другой особенностью эмалированных алюминиевых проводов является более продолжительный срок их службы. Слой изоляции на проводах не является идеально однородным. Существуют небольшие дефекты, трещины и микроотверстия, которые делают возможным контакт окружающей атмосферы и металлической жилы. Во время процесса вулканизации возникают некоторые газообразные продукты, которые могут вступать в реакцию с металлом, что приводит к образованию окисей металла на граничном слое между металлом и изоляцией. На поверхности алюминия быстро образуется очень тонкий слой окислов, который защищает внутренние части от окисления, а на поверхности меди образуются различные виды пористых окислов, и процесс окисления проникает глубоко в материал. При этом локальные поперечные сечения медного проводника уменьшаются, температура повышается. Таким образом, как показали детальные исследования [4], алюминий обладает большим сроком службы.

Ещё одной проблемой являются структура и свойства материала для частных применений. Эмалированные провода достаточно мягкие, но тепловые удары и продолжительный нагрев вследствие протекания в структуре материала определённых

физических процессов, сопровождающихся диффузией (причина — нагрев) и могут вызывать микроскопические изменения [5]. Прочность на разрыв уменьшается. Исследования показали, что в процентном отношении у медных проводов уменьшение прочности на разрыв больше, чем у алюминиевых [6].

Для изготовления эмалированных проводов может быть использован не только чистый алюминий, но и алюминий со специальными микродобавками; также возможно применение сплавов алюминия [7]. Существуют четыре причины, по которым вместо чистого алюминия используют сплавы и легированный алюминий. Первая — лучшие механические свойства сплавов в окружающих условиях хорошо подходят для процесса намотки, когда провод передвигается при натяжении и изгибается при формировании витков катушки. Такие материалы в большей степени позволяют достигать соответствия продукта техническим требованиям. Вторая — лучшие механические свойства сплавов при высоких температурах. Во время нанесения эмали провод нагревается и дополнительно растягивается при вулканизации лака, при этом процессы пластической деформации и ползучести вызывают изменения диаметра провода. Третья причина — более высокая температура рекристаллизации сплавов. До нанесения лака на провод материал рекристаллизуется в паровой сушилке, и сплав обладает более высокой прочностью на разрыв в начале процесса нанесения эмали. Четвёртая причина — некоторые сплавы обладают более высокой пластичностью при волочении по сравнению с чистым алюминием. Это имеет большое значение для электротехнических устройств, в которых используются тонкие провода (диаметр от 0,8 до 0,2 мм). Перечисленные выше причины гарантируют соответствующее эксплуатационным требованиям поведение провода в процессах волочения, эмалирования и производства электротехнических узлов с обмоточными проводами.

Группа сплавов, представляющая больший интерес, чем чистый алюминий, — сплавы AlFe. Анализ диаграммы состояний Al — Fe показывает, что растворимость железа в алюминии мала (около 0,04 % при эвтектической температуре и пренебрежимо мала при температуре окружающей среды). Вследствие малой растворимости железа в алюминии имеет место лишь небольшое уменьшение электропроводности. Добавка железа к алюминию увеличивает пластичность при волочении материала. В чистом техническом алюминии в небольших количествах присутствует кремний. После рекристаллизации он образует микрочастицы кремния, которые являются хрупкими,

ухудшают качество алюминия и ограничивают пластичность при волочении. Железо образует новую фазу $AlFeSi$, и эта проблема устраняется. Железо может изменить структуру во время литья, однако при уровнях концентрации, представляющих интерес для данной работы, этот эффект незначителен. На рис. 1 показаны изменения предельной разрывной прочности и удлинения во время испытаний на растяжение как функция общего усилия растяжения во время процесса волочения сплавов $AlFe$ с различными уровнями концентрации железа (0,5 % Fe и 1,1 % Fe). Для сравнения показаны такие же зависимости для чистого алюминия (0,07 % Fe) [8].

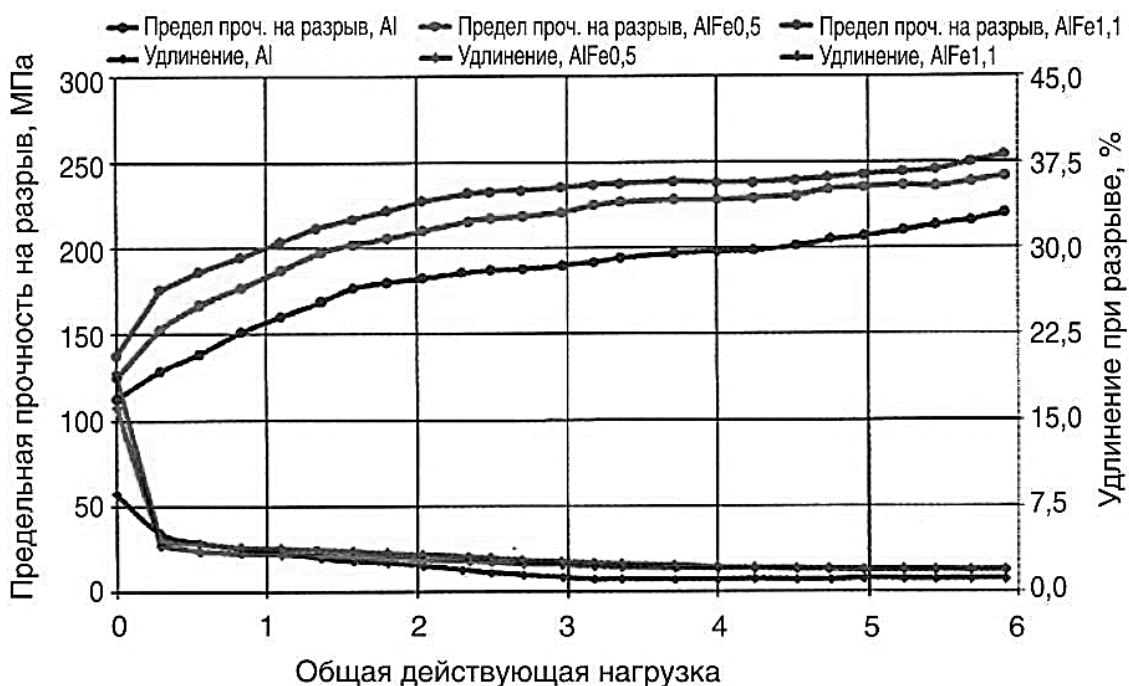


Рис. 1. Предельная прочность на разрыв и удлинение — общая зависимость от величины натяжения для сплавов Al и AlFe

Сложность вызывает и надежное присоединение выводов к алюминиевым проводникам и необходимость использования сварки. Существуют, и достаточно освоены в производстве, различные способы присоединения выводов для *алюминиевых обмоток* из проводов малых компактных сечений (примерно до $6 \times 7 \text{ мм}^2$) возможно оконцевание, производящееся медными контактными флажками, приваренными способом холодной сварки, либо во время намотки *алюминиевой обмотки* медные переходники приваривают к первому и последнему виткам обмотки ручными сварочными клещами КС-б непосредственно у обмоточных станков. Клещи обеспечивают холодную стыковую сварку круглого алюминиевого провода сечением до 6 мм^2 с медным сечением до 4 мм^2 в

зависимости от установленных плашек. Существуют и другие способы соединений, выходящие за рамки данной статьи.

Однако, учитывая достаточные преимущества, кафедра электромеханики произвела научно-исследовательскую работу по теме «Разработка серии асинхронных двигателей на базе АИМЛ с алюминиевой обмоткой статора».

Целью работы являлся пересчёт обмоточных данных серии асинхронных электродвигателей АИМЛ (АИМЛ112М4, АИМЛ100L2, АИМЛ71В4, АИМЛ71А4, АИМЛ63В4, АИМЛ63А4) с заменой медной обмотки статора на алюминиевую [9, 10]. По техническому заданию требовалось оставить конструкцию ротора и статора неизменной, но допускалось понижение номинальной мощности электродвигателя на одну ступень согласно ряду мощностей по ГОСТ Р 54466-2011 [11, 12, 13]. Невмешательство в конструкцию статора, изменение длины пакета, размеров пазов позволяет унифицировать производство. Не требуется изготовление новых штампов, оснастки и т.д.

В качестве замены использовались алюминиевый провод с размерами из серии ПЭТ-155, рассматривалась, и подтвердила целесообразность также применения проводов марки ПЭВА, и ПЭЭА выпускаемых с классами термостойкости изоляции от В до Н (от 130 до 180 °С) [14, 15, 16].

Согласно расчётам, вновь разработанные электродвигатели соответствуют требованиям технического задания, а по некоторым показателям значительно превышают их, что объясняется переходом на низшую ступень мощности [17, 18]. Некоторые данные результатов работы в таблицах 1, 2, 3, 4, 5.

Таблица 1

Сравнение номинальных данных двигателей серии АИМЛ с медной и алюминиевой обмоткой статора

Типоисполнение	Медная/алюм обмотка статора		
	<i>Ном. мощ , кВт</i>	<i>Потреб ток, А</i>	<i>КПД, %</i>
АИМЛ63А4	0,25/0,25	0,8/0,89	68/63
АИМЛ63В4	0,37/0,25	1,1/0,9	69/71
АИМЛ71А4	0,55/0,37	1,5/1,4	73/72
АИМЛ71В4	0,75/0,55	2/1,85	74/75
АИМЛ100L2	5,5/4	11,2/7,6	82/87
АИМЛ112М4	5,5/4	11,5/7,8	85/87

Таблица 2

Сравнение номинальных данных двигателей серии АИМЛ с медной и
алюминиевой обмоткой статора

Типоисполнение	Медная/алюм обмотка статора		
	Момент макс/ном	Момент пуск/ном	Мак темп, °С
АИМЛ63А4	2,1/2,1	1,8/1,9	145
АИМЛ63В4	2,1/3,2	1,8/2,1	131
АИМЛ71А4	2,1/3,9	1,82/2,6	96
АИМЛ71В4	2,1/3,6	1,8/2,4	94
АИМЛ100L2	2,5/3,3	2,0/1,95	153
АИМЛ112М4	2,8/3,3	2,2/1,7	131

Таблица 3

Сравнение номинальных данных двигателей серии АИМЛ с медной и
алюминиевой обмоткой статора

Типоисполнение	Медная/алюм обмотка статора		
	Частота вращения, об/мин	Плотность тока, А/мм ²	Линейная токовая нагрузка, А/см
АИМЛ63А4	1380/1403	6,4/6,2	184/170
АИМЛ63В4	1350/1455	6,9/4,9	193/170
АИМЛ71А4	1380/1467	6,1/4,9	202/186
АИМЛ71В4	1395/1465	6,8/5,4	184/165
АИМЛ100L2	2835/2930	5,7/3,8	298/250
АИМЛ112М4	1425/1473	7,2/5,1	261/220

Таблица 4

Сравнение номинальных данных двигателей серии АИМЛ с медной и
алюминиевой обмоткой статора

Типоисполнение	Медная/алюм обмотка статора		
	Количество витков в фазе	Сечение витка фазы, мм ²	$I_{пуск}/I_n$
АИМЛ63А4	760/684	0,13/0,14	4,1/3,1
АИМЛ63В4	580/556	0,16/0,18	4,1/4,6
АИМЛ71А4	508/452	0,25/0,28	4,4/5,4
АИМЛ71В4	408/368	0,31/0,35	4,4/5,6
АИМЛ100L2	124/140	1,97/2,01	6/8
АИМЛ112М4	150/168	1,57/1,53	7/7,9

Сравнение номинальных данных двигателей серии АИМЛ с медной и алюминиевой обмоткой статора

Типоисполнение	Медная/алюм обмотка статора		
	<i>Ном. момент, Н·м</i>	<i>Кэфф. заполн. паза</i>	<i>Кэффицент мощ.</i>
АИМЛ63А4	1,7/1,7	0,75/0,75	0,73/0,7
АИМЛ63В4	2,6/1,6	0,75/0,75	0,72/0,6
АИМЛ71А4	3,8/2,4	0,75/0,75	0,75/0,6
АИМЛ71В4	5,1/3,6	0,75/0,75	0,75/0,6
АИМЛ100L2	18/13	0,75/0,73	0,88/0,9
АИМЛ112М4	37/26	0,75/0,73	0,84/0,9

Как видно из приведенных результатов работы асинхронные двигатели имеют достаточно высокие удельные характеристики. Ограничение на изменение длины пакета не позволило для некоторых высот вращения произвести замену медной обмотки на алюминиевую с сохранением мощности той же ступени и того же габарита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов М.В. Технология производства электрических машин : учебник для вузов / Антонов М. В. - 2-е изд., доп и перераб. - М. : Энергоатомиздат, 1993. - 592 с. - Библиогр. Библиогр.: с. 582.
2. Ch. Sullivan. Aluminum windings and other strategies for high-frequency magnetics design in an era of high copper and energy costs. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 23, № 4, July 2008, pp. 2044-2051.
3. Захарченко Д.Д. Ротанов Н.А. Тяговые электрические машины Учебник для вузовж-д. трансп-М, Трпнсорт, 1991, 343 с.
4. J.H. Thomas and J.F. Dexter. Effect of wire metal on the thermal life of enameled magnet wire, power apparatus and systems, part III, Trans. of the American Institute of Electrical Eng., Dec. 1957, pp. 1009-1013.
5. Готтер, Готфрид. Нагревание и охлаждение электрических машин [Текст] / Пер. с нем. А. И. Молдавера ; Под ред. В. В. Мальцева. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. - 480 с. : ил.; 21 см.
6. С. Araki and T. Taguchi. Thermal degradation of polyesterimide magnet wire. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference, 1993, pp. 526-531.
7. A new generation of aluminum enameled winding wires. T. Knych, A. Mamala, M. Jablonski and P.Uliaz. Wire Journal International. 1012, V.45, № 1, pp. 55-61.
8. T. Knych. Power overhead conductors: theory, materials, applications. In Polish, 2010, wyd. AGH.

9. Унифицированная серия асинхронных двигателей интер-У 59 электро/ В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкоп и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энероатомиздат, 1990-416с.: ил.
10. «Асинхронные двигатели серии А4» Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982-504 с., ил.
11. ГОСТ ИЕС 60034-30-1-2016 Межгосударственный стандарт «Машины электрические вращающиеся».
12. ГОСТ Р54466-2011 Группа Е61. Национальный стандарт Российской Федерации. «Машины электрические вращающиеся»
13. ГОСТ 16264.0-2018 Межгосударственный стандарт. «Машины электрические малой мощности двигателя. Общие технические условия»
14. Обмотки электрических машин. В.И. Зимин, М.Я. Каплан, М.М. Палей и др. – «Энергия», 1975г.
15. Антонов М.В. Технология производства электрических машин : учебник для вузов / Антонов М. В. - 2-е изд., доп и перераб. - М. : Энергоатомиздат, 1993. - 592 с. - Библиогр. Библиогр.: с. 582.
16. Кокорев А. С. К 59 Справочник молодого обмотчика электрических машин. — 5-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. школа, 1979. — 232 с, ил. 45 к.
17. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2015. 767 с. – Серия: Бакалавр. Углублённый курс.
18. Проектирование электрических машин. О.Д. Гольдберг Я.С. Гурин И.С. Свириденко. Учебник для втузов/Под ред. О.Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2001 – 430 с.: ил.

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация: В данной статье представлены современные направления исследований и перспективы использования технологий аддитивного производства (АП) для изготовления электрических машин. Современные машины требуют исключительных параметров производительности, таких как высокая удельная мощность, функциональность, улучшенные тепловые, механические и электромагнитные свойства. Аддитивное производство обеспечивает более высокую степень гибкости конструкции для достижения этих эксплуатационных параметров, которые невозможно реализовать с помощью традиционных методов производства. АП может многое предложить во всех аспектах машиностроения, начиная от уменьшения размера и веса, заканчивая реализацией сложных геометрических конструкций.

Ключевые слова: аддитивное производство; 3D-печать металлом; проектирование электрических машин.

I. ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство изделий из металла значительно расширяется благодаря преимуществам непревзойденной гибкости и отсутствия отходов материала. Эта чистая технология открывает двери для новых конструктивных решений с большей эффективностью использования материалов, которые невозможны при использовании традиционных методов обработки.

Аддитивное производство чаще всего используется для крупносерийного производства очень сложных деталей, которые, как правило, невозможно изготовить в больших масштабах с использованием других методов. 3D-печать, в частности, упростила процесс аддитивного производства и подтвердила экономичность мелкосерийного производства крайне сложных деталей.

3D-печать металлом теперь переместила ценность 3D-печати из метода создания прототипов в основную производственную линию.

Разработке электродвигателей не уделялось такого внимания почти 100 лет несмотря на то, что они занимают одно из первых мест в списке приоритетов для

многих отраслей промышленности, которые стремятся к значительному улучшению качества, надежности, производительности и уменьшению стоимости [1].

Среди всех процессов аддитивного производства наиболее перспективными для производства электрических машин являются технология селективного лазерного плавления (SLM), моделирования методом наплавления (FDM) и струйной печати связующим материалом (BJP).

II. ТЕНДЕНЦИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Способность АП реализовывать различные топологические конструкции может быть средством получения сердечника с высокой механической прочностью и специальной геометрии. Это также дает дополнительное преимущество в виде повышенной пластичности благодаря возможности создания многомасштабных микроструктур. Для основных областей применения, начиная от автомобильной и до аэрокосмической промышленности, сердечники вращающихся электрических машин должны иметь высокое отношение крутящего момента к весу, сохраняя при этом целостность конструкции в сочетании с высокой проницаемостью и низкими гистерезисными и вихретоковыми потерями. Фактически, аддитивное производство обеспечивает достижимость максимальных показателей предоставляя возможность использования топологической оптимизации для получения подходящей геометрии для управления электромагнитной энергией, для снижения вихретоковых потерь. Оптимальный состав материала снижает потери на гистерезис и уменьшает вес за счет низкого расхода материала при этом сохраняя структурную целостность. На рис. 1 представлены некоторые из таких примеров основных конструкций, построенных с помощью аддитивного производства.

Специальное профилирование проводников обмотки, как показано на рисунке 2а, не только улучшает использование площади паза (коэффициент заполнения), но также минимизирует потери переменного тока. Экспериментальные результаты показали улучшение производительности непрерывной работы на 20% [2].

Кроме того, обработка обмоток, электрической изоляцией или покрытием, может быть выполнена с помощью многокомпонентного аддитивного метода ММ-АМ, а не с помощью традиционной технологии изоляции, такой как эмалирование смолой, как показано на рисунке 2b. Это устраняет необходимость в последующей обработке

детали, изготовленной с помощью аддитивного производства. Сборку обмотки вместе с изоляцией испытывали термически, нагревая ее 20 раз до температуры 300 °С, при этом не было выявлено никаких структурных дефектов изоляции и изменения электрических параметров катушки.

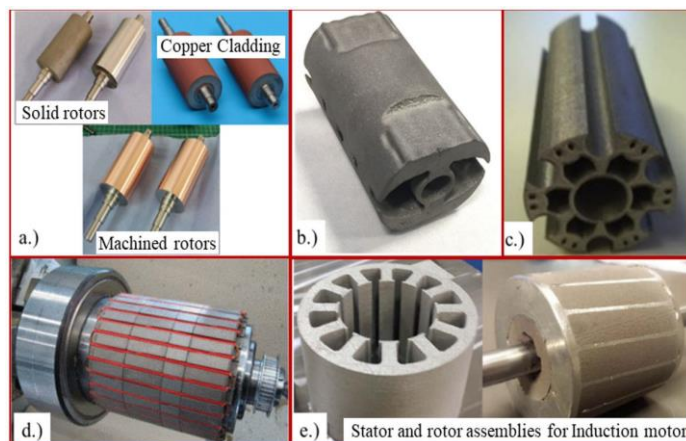


Рис. 1. Примеры сердечников, изготовленных АМ (а) ротор из цельной стали с медной оболочкой для использования в электромобилях — Rolls Royce Central Technology (б) Ротор с постоянными магнитами с оптимизированной плотностью крутящего момента (с) прототип ротора для реактивной реактивной машины (д) легкий ротор с топологией решетчатой структуры для синхронной машины с постоянными магнитами (е) сборки статора и ротора асинхронной машины для автомобильного применения.

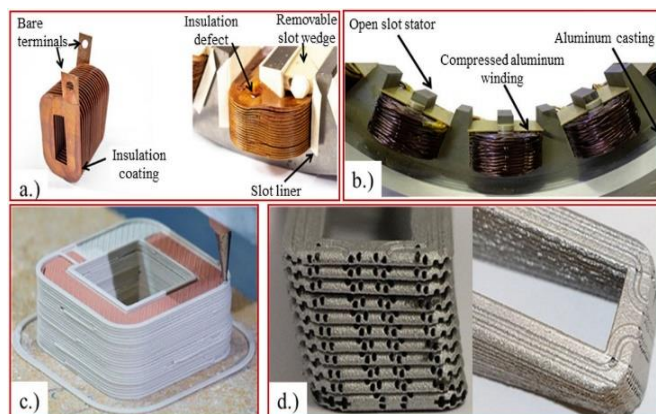


Рис. 2. Примеры обмоток, изготовленных аддитивным методом (а) Обмотка фасонного профиля, (б) электрически изолированная обмотка (с) обмоточный узел, напечатанный из нескольких материалов со встроенной керамической изоляцией (д) Обмотка зубчатой катушки со встроенными каналами жидкостного охлаждения.

В машинах, для которых эффективность, компактность и высокое соотношение крутящего момента к весу являются первоочередными задачами, используются

постоянные магниты (ПМ), и поэтому производственные и последующие свойства ПМ имеют большое значение. Для таких применений ПМ должны обладать хорошими функциональными магнитными, термическими и механическими свойствами. Для обычных применений используются мягкие магниты с низкой плотностью энергии, такие как ферриты или MnAlC. Но для приложений с высокой плотностью энергии и высокой удельной мощностью необходимы магнитотвердые и высокоэнергетические постоянные магниты из таких материалов, как NdFeB/AlNiCo/SmCo. Традиционно ПМ изготавливаются либо путем спекания, либо путем склеивания, что включает в себя большое количество длительных механических этапов, включая прессование, формование и последующую механическую обработку. Это приводит к увеличению времени и стоимости производства с ограничением реализации сложных, специфичных для применения возможностей проектирования.

В работе [3] авторами представлено сравнение влияния различных технологий аддитивных методов (АМ) на механические и магнитные свойства ПМ. Показано, что ПМ, производимые SLM методом, имеют магнитную плотность 90%, но в магните появляются значительные трещины и остаточные напряжения, которые отрицательно влияют на его механические и магнитные свойства. Эту проблему можно в значительной степени устранить с помощью термообработки до и после АМ. ПМ NdFeB, полученные экструзией материала и струйной печатью Binder Jet (BJP), имеют свойства, аналогичные свойствам ПМ на основе моделирования плавленным осаждением (FDM). Проблема с ПМ производства BJP заключается в том, что необходимо увеличить объемное содержание примесей, что, в свою очередь, приведет к увеличению магнитной плотности и остаточной плотности потока. Показано, что это можно сделать с помощью пропитки эвтектических сплавов методом BJP. Аддитивная крупногабаритная печать (BAAM) — это особая технология. Магниты NdFeB, изготовленные с помощью этой технологии, показали значительно лучшие характеристики по сравнению с другими АМ. Поскольку плотность материала и остаточная плотность потока на 20% выше, а показатель плотности магнитной энергии на 40% выше, чем у других АМ ПМ, магнит BAAM отражает конкурентоспособность с точки зрения собственной коэрцитивной силы и остаточной плотности потока. Характеристики термодеградациии АМ-магнитов также лучше, чем у их аналогов, что также показано на рис. 3 [4].

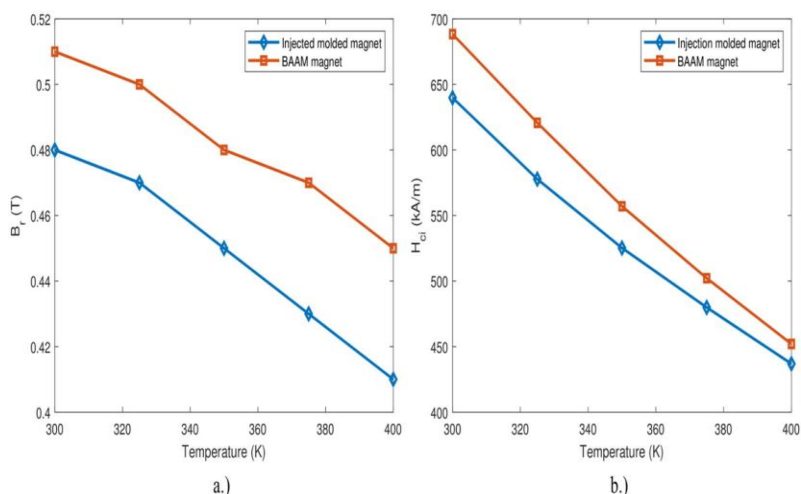


Рис. 3. Сравнение влияния термической деструкции на характеристики обычных магнитов и магнитов, изготовленных методом аддитивного производства
 (а) остаточная плотность потока в зависимости от температуры окружающей среды
 (б) Собственная коэрцитивная сила в зависимости от температуры окружающей среды

FDM — это один из наиболее распространенных процессов АП, который находится в процессе самого длительного развития и совершенствования среди технологий 3D-печати. В FDM легкоплавкий полимер или его композит экструдировается на платформе принтера слой за слоем в соответствии с моделью САПР. Простая схема печати FDM показана на рис. 4. Гранулы расплавленного полимера или полимерного композита используются на предприятии аддитивного производства для крупногабаритной печати (BAAM). Детали собираются послойно на слегка нагретой станине. Градиент температуры помогает удерживать деталь на месте во время печати [5].

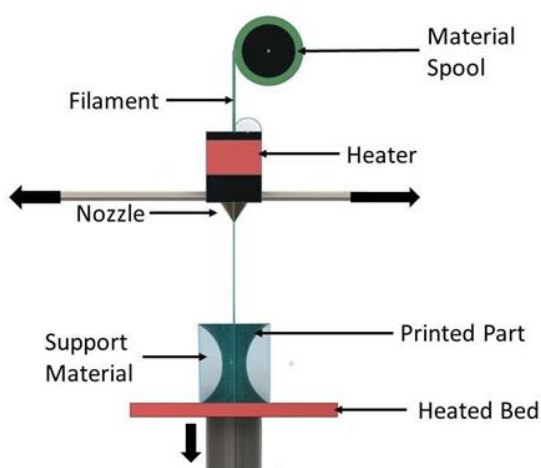


Рис. 4. Схема FDM-печати

Исследователи из Технологического университета Хемница заявили, что создали реактивную машину выполненную полностью ММ-АМ с обмоткой, изолированной с помощью керамических паст высокой вязкости рис. 5. Сообщается, что машина выдержала рабочую температуру до 300 °С благодаря использованию керамической изоляции, которая имеет высокую теплопроводность, но требует обширной последующей обработки . На рисунке 5с показан напечатанный прототип SLM, полнофункциональной реактивной машины с осевым потоком (SRM), но производство этого прототипа также включало значительный объем постобработки [4].

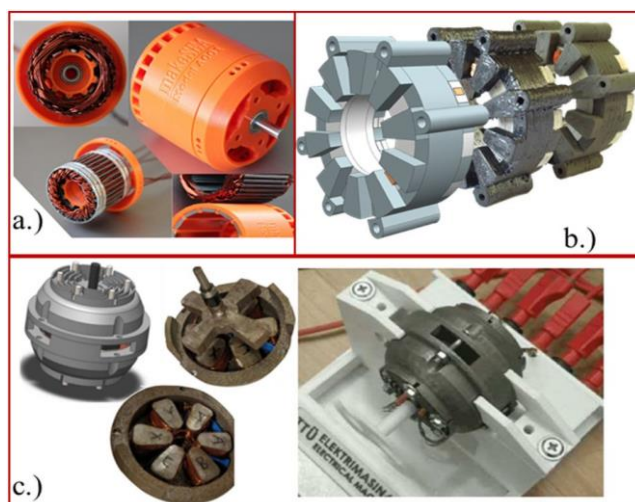


Рис.5. Примеры электрических машин, построенных АМ (а) двигатель постоянного тока с матрицей Хальбаха (б) статор реактивной машины с концевой обмоткой (с) Прототип SRM с осевым потоком

III. ВЫВОДЫ

В данной работе анализируются существующие исследования и будущий потенциал использования аддитивного производства в создании электрических машин. Распространенные исследования показывают, что усилия были в основном сосредоточены на использовании аддитивного производства для изготовления отдельных деталей машин или узлов. В этом отношении наблюдается различный уровень прогресса.

Фактически, АМ предлагают широкий спектр преимуществ по сравнению с традиционными технологиями производства, такими как:

- Оптимальное использование материала
- Оптимизация топологии конструкции, приводящая к улучшению тепловых и механических характеристик.

- Оптимальное управление электромагнитной энергией за счет реализации сложной геометрической формы.
- Уменьшение размера и веса
- Контроль над составом материала и, следовательно, его физическими свойствами.

Имея так много возможностей, АМ обладают потенциалом полностью заменить традиционные технологии производства. Однако на самом деле им не хватает некоторых аспектов, таких как необходимость последующей обработки и относительно маленький уровень зрелости исследований электромагнитных свойств печатных деталей. По этим причинам использование АМ в промышленности в настоящее время затруднено.

Еще одна вещь, очевидная из примеров, приведенных в этой статье, заключается в том, что ряд многих отраслей уже используют аддитивное производство для производства высокоэффективных деталей для различных областей применения, от тяги транспортных средств до спутниковых и аэрокосмических целей. Все это обуславливает необходимость направления исследовательских усилий на полностью аддитивные электрические машины, и наиболее естественным шагом вперед является разработка комплексной схемы проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аддитивные технологии производства деталей электрических машин / [Электронный ресурс] // Школа для электрика : [сайт]. — URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2768-additivnoe-proizvodstvo-elektricheskikh-mashin.html> (дата обращения: 8.12.2023).
2. Simpson, N.; North, D.J.; Collins, S.M.; Mellor, P.H. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2020, 56, 2510–2519.
3. Pham, T.; Kwon, P.; Foster, S. Additive Manufacturing and Topology Optimization of Magnetic Materials for Electrical Machines— A Review. *Energies* 2021, 14, 283.
4. Muhammad Usman Naseer, Ants Kallaste, Bilal Asad, Toomas Vaimann, Anton Rassõlkin A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines / Muhammad Usman Naseer, Ants Kallaste, Bilal Asad, Toomas Vaimann, Anton Rassõlkin [Электронный ресурс] // Researchgate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/350544880_A_Review_on_Additive_Manufacturing_Possibilities_for_Electrical_Machines (дата обращения: 8.12.2023).

5. Tej Lamichhane, Latha Sethuraman, Adrian Dalagan, Haobo Wang, Jonathan Allen Keller, Parans Paranthaman Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—A review / Tej Lamichhane, Latha Sethuraman, Adrian Dalagan, Haobo Wang, Jonathan Allen Keller, Parans Paranthaman [Электронный ресурс] // Researchgate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/342966144_Additive_manufacturing_of_soft_magnets_for_electrical_machines-A_review (дата обращения: 10.12.2023).

ПРОБЛЕМЫ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

Аннотация – Целью работы является определение перспектив реализации электродвижения на маломерных судах. Использование электрической энергии при движении на воде является одним из направлений решения проблем декарбонизации, необходимости снижения загрязнения водных акваторий и наносимого вреда экосистемам водоемов и прилегающих территорий. Рассмотрены основные факторы, влияющие на выбор электрической энергетической установки для маломерных судов, а также параметры обуславливающие энергоэффективность судна на электродвижении с учетом потребности разрабатываемого судна. Проведён анализ современного состояния и перспектив развития в области генерации, и электродвижения кораблей и судов.

Ключевые слова – электродвижение, электродвижение в судостроении, перспективное судостроение, электрификация малых судов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятому Киотскому протоколу, промышленно – развитые страны должны обеспечить сокращение выбросов парниковых газов в окружающую среду [1]. Можно отметить, что на долю мирового судоходства приходится порядка 2-3% от выбросов парниковых газов и данное значение может увеличиться на 90-130% к 2050 году, в связи с чем декарбонизация окружающей среды является актуальнейшей глобальной повесткой.

Согласно первоначальной стратегии Международной морской организации, снижение выбросов парниковых газов в окружающую среду должно сокращаться на 50% ежегодно с 2030 года и на 40% ежегодно до 2030 года [2]. Тем не менее за последние 10 лет реально удалось снизить выбросы всего лишь на 7% и возможным выходом из создавшийся ситуации видится переход на электродвижение и альтернативную энергетику.

Одной из главных движущих сил запуска электрических лодок в производство стало стремление снизить загрязнение водных акваторий предотвратить причины загрязнения вреда экосистеме. Традиционные судовые двигатели внутреннего сгорания выбрасывают в атмосферу и водную среду отработанные газы, в составе

которых присутствуют вредные вещества, такие как монооксид углерода, углероды, твердые частицы и оксиды азота.

В случае продолжения использования ископаемых видов топлива суды должны стать на 90% эффективнее для обеспечения соответствия экологическим нормам. Решением проблемы декарбонизации мировое научное сообщество видит в двух направлениях: эффективное использование водорода. Особую роль в снижении выбросов углеводородов занимает минимизация воздействия на окружающую среду энергопреобразующих систем (автомобилей, летательных аппаратов, водного транспорта, наземных энергетических установок и станций) Таким образом, возможным решением может стать переход на аккумуляторные батареи.

Использование аккумуляторных батарей как основного источника энергии считается одной из перспективных технологий, которая постоянно развивается рис.1, т.к. предоставляет ряд существенных преимуществ, однако в текущем виде использование аккумуляторов для судов со средним и высоким потреблением энергии является невозможным.



Рис. 1. Развитие аккумуляторных батарей

В 2022 году доля рынка судов на электродвижении составила всего лишь 2%, причём из 2% полностью электрические 20%, то есть из общего рынка это 0,4%.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Анализ рынка электромоторных катеров и яхт показывает, что производственные компании расположены в 18 странах: Словении, Германии, Франции, Швейцарии, Италии, Бельгии, США, Канаде, России, Португалии, Австрии, Польше, Великобритании, Дании, Испании, Финляндии, и Нидерландах.

Самым быстрорастущим рынком здесь является рынок США. Объём продаж

составляет пока порядка 15 000 шт./год, ожидается, что к 2030 году объём продаж может достигнуть порядка 70 000 шт./год. Фактически ключевым сдерживающим фактором интенсивного роста данной доли рынка является малая автономность. При кратном увеличении со 100 до 1000 км ежегодный прирост рынка может составить 14-15% в год.

Существенным фактором, сдерживающим распространение судов на электродвижении, является автономность хода, составляющая значительную разницу с судами традиционных тепловых двигателях [4]. К сдерживающим факторам также можно отнести отсутствие либо неразвитость инфраструктуры по зарядке подобных судов.

Основное влияние на автономность, на запас хода оказывают следующие факторы: емкость батареи, энерговооруженность судна, тип корпуса, скорость движения, а также эффективность применяемых движителей.

Увеличение емкости батареи позволяет увеличить автономность судна, однако при этом необходимо учитывать, что увеличение емкости батареи приводит, к существенному росту массы комплекса для реализации электродвижения, что, в свою очередь, увеличивает осанку корпуса судна при его движении.

Результатами приведенного обзора показывают, что автономность хода маломерных судов на электродвижении варьируется в диапазоне от 10 до 200 морских миль (от 20 до 370 км) в зависимости от скорости и режима движения [5]. Очевидно, что по этому показателю реализации электродвижения существенно проигрывает традиционным энергетическим установкам и для повышения привлекательности потребительских характеристик судов с электродвижением необходимо проводить дополнительные исследования, направленные на повышение удельной мощности аккумуляторных батарей и совершенствование рабочих процессов судовых систем для повышения энергоэффективности и автономности перспективных образцов подобной техники.

Энерговооруженность судна определяется мощностью энергетических установок (ЭУ), обеспечивающих привод движителей судна (винты, импеллеры и т.п.) Необходимо отметить, что мощность ЭУ должна обеспечивать работу движителей в зоне оптимальных значений КПД на тех режимах движения судна и приемлемыми характеристиками.

Следующим важным фактором, определяющим в целом конкурентоспособность, привлекательность и востребованность судна, является тип корпуса, так как именно корпус создаёт сопротивление движению и от него зависят ходовые характеристики судна.

Скорость движения судна определяется согласованием ЭУ, движителем с учётом специфики обвода судна, веса, загруженности, дифферента судна. Повышение скорости судна, как правило обеспечивается более энергозатратными режимами работы движителей. Обзор серийно выпускаемых, опытно-экспериментальных и перспективных электро-судов показывает, что диапазон максимальных скоростей варьируется в пределах от 5,5 до 50 узлов (от 10 до 93 км/ч), при этом на крейсерских скоростях, режимах работы движение скорость электролодок не превышает 40 узлов (74,4 км/ч) даже для спортивных моделей [6].

Режим движения судна зависит от многих факторов и может определяться не только типом корпуса, спроектированным под конкретные условия эксплуатации, но и его загрузки, энергообеспеченности, согласованности работу ЭУ, движителем с учётом кривой сопротивления корпуса на различных режимах движения судна.

Эффективность применяемых движителей определяется типом и количеством движителей, обеспечением режима их работы в области высоких значений КПД, согласованностью режима работы движителя и мощности ЭУ. Несогласованность режимов работы движителей и ЭУ негативно сказывается на энергоэффективности судна в целом, кроме того, оно может привести к перегрузке, и, как следствие, к перегреву и выхода из строя ЭУ, либо к неэффективной работе самого движителя, что может к тому же сопровождаться возникновением кавитационных явлений, приводящих к практическому снижению тяги и эрозии конструктивных материалов движителей. Приведённые в обзоре материалы показывают, что наибольшее распространение в качестве движителей находят гребные винты [7]. При этом надо отметить, что гребные винты, применяемые в судах с электродвижением, изначально как правило проектировались под работу с двигателем внутреннего сгорания, которые имеют свои конструкционные выдержки и существенные отличия от электрических машин по характеру внешних скоростных характеристик (рис.2). Для электродвигателей характерно резкое возрастание эффективной мощности до номинального значения. Изложенные факты предопределяют необходимость

коррекции геометрии движителей при работе от электрических машин для обеспечения совершенства качества рабочего процесса движителя и как следствие, реализации их максимальной энергоэффективности.

Обеспечение конкурентоспособности судна на российском и мировых рынках определяется гидродинамическим совершенством пропульсивного комплекса, что предполагает комплексное моделирование.

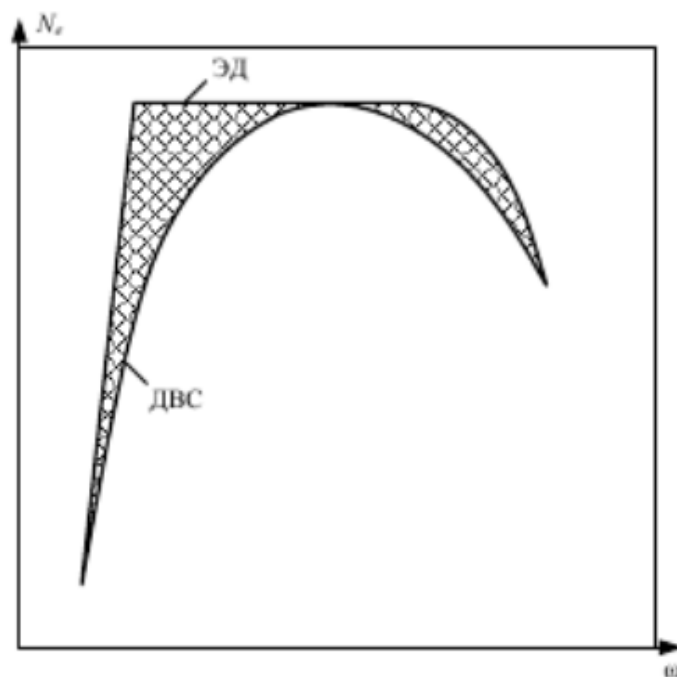


Рис. 2. Внешняя нагрузочная характеристика

Технология eVSP

На данный момент лидирующей разработкой в электрификации малых судов принадлежит немецкой компании VOITH. Которая анонсировала новейшую разработку электрического винта (рис. 3)

Высокая эффективность и сниженная сложность, достигается конструкцией. В данном движителе используется синхронный двигатель с постоянными магнитами, уже встроенными в гребной винт. Полное отсутствие зубчатых колёс сводит шум к минимуму и освобождает критическое пространство на судне. Приводная система сочетает в себе технологию VSP.

Увеличение КПД достигается за счёт исключения зубчатых колёс и уменьшения опорных точек, а также высокого КПД двигателя в частичном диапазоне нагрузок, что особенно актуально в морских перевозках.

Преимущества винта Evsp:

- 1) Эффективная система электропривода для максимальной эффективности;
- 2) Компактная конструкция;
- 3) Двигатель не требует технического обслуживания, надёжность и низкие эксплуатационные расходы;
- 4) Максимальная безопасность для судна, пассажиров и окружающей среды благодаря принципу VSP;
- 5) Быстрое ускорение и реакция для точного и безопасного маневрирования;
- 6) Дополнительная функция стабилизации крена;
- 7) Минимальный уровень шума и вибрации для повышения комфорта благодаря возможности бесшумного крепления или амортизации крепления.
- 8) Повышенная общая эффективность и трансформация практически без потерь.

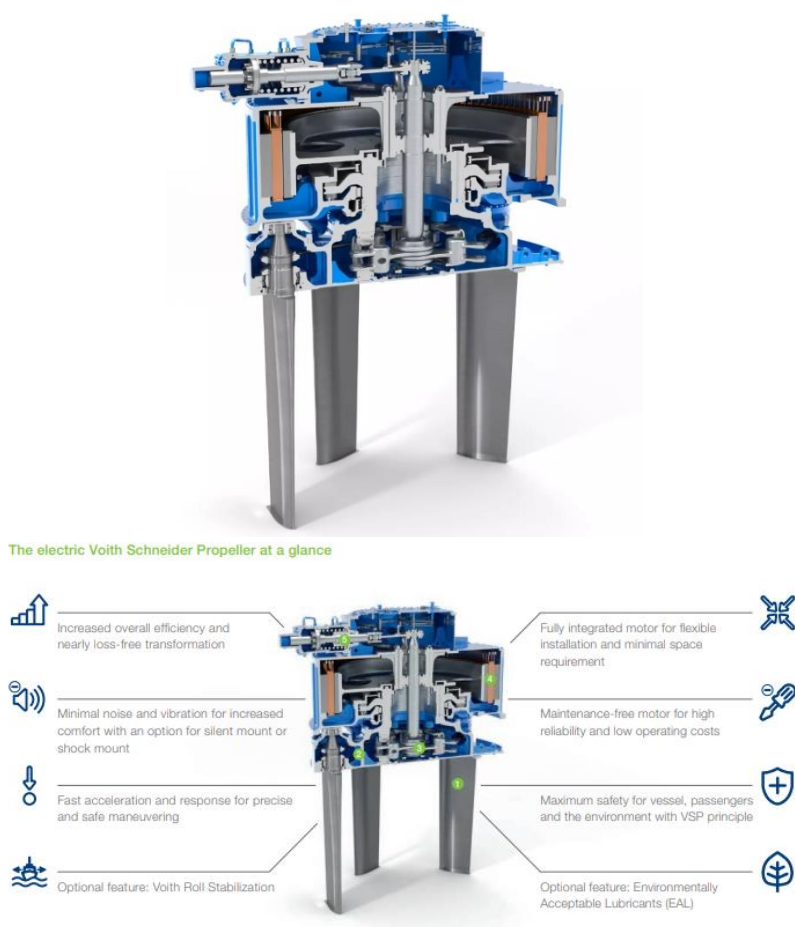


Рис. 3. Электровинт компании VOITH

III. ВЫВОДЫ

Одним из факторов сдерживающих использование ЭУ как на судах, так и на боевых кораблях и подводных лодках, считается создание мощных приемлемых по массогабаритным характеристикам и стоимости электродвигателей, а также генераторов электроэнергии повышенной мощности. Использование пропульсивного комплекса мер при проектировании мало габаритных судов на электротяге. Имеет перспективность развития, в частности, для сокращения выбросов парниковых газов, однако существует ряд ограничений связанных, к примеру с автономностью хода, требующих новых подходов к проектированию «корпус-энергетическая установка-двигатель».

На текущий момент в России остро стоит вопрос производства двигателей и энергогенерирующих установок перспективных кораблей. На мировой арене есть несколько лидеров, которые производят и разрабатывают передовые модели судов на электротяге.

Однако их использование на текущий момент практический невозможно.

Изложенные проблемы приводят к задачам адаптации движителей к режимам работы электрических машин, необходимости разработки перспективных схемных решений, методик моделирования, что позволит обеспечить энергоэффективность судна и его конкурентоспособность на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiotskiy protokol k Ramochnoy konventsii Organizatsii Ob"edinennykh Natsiy ob izmenenii klimata. Prinyat 11 dek- abrya 1997 goda [Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Adopted December 11, 1997]. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (accessed 22 November 2023). (In Russian)
2. Allied Market Research. Available at: <https://www.alliedmarketresearch.com/reports-store> (accessed 25 November 2023)
3. Mobility Foresights | Custom Automotive Market Research. Available at: <https://mobilityforesights.com/product-category/electricalmachinery/> (accessed 28 November 2023)
4. Why electric boats are good for the environment. Available at: <https://www.rselectricboats.com/why-electric-boats-are-good-for-the-environment/> (accessed 28 November 2023)
5. Villa D., Montoya A., Ciro J.M. The electric boat charging problem. Production. 2019, no. 29, e20190067. doi: 10.1590/0103-6513.20190067

6. Best electric boats: A-Z of the top hybrid and all-electric models. Available at: <https://www.mby.com/features/best-electric-boats-116768> (accessed 29 November 2023). Available: <http://home.process.com/Intranets/wp2.htm>
7. S. Hwang, "Frequency domain system identification of helicopter rotor dynamics incorporating models with time periodic coefficients," Ph.D. dissertation, Dept. Aersp. Eng., Univ. Maryland, College Park, 1997.

Ганджа Д.С.

Южно-уральский государственный университет

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Аннотация: в статье представлена проектная система по разработке стартер-генераторной установки для автономных источников питания. В проекте предлагается объединить функцию стартера и функцию генератора в одной электрической машине, встроенной в двигатель внутреннего сгорания. В качестве электрической машины выбрана вентильная машина комбинированного возбуждения. Представлена ее конструкция и компоновка в дизель. Описана проектная система для разработки стартер-генераторов этого класса. Она состоит из подсистемы синтеза и подсистемы анализа. Подсистема синтеза реализует многоуровневую оптимизацию. Она определяет оптимальную геометрию для различных проектных ситуаций и передает информацию через программный код в подсистему анализа. Подсистема анализа осуществляет поверочный расчет на основе метода конечных элементов в программе Ansys Electronics Desktop. В отличие от существующих, проектная система реализует большое количество проектных ситуаций, которые может представить заказчик. Работоспособность проектной системы показана на проекте дизель-стартер-генераторной установки для автономного источника питания 8 кВт.

Ключевые слова: автономный источник питания, стартер, генератор, комбинированное возбуждение, многоуровневая оптимизация, проектная система.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автономные источники питания активно (АИП) развиваются. Объяснить эту тенденцию можно следующими факторами:

— идет активное освоение удаленных территорий богатых углеводородным топливом. Обеспечение их централизованным энергоснабжением на первоначальном этапе является экономически не выгодным. АИП при этом являются единственным надежным источником энергоснабжения;

— для районов с центральным энергоснабжением обострилась проблема надежности. Увеличилось количество аварийных отключений. В этой ситуации повысился интерес служб специального назначения (медицинских, пожарных, МЧС) к АИП. Для решения этой проблемы необходимо развитие распределенной энергетики и производство АИП на разные мощности и различного исполнения;

— АИП являются основой электроснабжения транспортных средств наземного,

водного и воздушного базирования. К АИП этого типа предъявляются жесткие требования к удельным энергетическим и массогабаритным показателям, что требует дополнительного исследования;

— системы военного и специального назначения всегда находились на острие научного и технологического развития. АИП составляют энергетическую основу систем этого типа. Существующая обстановка заставляет придать новый импульс в их развитии. На правительственном уровне развернуты программы поддержки НИОКР и серийного производства этих систем.

Развитие АИП может идти в нескольких направлениях. Наиболее перспективным является разработка дизель-стартер-генераторных установок на различные мощности.

Современное развитие силовой электроники, появление новых материалов, включая высококоэрцитивные постоянные магниты, применение электрических машин нового типа, оптимизация геометрии позволяют получить АИП с высокими удельными объемными и массоэнергетическими показателями. Для достижения этого результата необходим комплексный подход в проектировании, который рассматривал бы совместную работу электроники и электрической машины. Разработке такой проектной методики посвящена данная статья.

II. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ АИП

В большинстве стартер-генераторных установках АИП применяются две электрические машины для генераторного режима и стартерного режима работы. Это обусловлено различными параметрами для этих режимов. Для генераторного режима характерны:

- высокая и стабильная частота вращения;
- небольшие моменты на валу;
- повышенные требования к КПД;
- стабильность выходного напряжения;
- большой ресурс работы.

Для генераторного режима надо обеспечить:

- большие моменты при пуске двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
- невысокие обороты;
- незначительный ресурс работы только при запуске ДВС.

Энергетические параметры для стартера уходят на второй план из-за кратковременного режима работы.

В тоже время известно, что электрическая машина обращается и может работать как генератор и как двигатель. Объединение двух режимов работы в одной электрической машине дает ряд преимуществ:

- появляется возможность исключения ременной передачи для генератора и зубчатой передачи для стартера при размещении электрической машины на одном валу с ДВС;
- сокращается количество валов, подшипников, подшипниковых щитов, корпусов электрических машин;
- появляется возможность встраивать электрическую машину в корпус ДВС, тем самым улучшая компоновку и объем АИП;
- для охлаждения можно использовать хладагент, который охлаждает ДВС.

При этом следует иметь в виду, что различные режимы работы для одной электрической машины приводят к тому, что для одного из режимов электрическая машина будет избыточна, то есть будет иметь завышенные габариты и массу. Например, если за основу определения основных размеров диаметра расточки и активной длины взять генераторный режим, то для стартерного режима эти размеры будут завышенными и стартерный режим будет недогружен по возможности развить больший момент. Если за основу определения основных размеров взять стартерный режим, то в генераторном режиме будут меньшие по сравнению с рекомендуемыми нормами электромагнитные нагрузки. Это может привести к тому, что стартер-генератор будет иметь большую массу, чем отдельно взятые приводы для стартерного и генераторного режимов. Но отмеченные выше преимущества объединения двух машин в одну приводят к тому, что по массе и удельным энергетическим показателям стартер-генератор может конкурировать с традиционной схемой двух электрических машин для двух режимов.

Следует отметить, что по показателям надежности, ресурса работы и необходимости обслуживания стартер-генераторный режим имеет существенные преимущества по сравнению с традиционной схемой. Поэтому при выборе схемы привода следует применить комплексный анализ с учетом затрат при производстве и эксплуатации АИП.

При выборе типа электрической машины для стартер-генератора следует иметь в виду комплексный подход с учетом работы электрической машины совместно с силовой и логической электроникой.

Варианты коллекторных электрических машин с контактным токоподводом следует исключить на первом этапе по требованиям надежности и ресурса работы генераторного режима.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором имеет высокую надежность за счет отсутствия токоподвода к вращающимся частям, но для работы в генераторном режиме она должна иметь источник реактивной энергии в виде конденсаторной батареи. Помимо высокой цены этот конденсатор снижает надежность привода в целом. Частотно-регулируемый привод для стартерного режима с инженерной точки зрения хорошо отработан, но практика показывает, что сама аппаратура по габаритам соизмерима с электрической машиной. Большие пусковые токи стартерного режима вынуждают применять силовые ключи с большим запасом по коэффициенту использования, что также повышает цену и снижает надежность.

Вентильно-индукторные машины имеют аналогичную проблему. Принцип работы ее основан на разности магнитной проводимости по осям. Она тоже не имеет собственного источника для возбуждения в индукторе и тоже берет реактивную энергию из внешней сети. С точки зрения использования меди якоря она имеет еще более низкие удельные массоэнергетические показатели. К этим отрицательным свойствам следует добавить высокий уровень пульсаций момента и, как следствие, выходного напряжения, сложность электронной системы контроля и управления. Положительные свойства бесконтактного токоподвода не перекрывает названные недостатки. В инженерной практике не известны проекты стартер-генератора на базе электрических машин этого класса.

Возможным вариантом может быть применение вентильной магнитоэлектрической машины с постоянными магнитами. Она имеет хорошие массоэнергетические показатели за счет применения высококоэрцитивных магнитов. Но этот класс электрических машин имеет одну особенность. Магнитный поток в широком диапазоне изменить невозможно. Регулировку частоты вращения и момента можно осуществлять только по якорной цепи. Это приводит к удорожанию и усложнению электронной системы управления, повышению цены привода в целом.

Практика применения электроприводов этого типа говорит, что диапазона регулирования моментов и скоростей только по якорной цепи без изменения потока возбуждения не хватает. Известны решения, когда разработчики для обеспечения требуемого диапазона в якорную цепь закладывают две обмотки: одну на большие моменты и малую скорость, другую на большую скорость и малые моменты. Это приводит к избыточным габаритам и снижению удельных энергетических показателей.

Наиболее приемлемым для стартер-генераторного режима является машина комбинированного возбуждения. Индуктор этих электрических машин имеет два источника возбуждения: постоянные магниты и обмотку возбуждения. Такое сочетание дает ряд преимуществ. Применение мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет получить большие магнитные потоки в малом объеме, что улучшает массоэнергетические показатели. Обмотка возбуждения имеет слаботочную цепь, но при этом позволяет изменять магнитный поток в широком диапазоне от нулевого значения до максимума, меняя при этом его направление за счет изменения полярности питания. При этом регулятор цепи возбуждения имеет малые габариты и массу. Таким образом машина комбинированного возбуждения при малых габаритах и весе имеет широкий диапазон регулирования частоты вращения и момента при малогабаритной слаботочной электронике.

Выберем этот класс электрических машин в качестве базового для разработки стартер-генераторной установки.

III. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Электрическая машина комбинированного возбуждения как класс электрических машин представлена в [1]. Основным недостатком достаточно большого количества конструктивных исполнений является наличие паразитного зазора. Ниже приведена конструкция машины комбинированного возбуждения, которая лишена этого недостатка [2].

На рис.1 представлен продольный разрез машины. На рис.2 представлен поперечный разрез машины.

Машина состоит из статора и ротора. Статор содержит шихтованные пакеты 1 и 2 с пазами. Пазы пакетов в осевом направлении совпадают. В пазах пакетов расположена многофазная обмотка 3. Шихтованные пакеты напрессованы на

массивные детали магнитопровода 4 и 5. Детали 4 и 5 насажены на втулку 6. Между пакетами магнитопровода расположена неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора расположен снаружи статора. Он имеет массивные полюса 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются между собой, располагаясь по окружности. При этом они образуют два кольца, которые охватывают шихтованные пакеты 1 и 2. Кольца расположены между собой таким образом, что в осевом направлении напротив полюса 8 находится постоянный магнит 9 или 10. Магниты 9 и 10 имеют радиальную намагниченность, при этом в одном кольце магниты имеют «южную» намагниченность 9 на поверхности, обращенной к пакету, в другом кольце - «северную» 10.

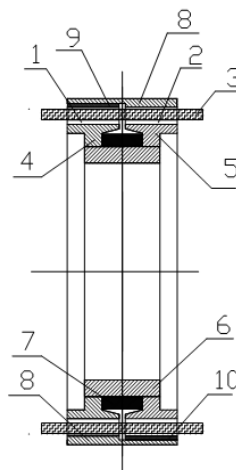


Рис. 1. Продольный разрез машины комбинированного возбуждения.

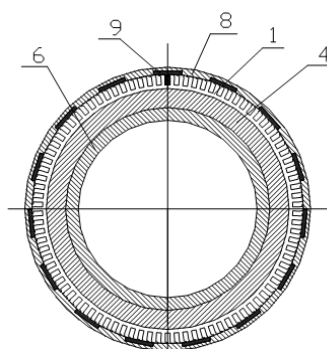


Рис. 2. Поперечный разрез машины комбинированного возбуждения.

Машина работает следующим образом. При питании обмотки возбуждения 7 постоянным током она создает магнитный поток, который замыкается по пути: шихтованный пакет 1, воздушный зазор, массивный полюс 8 первого кольца, спинка

ротора, массивный полюс 8 второго кольца, воздушный зазор, шихтованный пакет 2, деталь магнитопровода 5, втулка 6, деталь магнитопровода 4.

Магнитный поток, который создается постоянными магнитами замыкается по следующему пути: шихтованный пакет 1, воздушный зазор, «южный магнит» 9, спинка ротора, «северный» магнит 10, воздушный зазор, шихтованный пакет 2, деталь магнитопровода 5, втулка 6, деталь магнитопровода 4. Таким образом, магнитные потоки имеют общие участки только во втулке и спинке ротора. В остальных участках магнитопровода магнитные потоки не пересекаются. Направление магнитного потока от постоянных магнитов не меняется. Направление потока от обмотки возбуждения зависит от полярности источника питания, к которому она подключена. При этом ЭДС от обмотки возбуждения может, как прибавляться к ЭДС постоянных магнитов, так и вычитаться из него, что обеспечивает глубокое регулирование по цепи возбуждения.

На данную конструкцию имеется патент Российской Федерации 2244996.

IV. ВЫБОР СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ

Для стартер-генераторной установки можно использовать общепринятую компоновку силовых блоков системы управления (рис.3.).

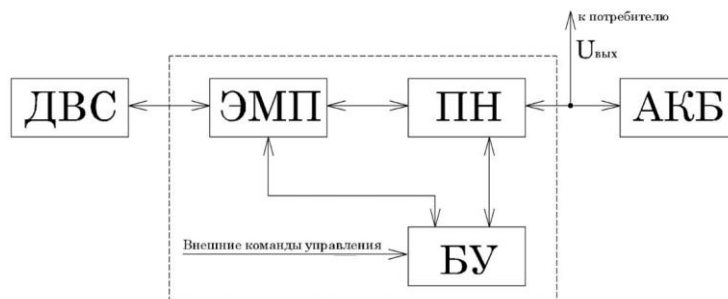


Рис.3. Функциональная блок-схема стартер-генераторной установки (ДВС – двигатель внутреннего сгорания, ЭМП – электромеханический преобразователь (электрическая машина), ПН – преобразователь напряжения, БУ- электронный блок управления)

В качестве ЭМП выступает машина комбинированного возбуждения, работающая в режиме двигателя (стартерный режим) при пуске ДВС и режиме генератора после запуска ДВС. ПН выполняет две функции: на пуске он преобразует постоянное напряжение в переменное по сигналам от датчика положения ротора ДПР и подает его на якорную обмотку для создания электромагнитного момента и запуска ДВС, в генераторном режиме он стабилизирует выходное напряжение при изменении частоты

вращения и нагрузки. БУ выполняет функции управления стартерным и генераторным режимами. АКБ является источником электроэнергии при запуске и накопителем в генераторном режиме.

Силовая часть электроники изображена на рис.4.

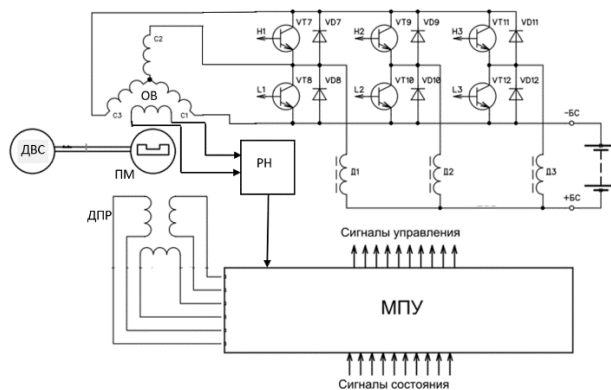


Рис.4. Силовая часть электроники стартер-генераторного комплекса (ОБ – обмотка возбуждения, ПМ – постоянные магниты, ДПР- датчик положения ротора, РН- регулятор напряжения, МПУ- микропроцессорная плата управления)

Наиболее ответственной частью силовой схемы является электронный преобразователь, который должен обеспечить режим больших пусковых токов и режим больших выходных напряжений.

V. ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Общепринятым решением для регулятора напряжения является схема питания его от выпрямленного напряжения якорной цепи. Особенность регулятора напряжения применительно к машине комбинированного возбуждения является необходимость менять полярность в процессе работы. Типовым решением для выполнения этой функции является мостовая схема, представленная на рис.5.

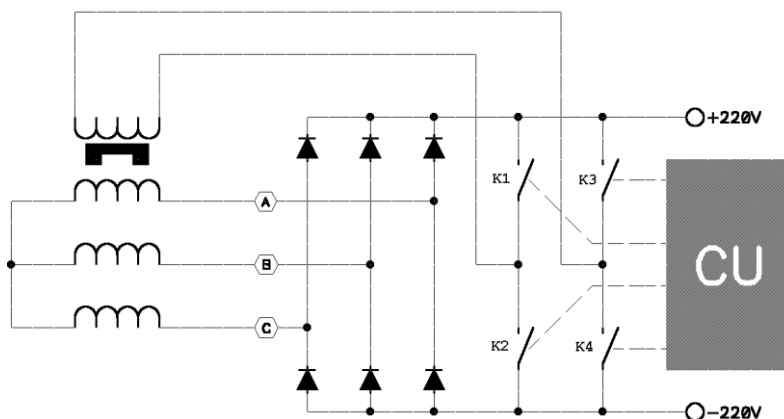


Рис.5. Мостовая схема регулятора напряжения

Для изменения тока в обмотке возбуждения одновременно замыкается одна из пар электронных ключей (или К1 и К4, или К2 тК3). Основным недостатком этой схемы является необходимость применения 4-х электронных ключей.

Следует отметить, что при соединении фаз в звезду в схеме имеется нейтраль, электрический потенциал которой меньше потенциала положительной клеммы выпрямленного напряжения и больше потенциала отрицательной клеммы выпрямленного напряжения. Это обстоятельство можно использовать для сокращения количества электронных ключей вдвое. При соединении одного конца обмотки возбуждения с нейтралью второй конец можно подсоединить к силовым ключам. Один из которых соединен с плюсовой клеммой, а другой соединен с минусовой клеммой. При переменном переключении то одного электронного ключа, то другого электронного ключа, ток в обмотке возбуждения будет менять направление. Выбирая по алгоритму частоту переключения можно стабилизировать величину выходного напряжения в генераторном режиме. Принципиальная схема этого регулятора изображена на рис. 6.

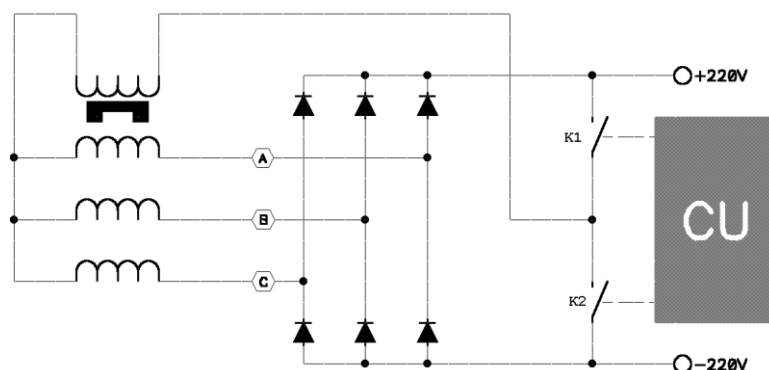


Рис.6. Схема двухполярного регулятора напряжения.

Будем ориентироваться на этот тип регулятора, так как сокращение электронных ключей в двое при серийном производстве может дать экономию материальных затрат.

VI. КОНСТРУКТИВНАЯ КОМПОНОВКА СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Как было отмечено, общепринятым является использование двух отдельных электрических машин для стартерного и генераторного режимов АИП [3,6-10,11,12]. Такая компоновка имеет следующие недостатки. Стартер работает кратковременно только на пуске ДВС. В дальнейшем его необходимо отключить, так как для стартера применяется коллекторная машина со щеточным контактом. При длительной

эксплуатации этой машины потребуются частая замена щеток. Стартер работает на одноступенчатую зубчатую передачу. Для сцепления и расцепления с зубчатой передачей необходим специальный привод бендикс, который представляет собой тяговое реле с поступательно-вращающимся механическим приводом. Бендикс и тяговое реле вместе с одноступенчатым редуктором усложняют конструкцию и снижают ее надежность. Статистика отказов показывает низкую надежность этого узла.

Механическая мощность с ДВС на вал генератора передается через ременную передачу. Не смотря на большое количество шкивов (до 6) ременная передача при перегрузках может проскальзывать, что приводит к быстрому выходу ее из строя. Для транспортного средства это приводит к аварийному состоянию бортовой сети. Кроме этого ременная передача создает дополнительную нагрузку на подшипниковый узел ДВС и генератора, что снижает общий ресурс работы. Для сглаживания пульсаций механического момента ДВС в приводе, как правило, применяют дополнительную инерционную массу в виде маховика, что утяжеляет конструкцию, создает дополнительную нагрузку на подшипники.

Дополнительно отметим экономическую нецелесообразность компоновки из отдельных электрических машин. Каждая электрическая машина имеет свой корпус, подшипники, подшипниковые щиты, вал, токоподвод. Это увеличивает материалоемкость и общую себестоимость агрегата. Возникает дополнительная проблема определения двух объемов в подкапотном пространстве. Усложняется монтаж двух отдельных агрегатов.

Применение стартер-генераторной установки, расположенной непосредственно на валу ДВС исключает названные недостатки. Появляется возможность встроить электрическую машину непосредственно в корпус ДВС, используя при этом подшипники двигателя. При этом уменьшается общий объем агрегата, повышает надежность, но это заставляет делать машину с меньшей частотой вращения и в больших габаритах. Завышенные габариты вращающихся частей в данном случае оправданы, так как позволяют исключить балластную вращающуюся массу для сглаживания пульсаций дизеля. Встраивая электрическую машину в корпус дизеля мы исключаем корпусные детали, подшипниковые щиты, подшипники. В агрегате необходим только один силовой токоподвод. Силовую электронику можно непосредственно встроить в электрическую машину, делая агрегат компактным

Названные мероприятия позволят существенно сократить габариты, массу, себестоимость агрегата, повысить его надежность.

В качестве подтверждения этих доводов приведем следующий конкретный проект. К разработчикам обратился заказчик по производству АИП специального назначения. Серийный АИП располагался на транспортном средстве над силовым моторным отделением. Из-за внешних поражающих факторов он часто выходил из строя. Возникла техническая задача уменьшить размеры агрегата практически в два раза при неизменной выходной мощности и поместить АИП в силовое отделение, защищенное от внешних воздействий.

Для данного проекта была применена концепция встроенного в дизель стартер-генератора на базе машины комбинированного возбуждения. Это позволило выполнить сложное техническое задание и повысить надежность агрегата.

Компоновка стартер-генератора показана на рис. 7.

Сравнительный анализ по габаритам для серийного варианта и инновационного варианта представлен на рис.8.

Применение данной концепции позволило сократить габариты до 40 %, уменьшить массу с 225 кг до 120 кг, повысить ресурс и срок службы, снизить эксплуатационный шум, уменьшить себестоимость.

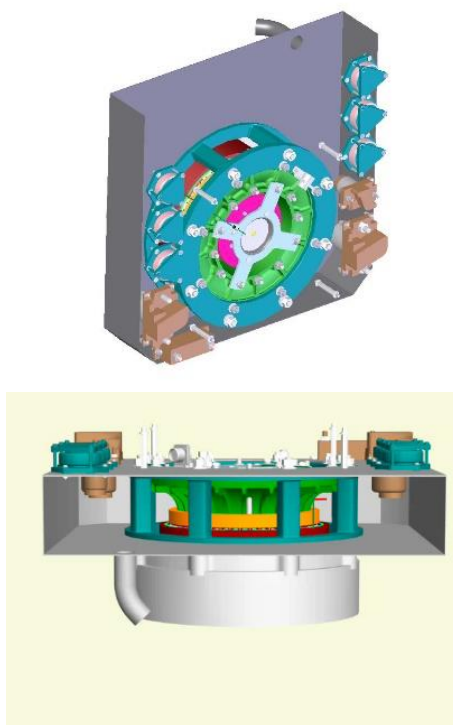


Рис. 7. Компоновка стартер-генератора

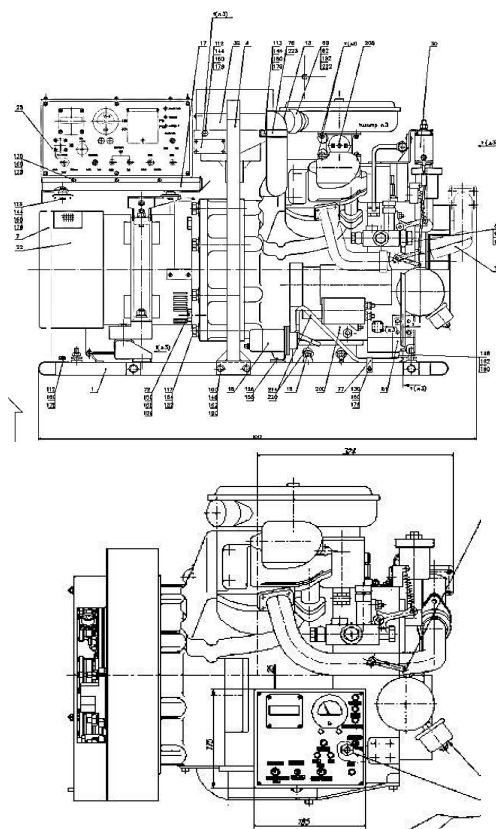


Рис.8. Габаритные размеры серийного агрегата (а) и опытного образца (б)

Сложность внедрения этой концепции в производство заключается в том, что для получения названных преимуществ машину надо встраивать в ДВС. Это заставляет проектировать установку для каждой конструкции ДВС, для каждой мощности и габаритов. Для этого необходимо создать проектную систему и возложить на нее эту задачу.

VII. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

Как было отмечено, для применения концепции стартер-генератора на базе вентильных машин комбинированного возбуждения электромашина должна быть встроена в ДВС. Только в этом случае можно реализовать все названные преимущества. Данное требование накладывает особенности на проектную систему по разработке АИП.

Отметим еще одну особенность. Совмещая две разных функции в одной машине (стартерный режим и генераторный режим) необходимо на начальном этапе проектирования определить, какой режим будет определяющий, а какой подчиненным. По условиям технической задачи невозможно выбрать средний режим, так как при этом не будет выполнено техническое задание ни по одному режиму.

На первом этапе в проектной системе производится предварительная оценка главных размеров электрической машины для стартерного режима и для генераторного режима. Большие размеры выбираются в качестве основных. При этом, если получилось, что генераторный режим является основным, то стартерный режим будет избыточным и наоборот, при основном стартерном режиме генераторный режим будет избыточным.

Далее проектная система включает в себя две подсистемы: подсистему синтеза и подсистему анализа. Подсистема синтеза определяет оптимальную геометрию и оптимальные обмоточные данные для основного режима. Для возможности реализации проектов для различных проектных ситуаций она должна быть гибкой, то есть иметь многоуровневую структуру [4,5]. При формировании проектной системы были определены следующие уровни оптимизации:

1. Полная габаритная оптимизация (варьируемые параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов, диаметр якоря, диаметр вала). В качестве критериев оптимальности были выбраны: наименьшая масса активных материалов, наименьший объем активных материалов, наименьшая масса постоянных магнитов.

2. Оптимизация при заданном числе полюсов (варьируемые параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов, диаметр расточки якоря, диаметр вала). Число полюсов для этого уровня является заданным параметром. Критерии оптимальности для этой проектной ситуации аналогичны показателям качества полной габаритной оптимизации, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

3. Оптимизация при заданном наружном диаметре. Оптимизация при заданном наружном диаметре достаточно часто встречается на практике. Она возникает для вновь разрабатываемых изделий при ограничении внешнего габарита. Основной задачей разработчика при этом является получение мощности при минимальной активной длине, которая обеспечивает заданную мощность.

4. Оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре. Для этого уровня ограничения совпадают с полной габаритной оптимизацией. Варьируемыми параметрами для этого уровня будут: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов, диаметр якоря. Показателями качества для этой проектной

ситуации служат критерии полной габаритной оптимизации при условии получения заданной мощности, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

5. Оптимизация при заданной наружной длине. Проектная ситуация при заданной наружной длине является типичной при ограничении габарита по оси вращения. Показателями качества для этой проектной ситуации служат критерии полной габаритной оптимизации при условии обеспечения заданной мощности. Это минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

6. Оптимизация при заданных наружном и внутреннем диаметрах. На практике часто встречаются ограничения более двух габаритов. В систему добавляются ограничения по наружному и внутреннему диаметрам. В качестве варьируемых выбираются следующие параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов. В качестве показателя оптимальности принимаются: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активных частей, минимальная масса магнитов.

7. Оптимизация при заданном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине. Оптимизация в заданных габаритах – достаточно часто встречающаяся проектная ситуация для мотор-колеса. Для данного уровня в качестве независимых переменных принимаются следующие параметры: высота постоянного магнита, высота медного слоя, число полюсов. Основным критерием для данной ситуации становится максимальная мощность, которую можно получить в этих габаритах при допустимом уровне нагрева якорной обмотки.

8. Оптимизация при фиксированных размерах постоянного магнита. Эта проектная ситуация достаточно типична. Разработчику следует иметь в виду, что заданные размеры магнита могут значительно отличаться от оптимальных. Поэтому результаты данного уровня оптимизации целесообразно сравнить с полной габаритной оптимизацией. Это поможет сделать правильный с экономической точки зрения выбор: использовать серийные магниты или заказать специальные магниты с оптимальной геометрией.

Поверочный расчет. Поверочный расчет не является оптимизационным, но он вписывается в систему оптимизации как вариант, при котором все варьируемые

переменные заданы. При этом не происходит перебора вариантов, а делается расчет только одного варианта при известных исходных данных.

В отличие от существующих проектных систем, которые реализуют только одну проектную ситуацию, предлагаемая система синтеза покрывает практически все возможные варианты технических заданий

На основе данной концепции однокритериальной многоуровневой оптимизации с применением языка программирования Delphi была разработана система оптимального проектирования, которая способна реализовать различные проектные ситуации.

Результаты работы подсистемы синтеза через программный код передаются в подсистему анализа, которая создана на базе программной среды Ansys Electronics Desktop [4,4,17].

Анализ режимов работы проводится в режиме Transient, который имеет возможность рассчитывать динамические характеристики с учетом изменения положения ротора и частоты его вращения. Во вращающуюся область Bond включены постоянные магниты и спинка индуктора, которые имеют более простую геометрию. В модели учитывалось влияние вихревых токов на поверхностях магнитов и в теле магнитной системы.

Результаты анализа электромагнитного состояния одного из проектных вариантов представлены на рис. 9.

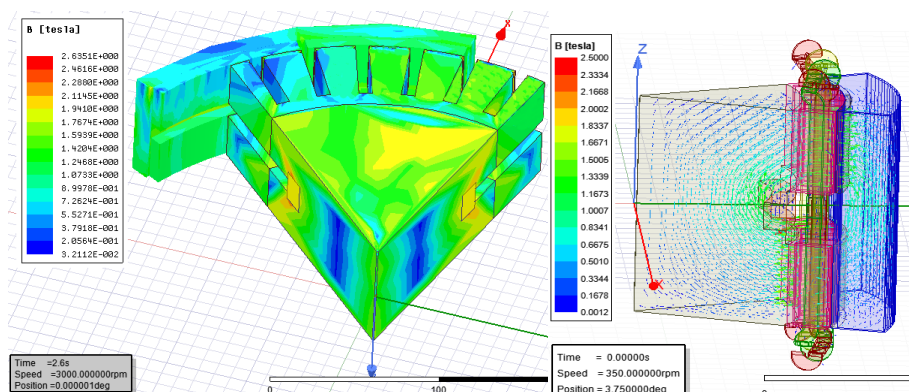


Рис.9. Результаты расчета электромагнитного состояния

Данная проектная система прошла апробацию на конкретных заказах. В качестве примера приведем один из проектов. Работы проводились по заказу ОАО «Электроагрегат» г. Новосибирск. По его требованию необходимо было максимально сократить габариты и массу существующей серийной установки.

Технические требования заказчика сведены в табл.1.

В рамках хоздоговорной работы был спроектирован с применением проектной системы и изготовлен опытный образец дизель-генераторной установки, представленный на рис.10.

Таблица 1

Технические характеристики дизель-генераторной установки

Параметры	Величины
Номинальная мощность, кВт	8
Номинальное напряжение, В	28,5
Номинальный ток, А	280
Род тока	пост.
Марка дизеля	В 2Ч 8,2/7,8
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Расход топлива не более, кг/ч	2,5
Емкость топливного бака, л	10,0
Время непрерывной работы, ч	48
Габаритные размеры, мм	600*620*1030
Масса, не более, кг	180



Рис. 10. Опытный образец дизель-стартер-генераторной установки

Натурные испытания опытного образца подтвердили параметры, представленные в табл.1.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка АИП является актуальной темой, которая в настоящее время активно развивается [13-16,18,22]. Наиболее перспективным направлением этого развития является разработка АИП на базе вентильных электрических машин

комбинированного возбуждения. Для получения наилучших удельных массоэнергетических показателей этой концепции функции стартера и генератора объединены в одной электрической машине, сама электрическая машина встроена в ДВС, для силовой электроники разработана специальная система управления, учитывающая особенности работы машины комбинированного возбуждения. Сложность реализации данной концепции заключается в том, что она должна быть встроена в корпус ДВС, то есть для каждого АИП необходимо проектировать и изготавливать специальный образец. Данная задача решена созданием гибкой проектной системы, включающей в себя подсистему синтеза по определению оптимальной геометрии и подсистему анализа, которая снижает технические риски при реализации проектов за счет применения новейших инженерных технологий на базе метода конечных элементов. Успешная реализация конкретных проектов подтверждает правильность выбора предложенного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27471. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
2. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования : тр. симпозиума: в 2 т. ; Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2–6 октября 2006 г. – М., 2006. – Т.2. – С. 111–115.
3. Копылов И.П. Электрические машины.5 изд.-М: Высшая школа,2006,607с.
4. [3] Gandzha S.A., Kiessh I.E.Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills. Procedia Engineering 129:191-194, December 2015.
5. Gandzha, S. A. Development of a software package for multilevel optimization of valve machines with axial clearance// ELMASH-2009: Electric power and electrical engineering. Problems and prospects: tr. of the symposium: in 2 vols. / VII International Scientific and Technical conf., Moscow, September 22-25, 2009 - Moscow, 2009. - Vol. 1. - С. 164-167.
6. Kopylov I. P. Designing electric machines: Textbook for universities/ I. P. Kopylov – 4th ed., reprint. and additional – М.: Yurayt Publishing House, 2011. – 767 p.
7. Shulakov N.V. Electric machines: Lecture notes / N. V. Shulakov. – Perm: Publishing House of Perm State Technical University. un-ta, 2008. – 325 p.
8. Shumakov B. D. Electric machines. Part IV Synchronous machines: a course of lectures / B. D. Shumakov. – Chelyabinsk: SUSU Center Publishing House, 2016. – 109 p

9. IEC 60034, Rotating Electrical Machines: [Electronic resource]. - International Electrotechnical Commission, 2004. - Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/2062> (access date: 06.04.2023).
10. Apsit, V.V. Synchronous machines with claw-like poles. Moscow: Gosenergoizdat, 1959 – 408c.
11. Ansys Maxwell Help Release 2022 R2 /ANSYS, Inc. and ANSYS Europe, Ltd. are UL registered ISO 9001:2015 companies, July 2022 – 3344 p.
12. Ermolin V. I. et al. The method of assembling large-sized permanent magnets. – 1982.
13. Salkovsky F. M. et al. The method of assembling large-sized permanent magnets. – 1980.
14. Stivens Ch. M. et al. The method of magnetization of the rotor of an electric machine, the magnetizing system for the rotor of an electric machine and the method of manufacturing the rotor of an electric machine: application. pat. 2010142360/07A of the Russian Federation. – 2015.
15. Toporkov D. M. Gear moment pulsations in machines with fractional windings and excitation from permanent magnets //Novosibirsk: Novosibirsk State University. – 2016.
16. Tomasov V. S., Lovlin S. Yu., Egorov A.V. Algorithms for compensation of moment pulsations of a precision electric drive based on a synchronous machine with permanent magnets //Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2013. – №. 2 (84). Pp. 77-83.
17. Kosimov B. I. Development and research of a valve motor with claw-like poles of a pilgerstan drive for the manufacture of seamless pipes: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.09. 01 : dis. - B. I., 2020.
18. E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, vol. I. New York: Wiley, 1950, p. 81.
19. G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
20. E. E. Reber, R. L. Mitchell, and C. J. Carter, "Oxygen absorption in the Earth's atmosphere," Aerospace Corp., Los Angeles, CA, Tech. Rep. TR-0200 (4230-46)-3, Nov. 1968.
21. S. L. Talleen. (1996, Apr.). The Intranet Architecture: Managing information in the new paradigm. Amdahl Corp., Sunnyvale, CA. [Online]. Available: <http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/infra/html>
22. E.Ebehard and E. Voges, "Digital single sideband detection

О РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКООБОРОТИСТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Аннотация: В представленной научной статье рассматривается вопрос создания испытательного стенда для перспективной высокооборотистой электрической машины. Автор представляет разработку и подробное описание созданного стенда, его компонентов и принципов работы. Обсуждается актуальность и значимость создания испытательного стенда для новых типов электрических машин. Целью данной работы является подведение автором итогов разработки испытательного стенда для перспективной электрической машины и результаты проведенных на нем испытаний. В статье рассматривается и анализируется информация о технических параметрах разработанного стенда и методах его использования. Кроме того, автор представляет результат испытаний, проведенных на стенде, и обсуждает полученные данные. В целом, работа представляет собой исследование процесса создания и использования испытательного стенда для новых типов электрических машин. Статья будет полезна специалистам в области машиностроения и электротехники, а также студентам, изучающим эти дисциплины. Заключительная часть работы содержит соответствующие выводы.

Ключевые слова: разработка стенда для испытаний преспективной высокооборотистой электрической машины проектирование электрической машины, испытательный стенд, электрическая машина.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где технологии развиваются стремительными темпами, разработка и производство качественного и надежного испытательного оборудования становится все более актуальной задачей. Испытательное оборудование играет ключевую роль в обеспечении качества и безопасности выпускаемой продукции, а также в контроле и мониторинге производственных процессов.

Разработка и внедрение новых технологий в области испытательного оборудования является неотъемлемой частью развития авиационной промышленности. Инновационные решения и подходы позволяют испытывать новые преспективные электрические машины, сократить время и затраты на разработку и изготовление испытательного стенда, повысить их эффективность и точность измерений, а также улучшить условия труда и безопасность эксплуатации.

В данной статье рассматриваются основные этапы и принципы разработки испытательного оборудования, а также анализируются актуальные задачи и значимость разработки. Особое внимание уделяется современным методикам проектирования, оптимизации процессов и стандартизации оборудования.

Высокооборотистые электрические машины используются в авиационной промышленности. Они предназначены для преобразования электрической энергии в механическую и обратно с высокой эффективностью и надежностью.

Высокооборотистые машины могут работать на скоростях до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту, что позволяет им обеспечивать высокую мощность и эффективность. Однако, такие машины требуют специальных испытательных стендов и технологий для тестирования и контроля их работы на высоких оборотах.

Одним из основных преимуществ высокооборотистых машин является их компактность и малый вес, что позволяет использовать их в небольших устройствах и системах. Кроме того, они обладают высокой надежностью и долговечностью, а также могут работать в широком диапазоне температур и условий эксплуатации.

Одной из ключевых проблем высокооборотистых электрических машин является обеспечение их надежной и безопасной работы на высоких оборотах и подтверждение характеристик и параметров.

Для решения этой проблемы необходимо использовать специальные испытательные стенды, обеспечивающие контроль и стабилизацию параметров работы машины на высоких оборотах. Также важно проводить тщательное тестирование и анализ результатов, чтобы выявить возможные проблемы и устранить их до начала эксплуатации машины.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Задачей проектирования испытательного стенда состоит из нескольких этапов:

- Определение требований к стенду: необходимо учесть технические характеристики испытываемой машины, условия испытаний и требования к результатам испытания.
- Выбор компонентов стенда: на основе требований определяются необходимые компоненты стенда, такие как датчики, контроллеры, системы управления и защиты.
- Разработка конструкции стенда: создание трехмерной модели стенда, определение его размеров, массы и других характеристик.

- Расчет и анализ нагрузок: определение нагрузок, действующих на компоненты стенда во время испытаний, и проверка их прочности и устойчивости.
- Оптимизация и тестирование стенда: проведение испытаний стенда для проверки его работоспособности и соответствия требованиям.
- Оформление документации: составление чертежей, спецификаций и другой необходимой документации для производства и эксплуатации стенда.

Использование классических методов проектирования испытательного стенда может быть достаточно эффективным, но в то же время требует значительных затрат времени и ресурсов. В современных условиях, когда время является ключевым фактором, многие компании предпочитают использовать более инновационные подходы, такие как цифровое моделирование и прототипирование.

Цифровое моделирование позволяет создавать виртуальные модели испытательных стендов, которые можно тестировать и оптимизировать еще до начала производства. Прототипирование позволяет создавать физические прототипы стендов, что позволяет быстрее определить возможные проблемы и внести необходимые изменения.

Использование этих технологий позволяет сократить время разработки и снизить затраты, а также повысить качество и надежность испытательных стендов. Однако, классические методы проектирования также имеют свои преимущества, такие как надежность и точность, поэтому их использование может быть целесообразным в некоторых случаях.

При использовании же для решения обратной задачи расчетной модели, в основе которой лежит определенный критерий проектирования, расчетчик гарантированно получит положительный результат решения прямой задачи проектирования машины с минимальными затратами времени.

Создание испытательного стенда для новых типов электрических машин является актуальной и значимой задачей, поскольку позволяет проверить работоспособность и безопасность новых конструкций, а также определить оптимальные режимы их работы. Это в свою очередь способствует повышению эффективности и надежности электрических машин, что является важным фактором для развития различных отраслей промышленности.

В связи с высокими темпами импортозамещения и необходимости испытаний новых высокооборотистых электрических машин был разработан стенд состоящий из двух

приводных электродвигателей, системы охлаждения и смазки приводных электродвигателей, компрессора системы охлаждения испытуемого изделия и подачи воздуха в маслотовоздушную систему, преобразователя частоты и измерительного оборудования: амперметров, вольтметров, тахометра. Электрическая машина стыкуется с приводными электродвигателями с помощью специально разработанной оснастки. Электродвигатели и оснастка смонтированы на зафиксированной жестко к столу массивной плите через держатели.

Каждая из оснасток содержит в себе корпусные элементы, позволяющие соединить приводные электродвигатели со статорной частью электрической машины, а также элементы, передающие вращающий момент к роторной части электрической машины. Соединение выходного конца вала роторной части к приводному электродвигателю осуществляется с помощью компенсационной муфты и вала шпинделя. На корпус оснастки вворачивается штуцер для подключения компрессора системы охлаждения.

Были произведены прочностные расчеты такие как:

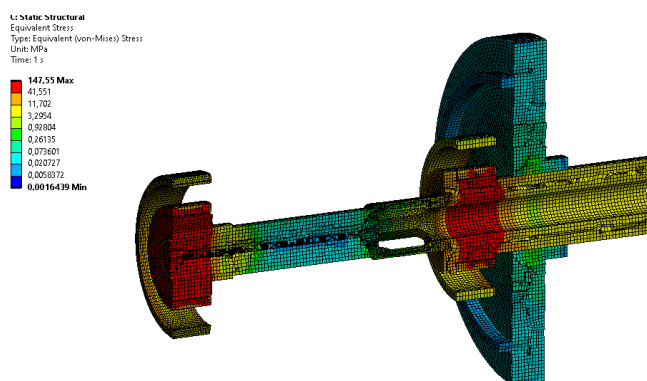


Рис 1. Распределение действующих эквивалентных напряжений в статоре вала

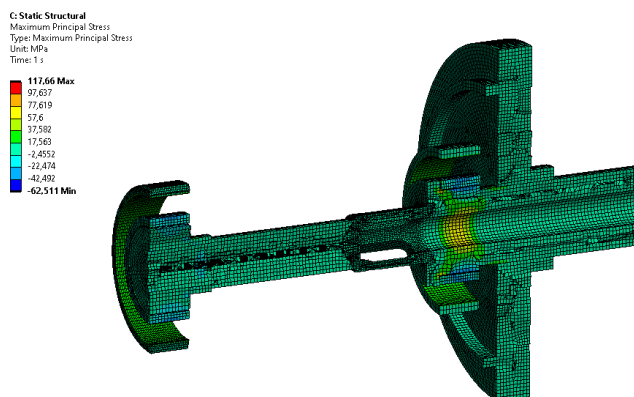


Рис 2. Распределение растягивающих элементов

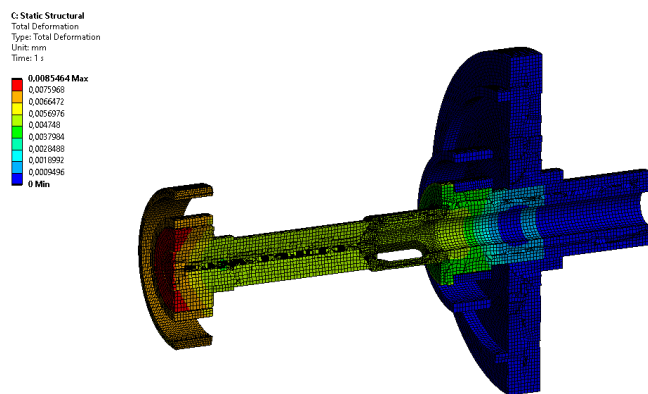


Рис 3. Распределение полной деформации в конструкции вала

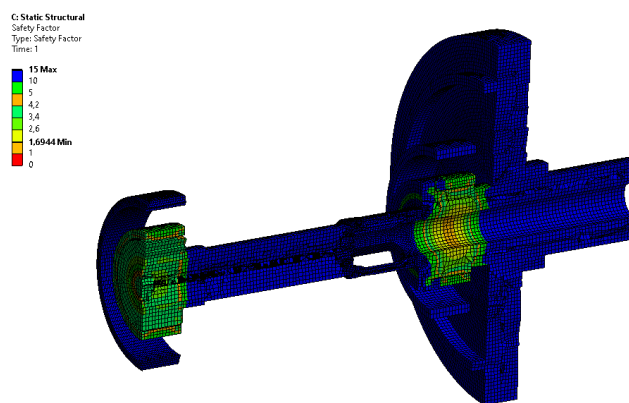


Рис 4. Распределение коэффициентов запасов прочности

Приводные электродвигатели представляют собой высокооборотные электромеханические преобразователи с жидкостной системой охлаждения. Хладагент – проточная вода. Так как испытуемое изделие является высокооборотным было принято решение использовать масляный туман в системе смазки подшипников. Масляный туман в подшипниках — это метод смазывания подшипников, при котором масло распыляется в виде очень мелких частиц. Этот метод обеспечивает более эффективное смазывание и охлаждение подшипников, что продлевает срок их службы и повышает производительность станда. Масляный туман создается в масловоздушной системе путем подачи воздуха через кран под давлением (через систему осушителей смешивается с каплями масла в интегрированной капельной системе подачи масла.) Регулятором выставлен объем подачи масла из резервуара. Давление воздуха на выходе осушителей контролируется манометром. Регулирование давления на выходе осуществляется регулятором. Контроль показаний давления подачи масловоздушной смеси в подшипники электродвигателя осуществляется по манометр.

Отвод масловоздушной смеси происходит через узел слива станда,

представляющий собой магнитный штуцер, один конец которого сопрягается с корпусом электродвигателя, а на втором конце устанавливается шланг, соединяющий штуцер с баком.

Питание электродвигателей производится от преобразователя частоты. Регулирование частоты вращения производится с выносного пульта преобразователя частоты.

Измерительное оборудование: амперметры, вольтметры, тахометр располагаются на столе стенда и подключены согласно их схемам подключения. Для измерения частоты вращения на роторной части системы «Приводной электродвигатель – электрическая машина» закреплен светоотражающий элемент, а на статорной части закреплен оптический датчик на базе фотодиода, электрически соединенный с входом тахометра.

В результате проведения испытания электрической машины на испытательном стенде была зафиксирована высокая работоспособность электрической машины и соответствие заявленным характеристикам.

В таблице 1 показаны результаты проведения испытания.

Таблица 1

Результаты проведения испытания

Фаза	n , об/мин	$U_{л}$, В	I_{ϕ} , А
А	29 899	26,77	31,27
В		27,19	
С		27,18	

Схема соединения для проверка номинальных характеристик под нагрузкой на частоте вращения 30 000 об/мин представлена на рисунке 5.

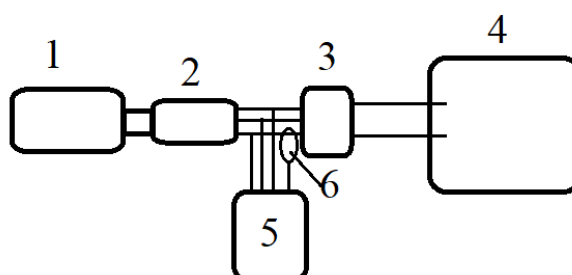


Рис 5. 1 - Испытательный стенд; 2 - испытуемое изделие; 3 - выпрямитель; 4 - электронная нагрузка ; 5 - осциллограф R&S WTH1004; 6 - токовые клещи PA-677

Импортозамещение в области производства электрических машин является важной задачей для обеспечения технологической независимости.

В России уже существуют предприятия, которые производят электрические машины, но их доля на рынке не достаточно высока. Для увеличения производства отечественных электрических машин необходимо развивать научно-технический потенциал, создавать новые технологии и материалы, а также привлекать инвестиции в эту отрасль.

Важно также учитывать, что импортозамещение не должно приводить к снижению качества продукции. Необходимо обеспечить соответствие отечественных электрических машин международным стандартам и требованиям безопасности.

Разработка испытательного стенда является важным этапом в процессе проектирования и производства новых изделий. Испытательный стенд позволяет проверить работоспособность изделия, выявить возможные неисправности и улучшить его характеристики.

В заключении, разработка испытательного стенда требует тщательной проработки всех этапов, начиная от определения целей и заканчивая созданием прототипа. Только при таком подходе можно получить качественный и эффективный испытательный стенд, который будет служить основой для разработки новых изделий.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка испытательного стенда завершена успешно. Стенд позволяет проводить испытания электрических машин на работоспособность. В процессе разработки были решены следующие задачи:

- Разработана конструкция стенда, обеспечивающая проведение испытаний.
- Реализована система управления стендом на основе преобразователя частоты.
- Обеспечена высокая точность измерений и стабильность параметров испытаний.

В результате проведенных испытаний было установлено, что стенд соответствует всем требованиям стандартам, а также обеспечивает высокую эффективность и безопасность проведения испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москаленко В. В. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебник / В. В. Москаленко. - Москва : ИНФРА-М, 2015. - 400 с.

2. Алиев И. И. Электротехника и электрооборудование [Электронный ресурс] : справочник : учебное пособие для вузов / И. И. Алиев. - Саратов : Вузовское образование, 2014. - 1199 с.

3. Каримов Р.Ш. Испытательный стенд для электрических машин и электроаппаратуры. Сборник статей Международной научно-практической конференции Инновационные процессы в научной среде: Пермь, 25 апреля 2017 года : сборник статей в 3 частях. Ч.3/ - Уфа: Аэтерна, 2017 г. – 187 с

4. Специальное технологическое оборудование [Электронный ресурс] /Информационный портал «СКЭР» URL: <https://skersto.ru/> Датаобращения 12.12.2023г.

5. Устройства, приборы, стенды и системы для контроля, проверки, поверки, диагностики. НПК «Крона» [Электронный ресурс] /URL: <http://npkkrona.ru/info/> Дата обращения 12.12.2023г.

6. Методики испытания электрооборудования [Электронныйресурс] /Информационный портал «Блог Электрика» [URL:http://www.blogelektrika.ru/news/metodiki-i-spytaniyaelektrooborudovaniya.html](http://www.blogelektrika.ru/news/metodiki-i-spytaniyaelektrooborudovaniya.html) Дата обращения 12.12.2023 г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРЦЕПТОРАМИ САМОЛЕТА ТВРС-44

Аннотация: В данной работе описывается блок управления интерцепторами самолета ТВРС - 44. Описан принцип работы особенности конструкции. Интерцептор — механизм, предназначенный для управляемого уменьшения подъемной силы на крыле. Большой частью интерцепторы конструктивно размещаются на верхней поверхности крыла. Таким образом образование подъемной силы позади интерцепторов прекращается, и эта часть крыла выключается из работы. Основное отличие интерцепторов от воздушных тормозов в том, что последние предназначены по большей части для увеличения сопротивления, не оказывая влияние на образование подъемной силы. Интерцепторы же влияют и на образование подъемной силы, и на сопротивление.

Ключевые слова: фильтр электромагнитных помех, двухуровневый инвертор, приближение Буссинеска.

I. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно, использование вторичной энергии в гражданских самолетах подразделяется на три общие категории, а именно: гидравлическая, пневматическая и электрическая. Современные тенденции показывают, что производители переходят к замене традиционных вторичных гидравлических и пневматических силовых систем на электрические альтернативы. Гидравлическая технология имеет три основных недостатка: Средняя эффективность выработки энергии низкая; силовые сети тяжелые и представляют проблемы из-за проектирования, производства; и, наконец, гидравлическая жидкость вредна для людей и окружающей среды. Все вышеперечисленные недостатки могут быть устранены с помощью электрических систем. Неотъемлемой частью электрических систем являются блоки силовой электроники. Блоки, используемые в авиации должны быть достаточно устойчивыми к воздействию множества неблагоприятных факторов окружающей среды, в то же время они должны быть достаточно легкими и компактными, иметь достаточно высокий КПД. Проблему уменьшения массы и габаритов можно решить, как на этапе разработки электрической схемы, так и на этапе конструирования блока. Уменьшение массогабаритных показателей и увеличение КПД позволяет снизить расход топлива и уменьшить количество выбросов.

Однако помимо решения задач оптимизации также необходимо уделять внимание вопросам надежности. Аэрокосмическая сфера представляет собой сложную рабочую среду для силовой электроники. Факторы окружающей среды, которые по отдельности либо вместе, создают проблемы для надежности этих систем: высокие температуры, температурные циклы, вибрация, влажность, пыль, электромагнитные помехи все это может привести к отказу компонентов и в конечном итоге поставить под угрозу безопасность самолета. Кроме опасности для самолета, отказ этих устройств также влечет за собой расходы на техническое обслуживание и время простоя. Основные стрессовые факторы, влияющие на надежность нескольких компонентов в системах силовой электроники, таких как печатные платы (ПП), полупроводники и конденсаторы, связаны с температурой [9]. Влияние температуры можно разделить еще на два фактора. В полупроводниках как средняя температура спая, так и циклическая температура являются известными факторами, оказывающими негативное воздействие. Циклическость температуры спая может быть разделена на температурный цикл спая, вызываемый температурой окружающей среды и циклическое изменение температуры спая, вызванное самонагревом компонентов. В самолетах эта проблема циклического нагрева может усугубляться местом расположения устройства. Размещение силовой электроники в корпусе самолета, находящемся под давлением, создает свои собственные проблемы с точки зрения естественного охлаждения (часто требуется принудительное охлаждение). Влияние внешних воздействий на авиационные силовые электронные системы из-за экстремальных изменений в рабочей среде, особенно высокой влажности, очень велико. Повышение влажности в корпусе системы приводит к конденсации воды, что может вызвать увеличение токов утечки и коррозии компонентов [10]. Механические воздействия, такие как вибрация и удар, в первую очередь влияют на прочность механических компонентов и соединений, электрические разъемы и печатные платы. Сбои, вызванные вибрацией, часто возникают, когда относительное движение устанавливается на резонансной частоте печатной платы [5-7]. Существует два основных типа вибрации: синусоидальная и случайная вибрация. Первая включает в себя периодическое повторение, например, простое гармоническое движение. Исследования показали, что выводы компонентов и паяные соединения выходят из строя раньше, чем впоследствии произойдет разрушения печатной платы[8].

II. КОНСТРУКЦИЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРЦЕПТОРАМИ

Блок управления интерцепторами представлен на рис.1

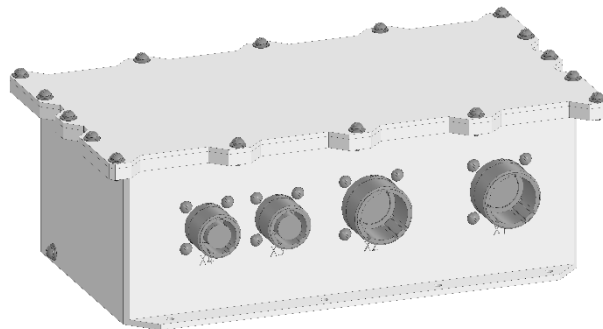


Рис. 1. Блок управления интерцепторами

Блок управления интерцепторами состоит из трех плат:

- Плата инвертора
- Плата управления инвертором
- Интерфейсная плата

Плата инвертора состоит из фильтра электромагнитных помех и двухуровневого инвертора. На рисунках 2 и 3 показаны схемы фильтра электромагнитных помех и двухуровневого инвертора. Синфазный фильтр, а также конденсаторы располагаются непосредственно на плате. Катушки индуктивности L_x крепятся к корпусу.

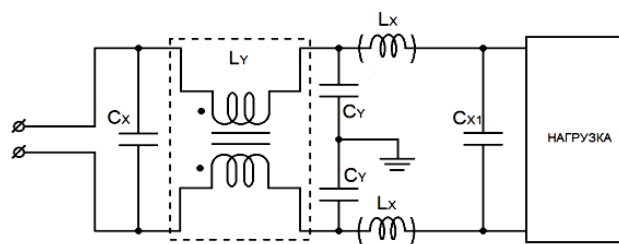


Рис. 2. Электрическая схема фильтра электромагнитных помех

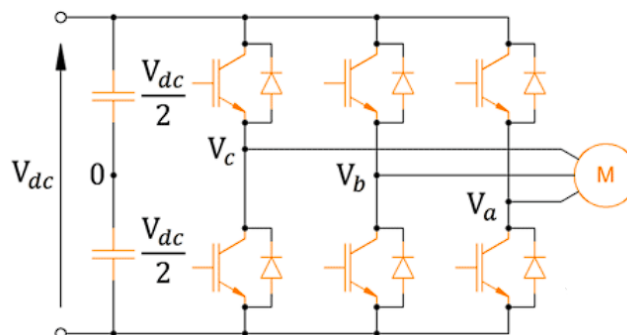


Рис. 3. Электрическая схема двухуровневого инвертора

На плате инвертора реализовано измерение напряжения на выходе фильтра электромагнитных помех, на фазах А, В, С. Измерение тока осуществляется, на фазах А, С и на выходе фильтра. Для измерения температуры силовых ключей используются терморезисторы. Информация о токах напряжениях и температуре передается на плату управления инвертором. Нижний температурный предел работы блока электроники составляет 55 градусов. Так как большинство микросхем не могут функционировать при таких низких температурах на плате инвертора реализована схема управления нагревом блока. Нагрев осуществляется с помощью мощных SMD резисторов. Данная схема управления состоит из логических микросхем способных работать при температурах -55 градусов. Если температура блока во время запуска ниже -32 градусов на нагревательные резисторы подается питание. Тепло выделяющееся от резисторов распространяется по платам обеспечивая нагрев разъемов и микросхем. Данные резисторы есть на всех трех платах блока управления интерцепторами. Когда температура плат повышается до -32 градусов включается микроконтроллер, управляющий всем блоком. Температуру микроконтроллера отслеживает отдельный терморезистор, соединенный с цифровым полигоном земли под микросхемой. Плата инвертора является четырехслойной. Структура платы представлена на рис 4. Толщина фольги составляет 105 мкм. У фильтра электромагнитных помех и двухуровневого инвертора есть свои собственные полигоны питания и земли на внутренних слоях печатной платы.

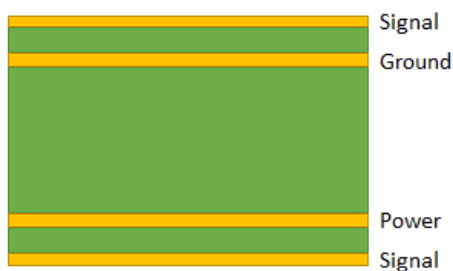


Рис. 4. Структура платы инвертора

Для эффективной передачи тепла по всей поверхности платы эти полигоны соединены большим количеством переходных отверстий с SMD резисторами, равномерно распределенными на плате. На рис пре 5 представлен терморезистор используемый для нагрева плат блока управления интерцепторами. Передача тепла осуществляется через контактную площадку.

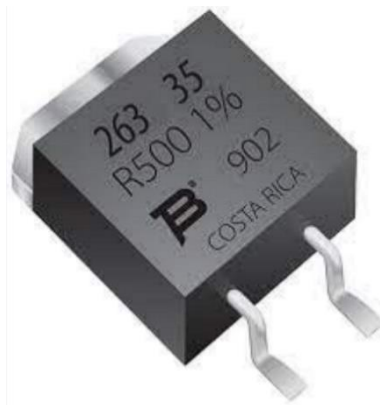


Рис. 5. Нагревательный резистор

На рис 6 представлена электрическая схема соединения нагревательных резисторов.

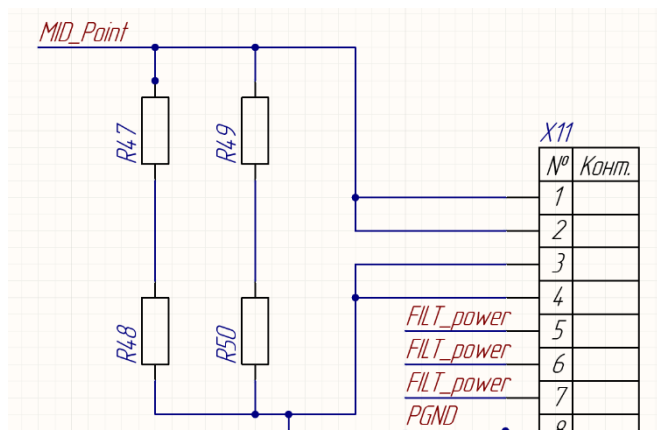


Рис. 6. Электрическая схема соединения нагревательных резисторов

Для платы инвертора корпус выступает в качестве радиатора. Для уменьшения мощности выделяемой на каждом транзисторе, а также для увеличения площади охлаждения один транзистор заменен на два соединенных параллельно. Для лучшего охлаждения транзисторы распределены равномерно вдоль стенок корпуса. На рис 4 представлен результат моделирования нагрева транзисторов.

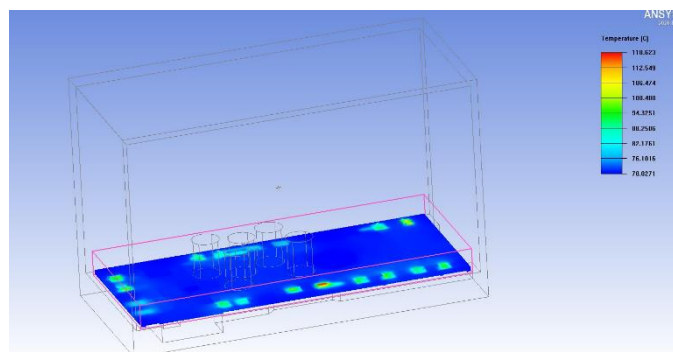


Рис. 7. Результат моделирования нагрева транзисторов

Средняя мощность каждого транзистора 6 Вт. Начальная температура блока составляла 70 градусов. В модели для учета естественной конвекции использовалось приближение Бусинесска.

Плата управления инвертором состоит фильтра электромагнитных помех питающего микроконтролер и интерфейсную плату. Микроконтролер управляет работой инвертора и получает сигналы от интерфейсной платы. На рис 8 представлена схема фильтра электромагнитных помех платы управления инвертором.

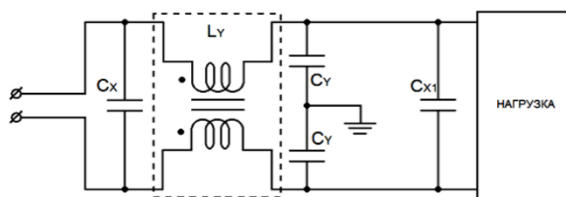


Рис. 8. Фильтр электромагнитных помех платы управления инвертором

На рис 9 представлена схема подключения нагревательных резисторов. Питание резисторов через разъем X8 осуществляется от платы инвертора. Резисторы сопротивлением 40 Ом используются в платах управления инвертором и интерфейсной платы.

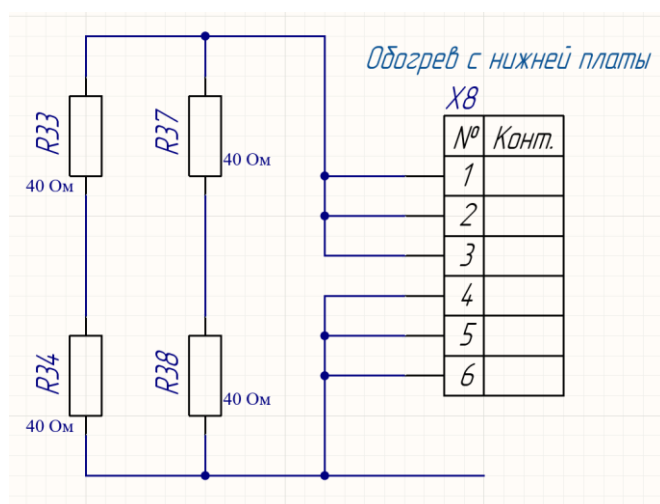


Рис. 9. Схема подключения нагревательных резисторов платы управления инвертором

На рис 10 представлена структура платы управления инвертором. Фильтр электромагнитных помех и контроллер имеют свои собственные полигоны питания и земли. Помимо управления инвертором плата также осуществляет питание драйверов,

прием и передачу сигналов с интерфейсной платы. Передача тепла от нагревательных резисторов также как и на плате инвертора осуществляется с помощью большого количества переходных отверстий и полигонов земли и питания. Два резистора греют цифровой полигон микроконтроллера, два оставшихся нагревают полигон фильтра.



Рис. 10. Структура платы управления инвертором

Интерфейсная плата осуществляет прием и передачу управляющих сигналов от контроллера к внешним устройствам. Плата имеет один цифровой полигон. Также как и на плате инвертора имеются нагревательные резисторы. Интерфейсная плата имеет ту же структуру что и плата управления инвертором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuan Z. et al. Model based optimization of propulsion inverter for more-electric aircraft applications using double fourier integral analysis //2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). – IEEE, 2020. – С. 1-7.
2. Saini H. et al. Design and Implementation of Five Level Inverter Topology for More Electric Aircraft Application //2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE). – IEEE, 2022. – С. 1-6.
3. Hoan T., COUGO B., SEGOND G. Loss reduction of WBG inverter by PWM techniques for the motion control of PMSM //2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – IEEE, 2019. – С. 1-9.
4. Suresh Kumar B., Ravi Kumar B. V., Sindhu Priya K. Modeling and Simulation of Dual Redundant Power Inverter Stage to BLDCM for MEA Application //Innovations in Electronics and Communication Engineering: Proceedings of the 7th ICIECE 2018. – Springer Singapore, 2019. – С. 167-174.
5. E.M. Benavides, Reliability model for step-stress and variable-stress situations, IEEE Trans. Reliab. 60 (1) (2011) 219–233.
6. H. Qingchuan, C. Wenhua, P. Jun, Q. Ping, Improved step stress accelerated life testing method for electronic product, Microelectron. Reliab. 52 (11) (2012) 2773–2780.

7. J. Lan, M. Yuan, H. Yuan, P. Lv, Reliability Assessment under Real World Environmental Stress, 2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering, ICRSE), 2017, pp. 1–5.
8. J.S. Karppinen, J. Li, M. Paulasto-Krockel, The effects of concurrent power and vibration loads on the reliability of board-level interconnections in power electronic assemblies, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 13 (1) (2013) 167–176.
9. N. Baker, M. Liserre, L. Dupont, Y. Avenas, Improved reliability of power modules: a review of online junction temperature measurement methods, *IEEE Industrial Electronics Magazine* 8 (3) (2014) 17–27.
10. H.Conseil-Gudla, Z. Staliulionis, M.S. Jellesen, M. Jabbari, J.H. Hattel, R. Ambat, Humidity buildup in electronic enclosures exposed to constant conditions, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 7 (3) (2017) 412–423.

РАЗРАБОТКА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПОД АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ИНТЕГРИРОВАННОГО В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА МОЩНОСТИ

Аннотация: В данной работе рассматривается проблема охлаждения электромеханических преобразователей энергии мегаваттного класса мощности, которые будут использоваться в гибридных силовых установках. Новый подход к созданию теплообменников с помощью аддитивных технологий позволит увеличить удельную мощность электродвигателей

Ключевые слова: электромеханические преобразователи энергии, система терморегулирования, аддитивные технологии, теплообменный аппарат.

I. ВВЕДЕНИЕ

Без вмешательства авиация выбросит в атмосферу более 20 миллиардов тонн углекислого газа к 2050 году. Для избежания этого международная ассоциация воздушного транспорта установила новую экологическую цель: достижение нулевых выбросов углекислого газа к 2050 году. Для достижения целей развития авиации, недостаточно использования традиционных силовых установок на основе газотурбинных двигателей. На сегодняшний день ведутся разработки гибридных силовых установок, которые обладают большей топливной эффективностью.

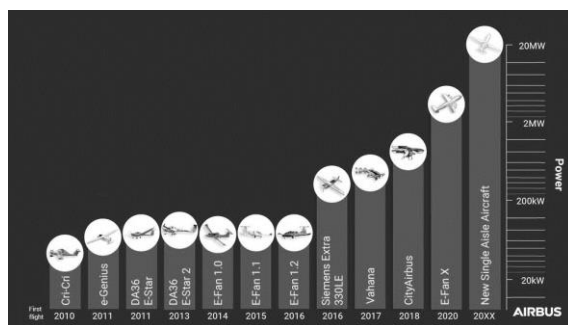


Рис. 1. Дорожная карта электромобильности Airbus

Один из гигантов авиационной отрасли Airbus с каждым годом увеличивает электромобильность своих самолетов [1].

Создание электромеханических преобразователей энергии МВт класса мощности с высокой удельной мощности требует решения ряда проблем. Одной из таких проблем

является разработка компактного теплообменного аппарата для поддержания оптимального температурного режима работы электромеханических преобразователей энергии.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. Проблематика

Существующие способы охлаждения электромеханических преобразователей энергии мегаваттного класса мощности не обеспечивают достаточной эффективности и надежности. Традиционные методы охлаждения, такие как использование вентиляторов и жидкостей имеют ряд недостатков, таких как большой вес, габариты и стоимость.

Использование аддитивных технологии может позволить создавать конструкции с большой контактной площадью, что позволит обеспечить большую эффективность охлаждения по сравнению с традиционными методами обработки.

B. Обзор существующих работ

Среди наиболее значимых работ, которые можно отнести к аналогам в разрабатываемом направлении, выделяются:

1. В первой работе разработан и испытан теплообменник, изготовленный аддитивным способом. Конструкция теплообменника основана на новой концепции поверхности, которая невозможна для изготовления с помощью традиционных методов производства, поскольку она сочетает в себе вторичную поверхность инволюты и трехмерную решетчатую структуру в качестве третичных ребер для максимизации смешивания потока и площади поверхности. Целью проектирования было рассеять 250 Вт тепловой нагрузки во время взлета [2];

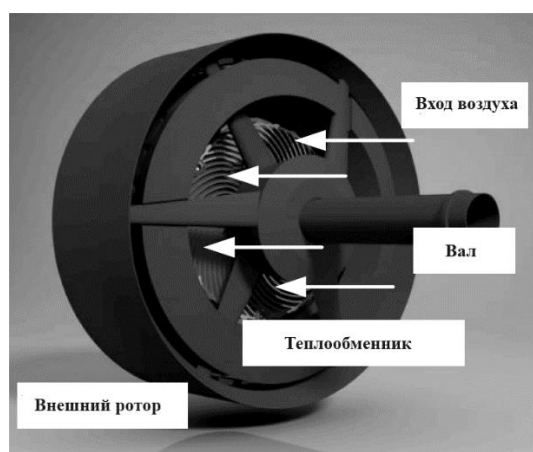


Рис. 2. Электродвигатель с интегрированным теплообменником

2. Во второй работе представлен компактный и высокопроизводительный теплообменник электрических машин мегаваттного класса с высокой удельной мощностью. Сочетание структурных и тепловых требований представляет собой сложную задачу для решетчатых и ребристых архитектур. Для решения этой проблемы предлагается новая архитектура канального типа, которая стала возможной благодаря прогрессу в области аддитивных технологий. Шероховатость поверхности определяется как критический параметр производительности. Структурная и тепловая характеристики оптимизированного теплообменника оцениваются в CFD и FEA для выполнения требований и экспериментально подтверждаются при соответствующих условиях крутящего момента и потока [3].

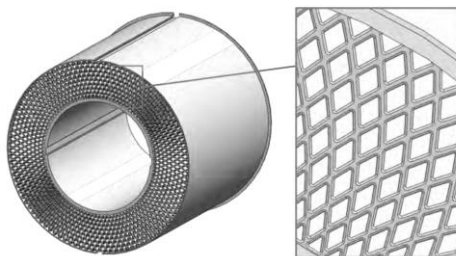


Рис. 3. Оптимизированная конструкция теплообменника с минимальным тепловым сопротивлением

С. Решения

Для выполнения цели работы будут проделаны следующие мероприятия:

- проведение аналитического обзора рынка электромеханических преобразователей энергии МВт класса мощности;
- разработка новой конструкции теплообменника, которая позволит повысить эффективность и повысить ресурс электромеханических преобразователей энергии по сравнению с традиционными теплообменниками. Новые поверхности теплообмена будут иметь сложную трехмерную геометрию и конфигурацию, которые невозможно или затруднительно реализовать при использовании стандартных теплообменных элементов, таких как трубки, ребра, пластины и т. д.
- снижение сроков и стоимости теплообменных аппаратов за счет перехода на АП, которое является современной технологией, позволяющей создавать сложные трехмерные изделия из различных материалов посредством последовательного наращивания тонких слоев. АП имеет ряд преимуществ перед традиционными методами изготовления, такими как свобода формы, снижение материалоемкости,

уменьшение количества отходов и возможность интеграции функциональных элементов в одну деталь;

— технологическая оптимизация и генеративный дизайн теплообменника с использованием АП.

D. Возможные конструкции

Одним из возможных обликов теплообменного аппарата может быть образец на рис. 4. Данная модель состоит из спиральных стенок с профилем в виде эвольвенты и имеет в каналах определенное множество матриц штырьков-турбулизаторов (1 вариант), которые в свою очередь, в перспективе могут сильнее интенсифицировать поток, за счет чего будет улучшен теплообмен.

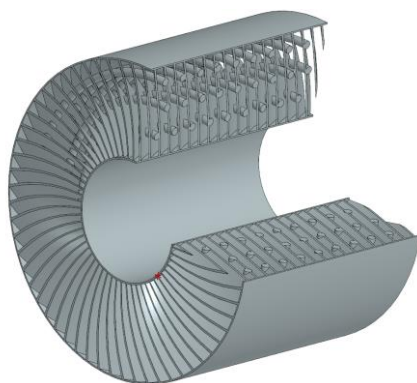


Рис. 4. Теплообменный аппарат со спиральными стенками профиля в виде эвольвенты со штырьками-турбулизаторами (1 вариант)

Снаружи обеспечивается нагрев теплообменника.

Также был рассчитан вариант со стенками в виде эвольвенты (2 вариант) геометрическая модель представленная на рис. 5.

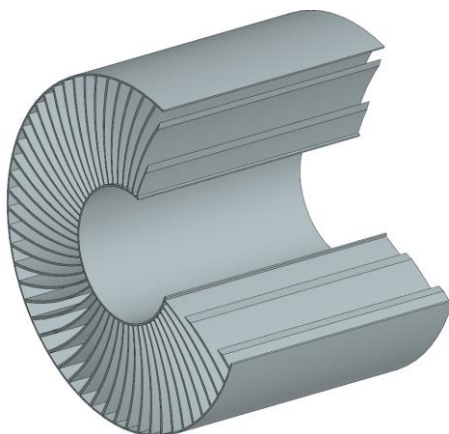


Рис. 5. Геометрическая модель варианта теплообменного аппарата со стенками в виде эвольвенты (2 вариант)

На рис. 6 представлены граничные условия для численного моделирования, приведённых выше вариантов теплообменного аппарата.

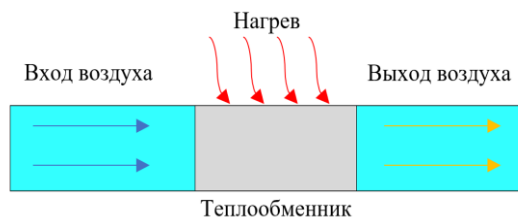


Рис. 6. Расчетная модель

Для приведенной геометрии составляются сеточные модели (рис. 7). Сеточная модель для первого варианта: твердотельная часть (solid part) состоит из 664298 узлов и 3122904 элементов, а область протекания (fluid part) воздуха из 5054307 узлов и 10717283 элементов.

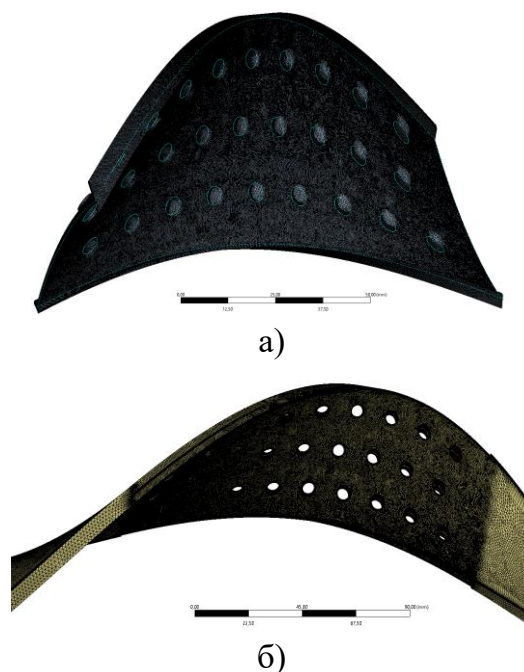


Рис. 7. Сеточная модель: а) solid part; б) fluid part.

Е. Результаты

По результатам работы было проведено расчет теплообменного аппарата с полными давлениями и температурами на входе 101325 Па и 303,15 К. На выходе задан расход через сектор – 0,0283333 кг/с. Тепловой поток задан на наружную стенку и равен 200000 Вт/м².

В результате средняя температура наружной стенки составила: для 1 варианта – 391,49 К, для 2 варианта – 443,56 К. Пиковая температура наружной стенки составила:

для 1 варианта – 407,36 К, для 2 варианта – 459,08 К.

Графические материалы по результатам численного моделирования теплообменника можно увидеть на рис. 8–11.

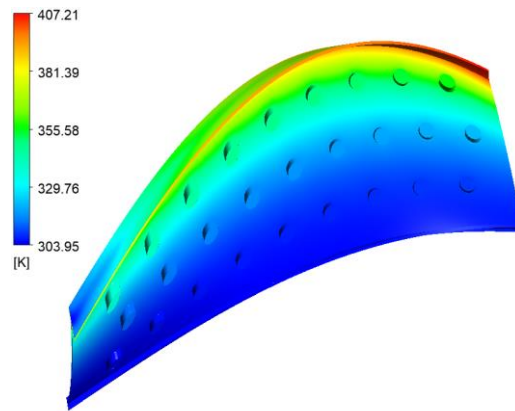


Рис. 8. Распределение температуры по стенке теплообменника для 1 варианта (сектор)

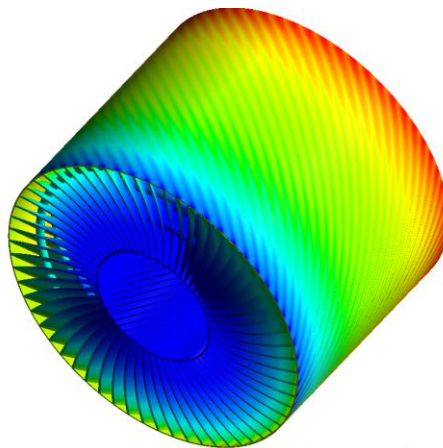


Рис. 9. Распределение температуры по стенке теплообменника для 1 варианта

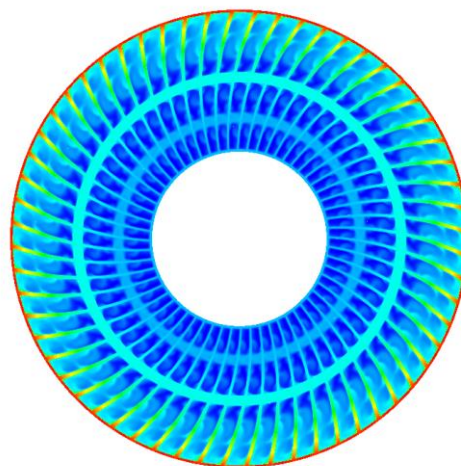


Рис. 9. Распределение температуры в поперечном сечении теплообменника для 1 варианта

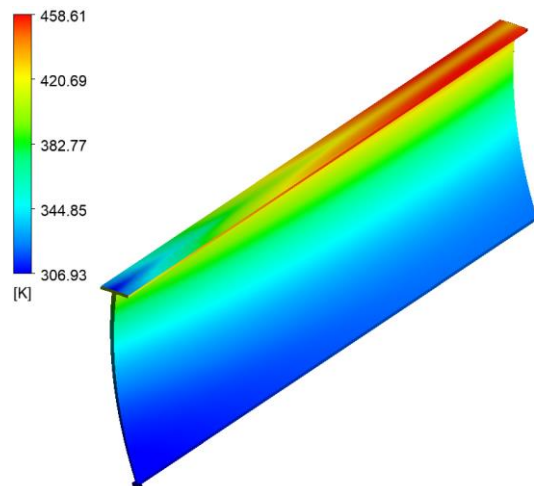


Рис. 11. Распределение температуры по стенке теплообменника для 2 варианта (сектор)

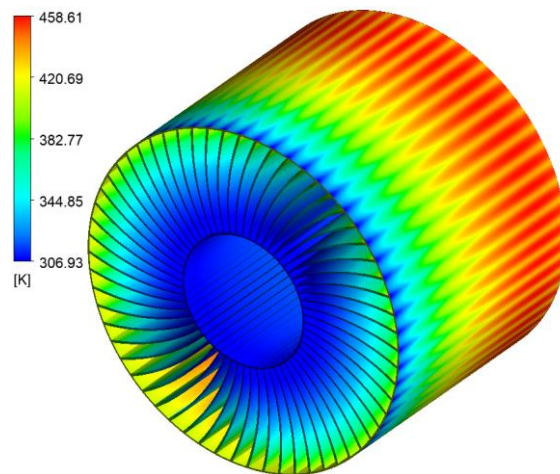


Рис. 12. Распределение температуры по стенке теплообменника для 2 варианта

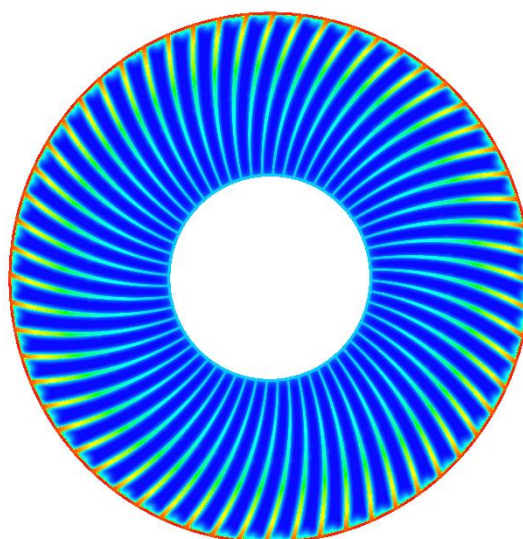


Рис. 13. Распределение температуры в поперечном сечении теплообменника для 2 варианта

Теплообменник со спиральными стенками с профилем в виде эвольвенты со штырьками–турбулизаторами позволит снизить температуру наружной стенки на 52 К. Это позволяет поддерживать оптимальный тепловой режим двигателя и предотвращать износ деталей.

В дальнейших исследованиях и разработках будут проведены:

- разработка, калибровка и валидация концепций математических моделей для системы терморегулирования;
- поисковые и численные исследования оптимальных теплообменных поверхностей и конфигураций теплообменного аппарата для разработки макета-демонстратора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Airbus lays out its urban air mobility roadmap [Электронный ресурс] / New Atlas. – 2017. – Режим доступа: <https://newatlas.com/airbus-urban-air-mobility-roadmap-electric-aircraft/50113>. – Дата обращения: 30.10.2023.
2. Wrobel R. et al. A metal additively manufactured (MAM) heat exchanger for electric motor thermal control on a high-altitude solar aircraft–Experimental characterisation //Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Т. 19. – С. 100629.
3. Spakovszky Z., Greitzer E. M., Cordero Z. C. Novel Channel-type Heat Exchanger for a Megawatt-Class Integrated Motor Drive Technology Demonstrator. – 2023.

РАЗРАБОТКА АДДИТИВНОГО ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация: Аддитивный теплообменник представляет собой комплекс из нескольких модулей, изготовленных методом 3D-печати из металлических порошков. Каждый модуль состоит из двух каналов: воздушного и жидкостного, разделенных тонкой стенкой с ребрами. Воздушный канал обеспечивает охлаждение жидкости, циркулирующей в жидкостном канале, которая в свою очередь отводит тепло от электромеханического преобразователя.

Ключевые слова: электромеханические преобразователи энергии, система терморегулирования, аддитивные технологии, теплообменный аппарат.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи энергии (ЭМП) являются ключевыми элементами электрифицированного транспорта, такого как электровелосипеды, электромобили, летательные аппараты (ЛА) с гибридными силовыми установками (СУ) и т. д. Эти устройства преобразуют электрическую энергию в механическую и наоборот, обеспечивая движение и рекуперацию транспортных средств. Однако при этом процессе возникает значительное количество тепла, которое необходимо отводить от ЭМП, чтобы поддерживать оптимальный температурный режим работы и повышать эффективность, надежность и долговечность ЭМП. Для этого используются различные системы терморегулирования, включающие в себя теплообменные аппараты (ТА), которые обеспечивают теплоотвод от ЭМП к окружающей среде или к специальному теплоносителю.

Среди мировых лидеров по производству теплообменников можно назвать такие компании как Alfa Laval (Швеция), GEA Group (Германия), Danfoss (Дания), Kelvion (Германия), SPX Flow (США), Tranter (США), API Heat Transfer (США), Hisaka (Япония), Sondex (Дания), SWEP (Швеция) и др.

Среди российских производителей теплообменников можно выделить такие компании как Ридан (Нижегород), Этра (Нижегород), Машимпэкс (Московская область), Теплотекс (Москва), Триумф (Москва), ЗЭО (Москва),

Теплоконтроль (Москва) и др.

Доля рынка теплообменников по странам и компаниям зависит от многих факторов, таких как спрос, цена, качество, инновации, конкуренция и др. По данным за 2019 год, мировой рынок теплообменников составлял около 15 миллиардов долларов, при этом Европа занимала около 30% рынка, Азия – около 40%, Северная Америка – около 20%, а остальные регионы – около 10%.

По данным за 2019 год, рынок теплообменников в России составлял около 300 миллионов долларов, при этом импорт занимал около 60% рынка, а отечественное производство - около 40%. Среди импортеров теплообменников в Россию лидировали Китай (около 30% импорта), Германия (около 20% импорта) и Швеция (около 10% импорта). Среди отечественных производителей теплообменников лидировали Ридан (около 15% производства), Этра (около 10% производства) и Машимпэкс (около 5% производства).

Рынок теплообменников является динамичным и конкурентным сектором экономики, в котором присутствуют как мировые лидеры, так и отечественные игроки. Ожидается, что в ближайшие годы рынок будет расти за счет увеличения спроса на энергоэффективные и экологичные технологии теплообмена в различных отраслях промышленности и коммунального хозяйства.

Основными мировыми производителями аддитивных технологий являются девять зарубежных компаний [1]:

1. 3D Systems (США);
2. EOS Gmbh (Германия);
3. SLM Solutions (Германия);
4. Stratasys (США);
5. Objet Geometries (США-Израиль);
6. Envisiontec (США-Германия (DLP));
7. ExOne (США);
8. Voxeljet (Германия);
9. Arcam AB (Швеция).

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В современном мире транспорт играет важную роль в экономике, социальной жизни и экологии. Однако транспорт также является одним из основных источников

загрязнения атмосферы и потребления не возобновляемых ископаемых ресурсов. Поэтому разработка и внедрение более эффективных и экологичных транспортных средств является одним из приоритетных направлений научно-технического прогресса. Одним из таких направлений является электрификация ЛА и СУ, которая позволяет снизить выбросы парниковых газов, уменьшить шум и повысить энергоэффективность. Однако электрификация требует решения ряда сложных инженерных задач, связанных с обеспечением высокой удельной мощности, надежности и безопасности электромеханических преобразователей энергии. Одна из таких задач – это обеспечение оптимального температурного режима работы этих устройств, для чего необходимо использовать эффективные теплообменники.

А. Проблематика

Глобальный тренд – более электрические ЛА и СУ. Актуальность проекта обусловлена ростом спроса на электрифицированный транспорт, требующий высокой удельной мощности электромашин и оптимального температурного режима работы электромеханических преобразователей энергии (рис. 1). Существующие теплообменники имеют много недостатков, таких как низкая эффективность, большие размеры и масса, сложность монтажа и обслуживания, ограниченность формы и геометрии.

В данном проекте предлагается разработать новый тип теплообменников, используя аддитивное производство (АП), или 3D-печать, которое позволяет создавать теплообменники произвольной формы и сложности, используя новые геометрические структуры.

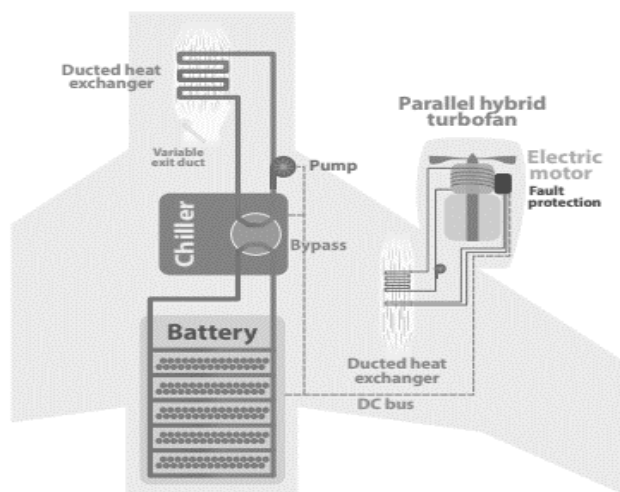


Рис. 1. Архитектура системы терморегулирования параллельной гибридной СУ

На рис. 2 показаны два способа изготовления трехмерных объектов: традиционный и аддитивный. Традиционный способ заключается в вырезании или высверливании изделия из цельного блока материала (металла). Этот способ называется субтрактивным, так как он удаляет лишний материал от исходного блока. Аддитивный способ заключается в добавлении материала по слоям, следуя электронной модели изделия. Этот способ использует 3D-принтер, который может работать с различными материалами, такими как пластик, порошок или жидкость. Аддитивный способ имеет ряд преимуществ перед традиционным, таких как:

- 1) возможность создавать более сложные и точные формы и детали;
- 2) экономия материала и энергии, так как не происходит отходов и потерь;
- 3) уменьшение времени и стоимости производства, так как не требуется дополнительная обработка и сборка;
- 4) гибкость и индивидуализация производства, так как можно легко изменять параметры и характеристики изделия.



Рис. 2. Сравнение традиционного и аддитивного производства [1]

Цель выполнения работы – разработать аддитивный воздушно-жидкостный теплообменный аппарат (АВЖТА) для терморегулирования электромеханических преобразователей энергии, обладающий высокой эффективностью и компактностью, а также легко интегрироваться в различные виды электротранспорта.

В. Обзор существующих работ

Среди наиболее значимых проектов, которые можно отнести к аналогам в разрабатываемом направлении, выделяются проекты, финансируемые Европейским союзом в рамках программы Horizon 2020:

1. Проект NATHENA (New Additive manufacturing Heat Exchanger for Aeronautic) – направлен на разработку конструкции сложного компактного теплообменника,

наилучшим образом отвечающего тепловым характеристикам, изготовленного методом аддитивного производства. Новые компактные воздушно-воздушные теплообменники (ВВТА), разработанные в рамках проекта, позволят создать эффективную систему терморегулирования для гибридной силовой установки. Общий бюджет проекта составляет 1,5 миллиона евро (рис. 3-а) [2].

2. Проект C-ALM AONE (Compact - Additive Layer Manufactured Air Oil Heat Exchanger) – направлен на проектирование, разработку, производство и испытание компактного воздушно-масляного ТА для использования в авиационных двигателях следующего поколения с редуктором со сверхвысокой степенью двухконтурности для аэрокосмической промышленности. Общий бюджет проекта составляет 1,9 миллиона евро (рис. 3-б) [3].

3. Проект SACOC (Aerodynamic upgrade of Surface Air Cooled Oil Cooler) – целью проекта является разработка и оптимизация аэродинамического дизайна геометрии поверхностей воздушно-масляного ТА в наружном контуре авиационных двигателей со сверхвысокой степенью двухконтурности с использованием аддитивного производства для уменьшения сопротивления и увеличения теплоотдачи. Общий бюджет проекта составляет 648106 евро (рис. 3-в) [4].

4. Проект HEWAM (HEAT EXCHANGER WITH ADDITIVE MANUFACTURING) – направлен на разработку и изучение новых концепций противоточных воздушно-жидкостных теплообменников с использованием аддитивного производства для применения в различных отраслях, таких как энергетика, транспорт, химия и биотехнологии. Общий бюджет проекта составляет 1,5 миллиона евро (рис. 3-г) [5].

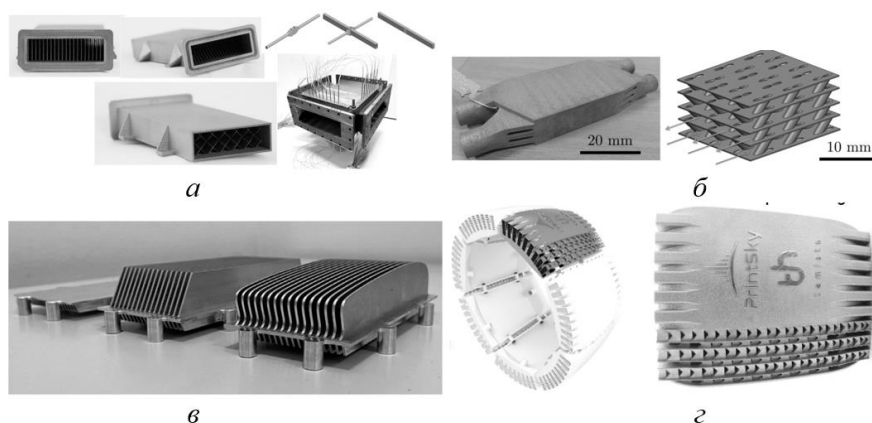


Рис. 3. Существующие конкурентные работы по ТА:
а – версии ВВТА по проекту NATHENA; б – ВЖТА по проекту C-ALM AONE;
в – версии ВЖТА по проекту SACOC; г – ВЖТА по проекту HEWAM

С. Решения

Для выполнения цели работы будут проделаны следующие мероприятия:

— проведение аналитического обзора рынка воздушно-жидкостных теплообменников (ВЖТА), которые широко применяются для терморегулирования электромеханических преобразователей энергии. В обзоре будут рассмотрены различные типы ВЖТА, такие как трубчатые, пластинчатые, ребристые и т. д., их преимущества и недостатки, а также существующие проблемы и вызовы, связанные с их проектированием, изготовлением и эксплуатацией. Особое внимание будет уделено анализу тепловой и гидравлической эффективности, коэффициенту компактности, стоимости и длительности производства ВЖТА;

— разработка новых поверхностей теплообмена для ВЖТА с использованием АП, которые позволят повысить эффективность, компактность и снизить потери тепла по сравнению с традиционными теплообменниками. Новые поверхности теплообмена будут иметь сложную трехмерную геометрию и конфигурацию, которые невозможно или затруднительно реализовать при использовании стандартных теплообменных элементов, таких как трубки, ребра, пластины и т. д. Новые поверхности теплообмена будут обеспечивать улучшенный тепловой контакт между воздухом и жидкостью, увеличение площади теплообмена, уменьшение теплового сопротивления и гидравлического сопротивления, а также уменьшение массы и габаритов АВЖТА;

— снижение сроков и стоимости теплообменных аппаратов за счет перехода на АП, которое является современной технологией, позволяющей создавать сложные трехмерные изделия из различных материалов посредством последовательного наращивания тонких слоев. АП имеет ряд преимуществ перед традиционными методами изготовления, такими как свобода формы, снижение материалоемкости, уменьшение количества отходов и возможность интеграции функциональных элементов в одну деталь;

— технологическая оптимизация и генеративный дизайн теплообменника с использованием АП.

Д. Возможные конструкции

Одним из возможных обликов АВЖТА может быть образец на рис. 4. Данная модель имеет в каналах протекания масла определенное множество матриц штырьков-турбулизаторов, которые в свою очередь, в перспективе могут сильнее

интенсифицировать поток, за счет чего будет улучшен теплообмен.

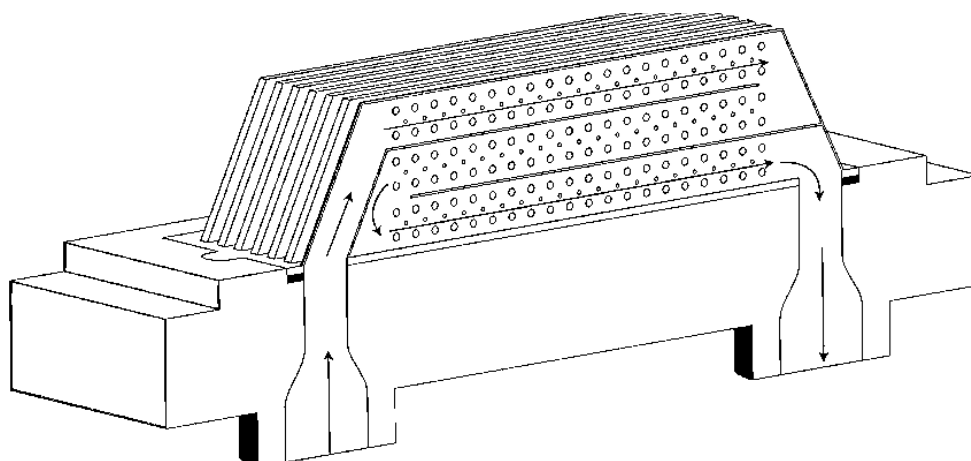


Рис. 4. Возможный вариант облика ВЖТА со штырьками-турбулизаторами (в разработке)

На рис. 4 стрелками внутри ребер теплообмена показано направления течение охлаждаемой жидкости (масла). Снаружи обеспечивается протекание воздушной среды с необходимым массовым расходом.

Однако данная для первого этапа проверочных расчетов принимается геометрическая модель представленная на рис. 5.

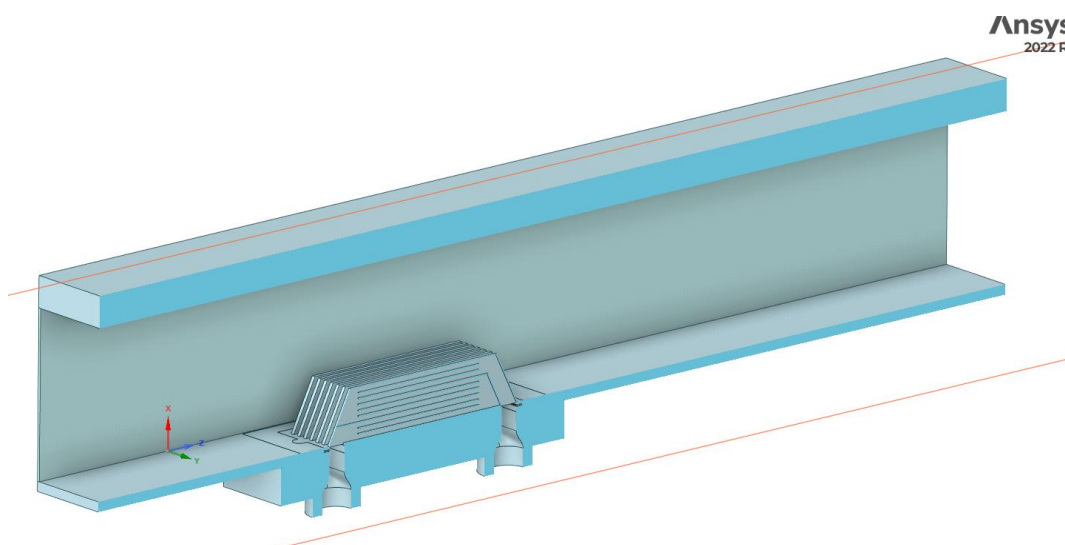


Рис. 5. Геометрическая модель варианта ВЖТА с разделителями в канале для интенсификации потока

На рис. 6 представлены граничные условия для численного моделирования приведенного выше варианта ВЖТА.

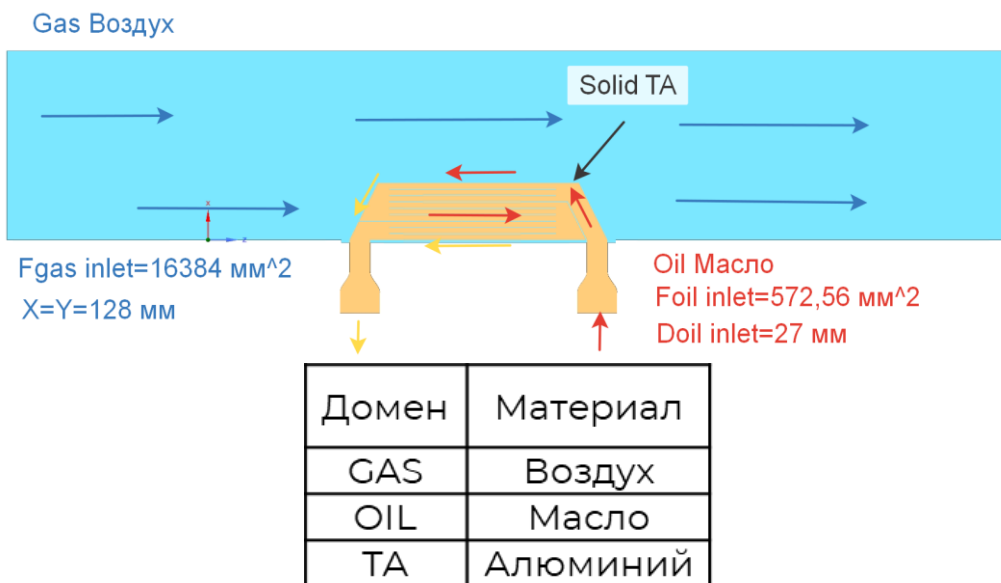
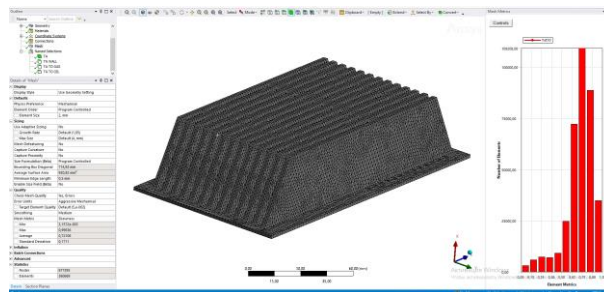
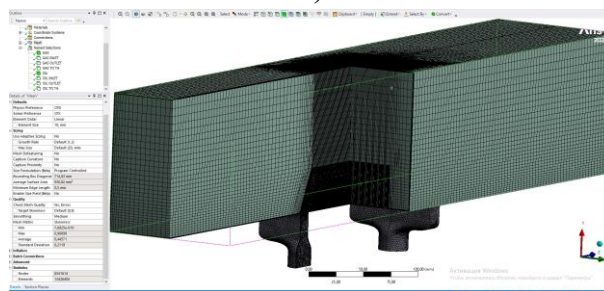


Рис. 6. Расчетная модель

Для приведенной геометрии составляются сеточные модели (рис. 7). Сеточная модель твердотельной части (solid part) состоит из 677395 узлов и 360669 элементов, а область протекания (fluid part) для масла и воздуха из 8341614 узлов и 13426404 элементов.



а)



б)

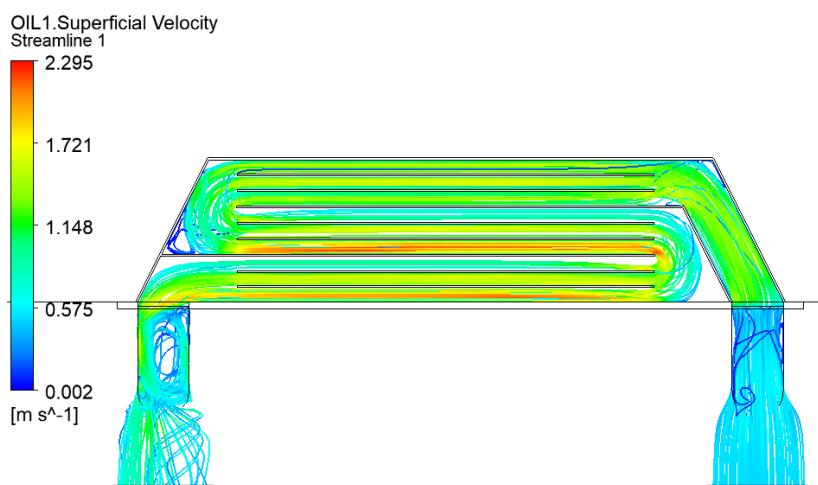
Рис. 7. Сеточная модель: а) solid part; б) fluid part.

Е. Результаты

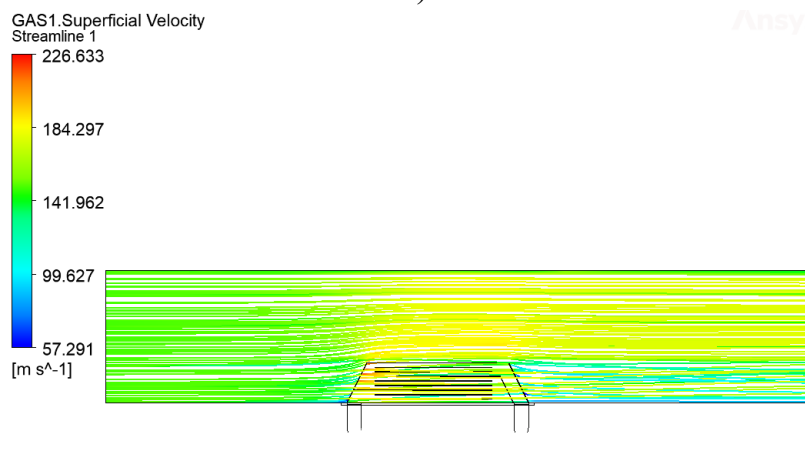
По результатам работы было проведен совмещенный расчет ВЖТА на определенном режиме со скоростями и полными температурами на входе в доменах

воздуха – 150 м/с и 300 К, масла – 0,5 м/с и 400 К. На выходе из доменов проставлены осредненные статические давления равные для воздуха 122,364 кПа, для масла 105,000 кПа. Полученные значения расходов соответствуют в доменах воздуха 3,84 кг/с, масла 0,28 кг/с. Полные температуры на выходе доменов воздуха – 301,74 К, масла – 386,78 К. Таким образом, перепад полных температур для доменов воздуха и масла соответственно равен (+1,74) К и (-13,22) К.

Графические материалы по результатам численного моделирования ВЖТА можно увидеть на рис. 8–10.



а)



б)

Рис. 8. Распределение линий тока в домене а) масла и б) воздуха (среднее меридиональное сечение)

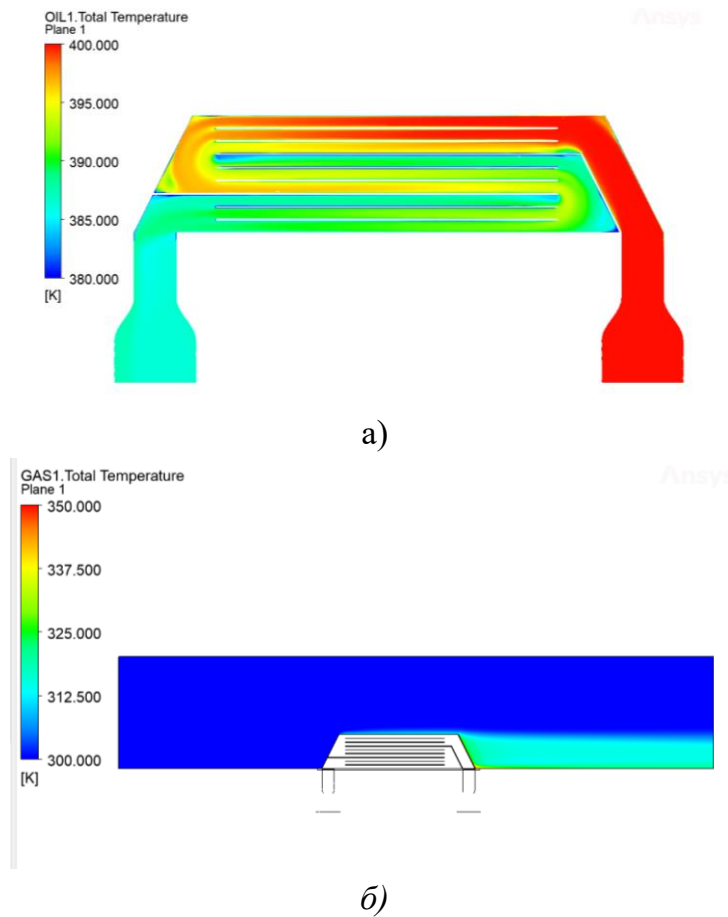


Рис. 9. Распределение полных температур в домне а) масла и б) воздуха (среднее меридиональное сечение)

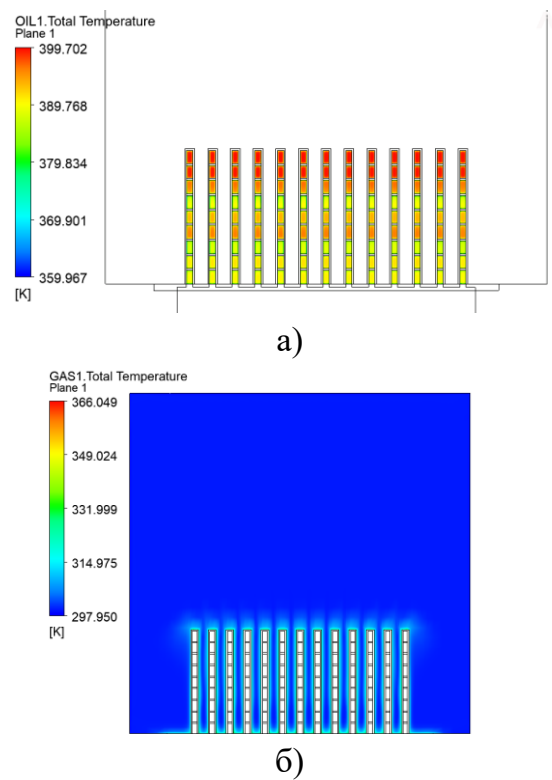


Рис. 10. Распределение полных температур в домне а) масла и б) воздуха (поперечное сечение)

Современный ВЖТА для авиации способен понизить температуру масла на 10–15 градусов. Это позволяет поддерживать оптимальный тепловой режим двигателя и предотвращать износ деталей.

В дальнейших исследованиях и разработках будут проведены:

- разработка, калибровка и валидация концепций математических моделей для системы терморегулирования и АВЖТА;
- поисковые и численные исследования оптимальных теплообменных поверхностей и конфигураций АВЖТА для разработки макета-демонстратора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Электронный ресурс] / Деловой профиль. – Режим доступа: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/>. – Дата обращения: 29.10.2023.
2. New Additive manufacturing Heat Exchanger for Aeronautic. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/785520>. – Дата обращения: 29.10.2023.
3. Compact - Additive Layer Manufactured Air Oil Heat Exchanger.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/831880>. – Дата обращения: 29.10.2023.
5. Aerodynamic upgrade of Surface Air Cooled Oil Cooler (SACOC). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/831977>. – Дата обращения: 29.10.2023.
6. HEWAM – HEAT EXCHANGER WITH ADDITIVE MANUFACTURING. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://temisth.com/hewam-heat-exchanger-with-additive-manufacturing/>. – Дата обращения: 29.10.2023.

ТУРБОВАЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭЛЕКТРИФИРОВАННЫМ ТУРБОКОМПРЕССОРОМ

Аннотация: В представленной работе разработана методика оптимизации параметров газотурбинного двигателя с электрифицированным турбокомпрессором, включая степени повышения давления, температуры газов и степень гибридизации. Под электрифицированным турбокомпрессором понимается агрегат объединяющий электрическую машину и турбокомпрессор ГТД. Исследование проведено с использованием математической модели турбовального двигателя первого уровня в квазистационарной постановке. Основным ограничением является температура газов за осевой частью компрессора, оказывающая влияние на тепловой режим электрической машины. Результаты выявили, что степень гибридизации должна быть согласована с тепловой энергией, а максимальное значение достигается при 1200 К. Применение электрифицированного турбокомпрессора сопровождается увеличением удельной мощности, однако эффективный КПД достигается при высоких температурах газа (порядка 1500 К) и низких значениях степени гибридизации (порядка 0,1). Разработанный подход выделяет технические требования к электрической машине, а дальнейшие исследования направлены на более широкий диапазон двигателей и конструктивные аспекты электрифицированного турбокомпрессора.

Ключевые слова: турбовальный двигатель, гибридно-электрическая силовая установка, электрифицированный турбокомпрессор, степень гибридизации, удельная мощность, эффективный КПД.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением большинства производителей авиационных двигателей в сегменте региональных самолетов (General Electric, Pratt & Whitney) становится переход к гибридным силовым установкам [1]. Внедрение гибридных силовых установок в региональные авиаперевозки потенциально обеспечивает возможность короткого и вертикального взлета и посадки при росте энергоэффективности [2]. Потенциал гибридных силовых установок обуславливается комбинацией источников энергии, основанных на традиционных энергоемких топливах и перспективных накопителях энергии. Для реализации этих преимуществ существует множество концептуальных схем, среди которых схема параллельного гибрида отмечается как наиболее предпочтительная [3]. В схеме параллельной гибридной силовой установки

основными ограничениями выступают: низкая удельная масса электротехнических комплексов; проблемы, связанные с условиями эксплуатации на борту воздушных судов, вопрос механической интеграции электротехнического комплекса и силовой установки [4].

Технологии создания конструкций подобного рода и силовых установок на их основе еще далеки от своего оптимума и требуют проведения обширных междисциплинарных научных исследований для обеспечения возможности практической реализации. Ключевым ориентиром большинства производителей является разработка электрических машин мощностью порядка 1000 кВт. Подходы к проектированию электромеханических преобразователей энергии разрабатываются в ведущих зарубежных университетах и исследовательских центрах: *Massachusetts Institute of Technology, Illinois Institute of Technology, University of Nottingham, Technical University of Munich, NASA, Siemens* и т.д. . В работах рассматриваются аспекты проектирования электромеханической части авиационных электрических машин высокой мощности, вопросы удаления тепловых нагрузок и механической интеграции с двигателями и приводами гибридных силовых установок.

II. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ГИБРИДНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

Существует множество концептуальных схем энергетических комплексов, образующих гибридную силовую установку. Подавляющее большинство из них предполагает использование электромеханического преобразователя энергии, сопряженного с газотурбинным двигателем. Архитектура гибридных и электрических силовых установок определяет каким образом сопряжена тепловая машина и компоненты электротехнического комплекса. Схема электротехнической части определяет ключевой потенциал совершенствования силовой установки как с точки зрения эффективности двигателей, так и с точки зрения энергетической системы. Подходы к созданию ГСУ параллельной схемы на базе турбовинтовых и турбовальных двигателей представлены на рисунке 1 [5].

Схема параллельного гибрида, предполагающая возможность гибридизации мощности представлена на рисунке 1-а. Даная схема предложена авторами в источнике [6] и подробно исследованная на уровне самолета и подсистем в источниках [7, 8]. В данной конфигурации классический турбовинтовой газотурбинный двигатель и двигатель, приводимый электрической машиной, не имеют ни механической ни

энергетической связи. Для двух систем имеются отдельные источники питания. Следовательно, этими системами можно управлять независимо друг от друга в пределах их индивидуальных эксплуатационных ограничений. С одной стороны, это обеспечивает оптимальную степень гибридизации для каждой фазы полета, с другой требует гибридизации всего полетного цикла. Еще одним недостатком подобной конфигурации является потребность в радикальном изменении конструкции планера летального аппарата [9].

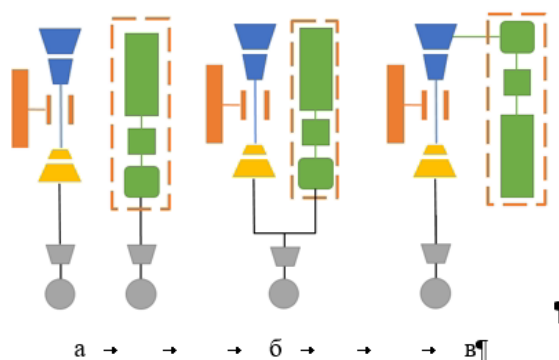


Рис. 1. Принципиальные схемы гибридных силовых установок последовательной схемы

Схемы, представленные на рисунке 1-б и в, не предполагают изменения конструкции движителей. Рисунок 1-б представляет концептуальную схему параллельного гибрида с механически интегрированной электрической машиной [10]. Преимущества данной схемы заключается в том, что электротехническую систему не нужно проектировать на полную мощность силовой установки. Схема позволяет нивелировать потребность ГСУ в высоковольтных линиях передачи энергии. В исследованиях отмечается, что применение параллельной схемы при степени гибридизации энергии на взлетном режиме $H_E=25\%$ потенциально обеспечивает снижение расхода топлива за полетный цикл на 20-30% [11]. Регулирование режимами работы силовой установки осуществляется посредством изменения режима работы электрической машины. Несмотря на то, что в данной конфигурации газотурбинный двигатель работает на постоянном режиме работы, механическая связь, требует дополнительного контроля параметров отдельных узлов (запаса по пропажу в компрессоре, температуры газов за турбиной).

На рисунке 1-в представлена схема параллельной гибридной силовой установки с электрифицированным турбокомпрессором. В данной схеме электрическая машина,

интегрирована в цикл газотурбинного двигателя [12]. Данная конфигурация не предполагает гибридизацию движителей, соответственно не требует высоковольтных линий передачи энергии. Оценка на уровне воздушного судна показала [13], что при $H_E=20\%$ и применении линейных электрических машин, удельный расход топлива силовой установки снижается более чем на 45%. Данное преимущество обеспечивалось за счет разрыва механической связи между турбиной и компрессора турбовального двигателя, разрыв механической связи позволяет работать компрессору и турбине на оптимальных частотах вращения. Разделение компрессора также оказывает положительный эффект на характеристики силовой установки. Исторически переход от однокаскадных компрессоров, характерных для 2-ого поколения к двухкаскадным турбокомпрессорам в ГТД 3-ого поколения позволил радикально усовершенствовать характеристики силовых установок. Основным ограничением в реализации ГСУ с интегрированной в цикл электрической машиной, является то, что степень гибридизации не может быть выбрана произвольна, так как необходимо обеспечить связь термодинамических параметров в многокаскадном компрессоре. В рамках данной работы ставится задача к выработке подходов к проектированию ГТД с электрифицированным турбокомпрессором и обоснованию оптимальных значений степени гибридизации. В исследовании представлена методика выбора оптимальных термодинамических параметров газотурбинного двигателя (степени повышения давления и температуры газов), позволяющей выработать технические требования к электрической машине, работающей в составе электрифицированного турбокомпрессора.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГТД С ЭЛЕКТРИФИРОВАННЫМ ТУРБОКМПРЕССОРОМ

В рассматриваемой схеме ТВаД с электрифрованным турбокомпрессором (рисунок 2) электрическая машина осуществляет подвод механической мощности к осевой части компрессора.

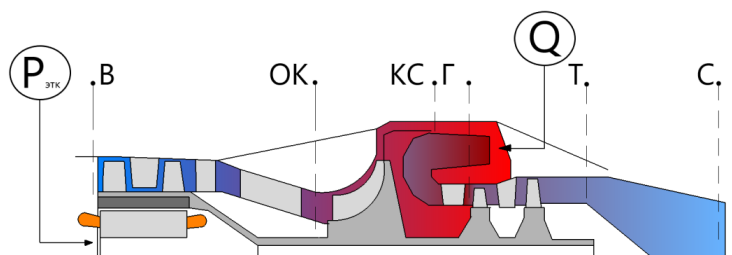


Рис. 2. Расчетная схема ТВаД с электрифрованным турбокомпрессором

За счет размещения машины в осевом компрессоре подводимая (от электрической машины) механическая энергия в лопаточном венце компрессора преобразуется в работу сжатия. Как и в традиционном двигателе в ГТД с электрифицированным турбокомпрессором после сжатия в компрессоре рабочее тело поступает в камеру сгорания в которой к нему подводится тепловая энергии. За счет роста температуры и теплоемкости рабочего тела, обусловленного его физическими свойствами, его теплосодержание увеличивается. Сжатое рабочее тело с высоким теплосодержанием поступает в турбину, в которой часть энергии расходуется на привод компрессора, а другая на привод движителей. В результате эффективный КПД цикла газотурбинного двигателя можно записать в виде:

$$\eta = \frac{P_e}{Q + P_{эм}}$$

где Q – мощность, подведенная к рабочему телу в камере сгорания; $P_{эм}$ – мощность, подведенная к осевой части компрессора.

Применяя известные термодинамические соотношения, эффективную мощность ТВаД P_e можно выразить как удельную работу расширения в турбине выводимую из цикла; мощность, подведенную к рабочему телу в камере сгорания Q , через произведение относительного расхода топлива q и низшую теплотворную способность керосина H_u , электрическую $P_{эм}$ через произведение затраченной работы сжатия в компрессоре $L_{ок}\eta_{ок}$ КПД электромеханической части и расход воздуха на входе в двигатель.

$$\eta = \frac{L_{ст}}{q H_u + (q - 1)L_{ок}\eta_{ок}\eta_{этк}}$$

Для характеристики доли тепловой и электрической энергии используемой в цикле газотурбинного двигателя с электрифицированным турбокомпрессором применим понятие степени гибридизации энергии H_E , предложенное авторами в источнике [14]:

$$H_E = \frac{P_{el}}{Q + P_{el}}$$

Значение H_E , равное 0, характеризует традиционную конструкцию двигателя, где силовая установка. Значение H_E , равное 1, соответствует электрической силовой

установке – случаю, когда вся мощность для привода движителей подступает через от накопителей электрической энергии. Очевидно, что выбор степени гибридизации напрямую определяет характеристики ТВаД с электрифицированным турбокомпрессором. Поскольку при фиксированном значении мощности свободной турбины и подводе дополнительной мощности к компрессору позволяет сократить расход топлива. Для традиционных газотурбинных двигателей известно, что минимальное значение расхода топлива обеспечивается при максимизации степени повышения давления, при учете потерь работы сжатия в проточной части, и подбора оптимального значения температуры газов на входе в камеру сгорания.

Выбор оптимального соотношения между степенью сжатия и температурой газа в ТВаД с электрифицированным турбокомпрессором можно произвести через математическую модель первого уровня. В данной модели двигатель характеризуется уравнениями, отражающими реальные условия их совместной работы, с дискретным изменением теплоемкости рабочего тела и формальным заданием значений коэффициентов, характеризующих потери в элементах двигателя. В качестве расчетного режима для исследования принимается максимальный взлетный режим ($H=0$; $M=0$; P), поскольку данный режим будет характеризоваться максимальными действующими тепловыми нагрузками, действующими в конструкции. Последние во многом определяют мощность, которую можно подвести к осевой части компрессора от электрической машины.

Температура активных элементов электрической машины из соображений приемлемого ресурса ограничивается значением 200 С, целесообразно ограничить температуру воздуха за осевой частью компрессора данным значением. Ограничение безусловно может быть нивелировано использованием не освоенных технологически материалов, однако этот вопрос требует отдельных исследований.

Условий совместной работы узлов в системе ТВаД и взаимосвязь между параметрами газоздушного потока, проходящего через двигатель, определяется системой уравнений: баланса расходов в проточной части двигателя и баланса мощностей на валу турбокомпрессора, изменение энтальпии рабочего тела и изменения давлений.

Исследование проводится для различных классов мощностей газотурбинных двигателей. Для этого в ходе расчета подбирается требуемая мощность двигателя P_{GT}

путем варьирования температуры газов на выходе из камеры сгорания. При это накладывается ограничение на степень повышения давления в замыкающей центробежной ступени. Значение ограничивается из соображений прочности предельной окружной скоростью на наружном диаметре рабочего колеса $u_{цбк} < 600$ м/с коэффициент напора центробежной ступени принимается равным $H_z = 0,65$. В результате степень повышения давления в центробежной ступени определяется по формуле:

$$\pi_{цбк} = \left(1 + \frac{H_z u_{цбк}}{c_p T_{OK}} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

В результате расчётного исследования определяется оптимальная температура газов на выходе из камеры сгорания, соответствующая максимальному эффективному КПД цикла турбовального двигателя при ограничении степени сжатия в компрессоре.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование производилось для при фиксированных значениях суммарной степени повышения давления в двигателе π_{Σ} и расходе воздуха G_B . На первом этапе были определены соотношения между π_{Σ} и G_B , поскольку соотношение данных параметров определяет класс мощности газотурбинного двигателя. Электрифицированный турбокомпрессор предполагает наличие

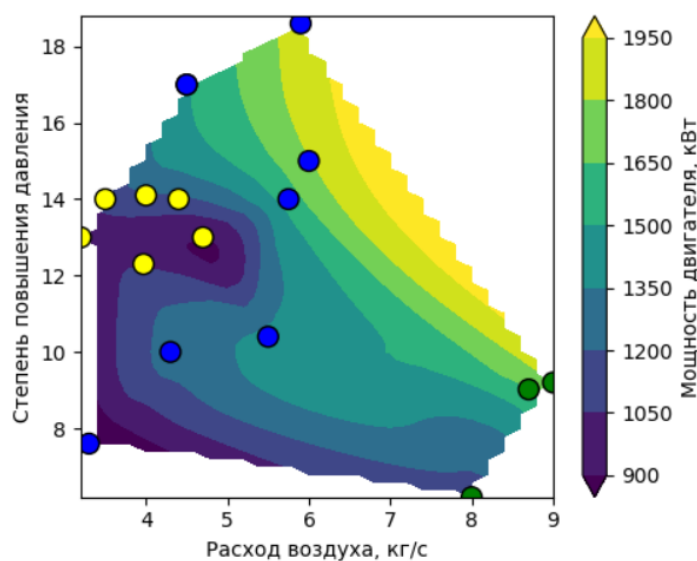


Рис. 3. Зависимость мощность ТВаД от расхода воздуха G_B и степени повышения давления π_{Σ} . (Желтые точки двигатели с двумя центробежными ступенями, синими двигатели с осецентрированные компрессора, зеленым с осевым компрессором)

В результате аппроксимации данных проиллюстрированной на рисунке 3, выведены соотношения между расходом воздуха и степенью повышения давления для двигателей с осецентрированным компрессором. Так для двигателя мощностью порядка 1 МВт, соотношение степень сжатия $\pi_{\Sigma} = 8 - 10$, расход воздуха $G_B = 3 - 4$ кг/с.

При проектировании двигателя немаловажным является выбор оптимальной точки зрения расхода топлива температуры газов перед турбины. Поскольку в ТВаД с электрифицированным турбокомпрессором используется два источника энергии, в качестве оптимизируемого параметра будет использована эффективная Иллюстрация зависимости эффективного КПД газотурбинного двигателя η и удельной мощности $P_{уд} = P_e/G_B$ от температуры газов перед турбиной T_T^* представлена на рисунке 4. При изменении T_T^* для традиционного двигателя, при фиксированных значениях $\pi_{\Sigma} = 8$ и $G_B = 3,5$ кг/с, удельная тяга монотонно возрастает, поскольку увеличение T_T^* при постоянном физическом расходе воздуха G_B , увеличивает тепловую энергию, подведенную в цикл. Зависимость для эффективного КПД имеет нелинейный характер, обусловленный существованием абсолютного максимума по удельному расходу. При расчетах КПД узлов принимался неизменным.

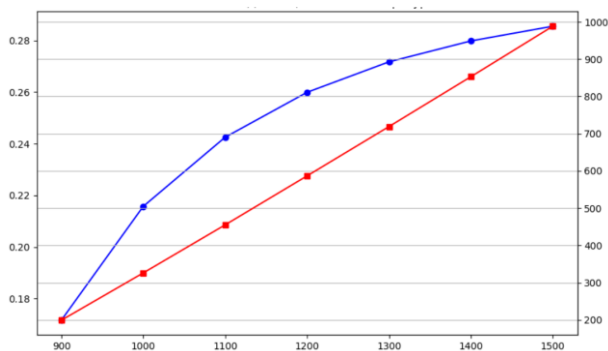


Рис. 4. Зависимость эффективного КПД и удельной мощности от температуры газов на выходе из КС. (синяя линия- эффективный КПД; красная линия удельная мощность, Дж/кг)

Для анализа пророста эффективности на уровне газотурбинного двигателя от внедрения электрифицированного турбокомпрессора («подкрутки» осевой части компрессора) построены зависимости эффективного КПД (рисунок 5) и удельной мощности (рисунок 6) в координатах температуры газов на входе в камеру сгорания и степени гибридации. Значение степени гибридации определялось через степень повышения давления в осевой части компрессора. Степень повышения давления 1, на

рисунках 5 и 6 советует традиционному газотурбинному двигателю. При увеличении доли электрической энергии, используемой для привода компрессора термический КПД газотурбинного двигателя, и удельная тяга увеличиваются пропорционально. При максимально степени сжатия $\pi_{OK} = 4,5$ обеспечивается кратный рост термического КПД

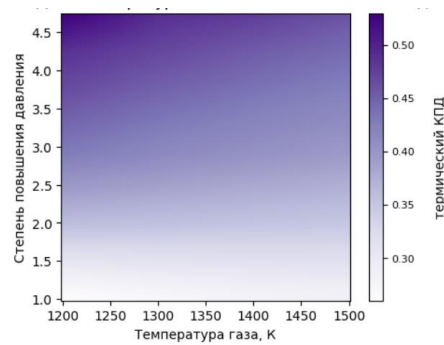


Рис. 5. Зависимость эффективного КПД от температуры газов на выходе из КС и степени повышения давления в электрифицированной части

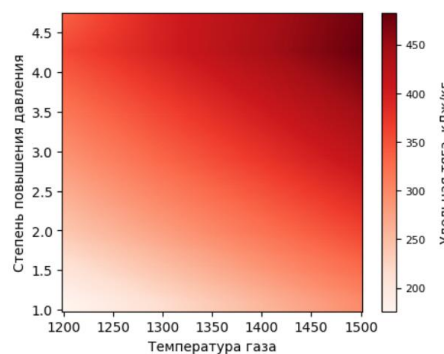


Рис. 6. Зависимость эффективного КПД от температуры газов на выходе из КС и степени повышения давления в электрифицированной части

Предельное значение степени повышения давления выбрано исходя из ограничений, накладываемых конструкцией электрической машины. Зависимость между степенью гибридизации подводимой тепловой энергией и степенью повышения давления (подводимой электрической энергией) в компрессоре приведена на рисунке 7. Здесь подводимая тепловая энергия характеризуется температурой газов на выходе из КС, поскольку именно она при фиксированном значении расхода воздуха определяет расход топлива.

Видно что возможная степень гибридизации уменьшается с ростом температуры газов на выходе из камеры сгорания. Данный факт обуславливается тем, что при существующих ограничениях при увеличении температуры газов пропорционально

растет подводимая тепловая энергия. В результате при ограничении температуры на выходе из осевого компрессора значением в 500-550 К, допустимая степень гибридизации составляет $H_E = 0,6$ при $T_r^* = 1200$ К, и $H_E = 0,48$ при $T_r^* = 1500$ К.

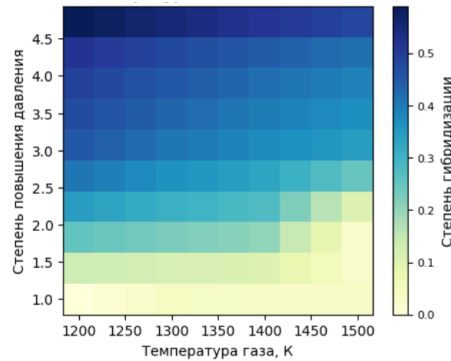


Рис. 7. Зависимость степени гибридизации от температуры газов на выходе из КС и степени повышения давления в электрифицированной части

Определив степень гибридизации, приведем значение эффективного КПД для ТВаД с электрифицированным турбокомпрессором, построим зависимость эффективного КПД от степени гибридизации (рисунок 8). В расчетах КПД электромеханической части, образованной системой подачи электрической энергии и электрической машиной, принимался равным $\eta_{ЭТК} = 0,9$. В результате при заданных уровнях эффективности узлов, эффективный КПД силовой установки уменьшился на значения от 1% до 18%. Это обуславливается тем, что переопределение работы сжатия не оказывает существенного влияния на эффективный КПД, однако позволяеткратно увеличить значение удельной мощности, то есть форсировать двигатель (рисунок 9).

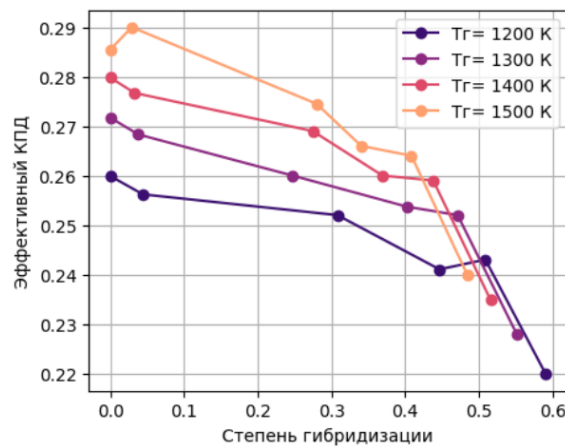


Рис. 8. Зависимость эффективного КПД от степени гибридизации и температуры газов на выходе из КС

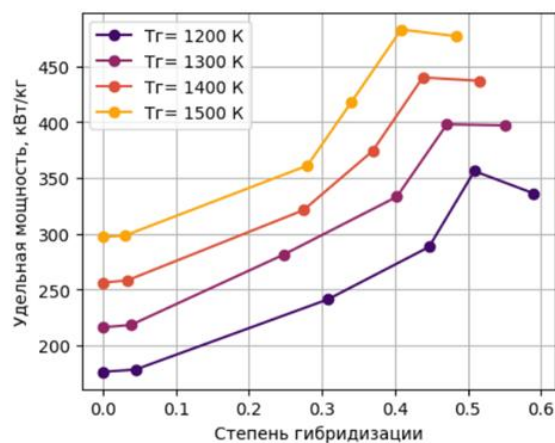


Рис. 8. Зависимость эффективного КПД от степени гибридизации и температуры газов на выходе из КС

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана методика выбора оптимальных параметров газотурбинного двигателя с электрифицированным турбокомпрессором: степени повышения давления и температуры газов, степени гибридизации. Рассматривалась конфигурация двигателя в которой осевой компрессор приводится во вращение электрической машиной. Исследование проводилось в квазистационарной постановке по математической модели турбовального двигателя первого уровня. В качестве основного ограничения при проектировании электрифицированного турбокомпрессора, принята температура газов за осевой частью компрессора, поскольку она во многом определяет тепловой режим электрической машины. По результатам исследования установлено:

Степень гибридизации в электрифицированном турбокомпрессоре не может быть выбрана произвольна, необходимо производить увязку данного параметра с подводимой в двигателе тепловой энергией. В рассматриваемой конфигурации двигателя пиковой значение степени гибридизации обеспечивается для температуры газов 1200 К и составляет 0,5. С ростом температуры значение степени гибридизации уменьшается.

Применение электрифрованного турбокомпрессора позволяет обеспечить кратный прирост удельной мощности рассматриваемого двигателя. Однако прирост эффективного КПД обеспечивается, только при достаточно высоких температурах газа (порядка 1500 К) и низких значениях степени гибридизации (порядка 0,1). При высоких степенях гибридизации наблюдается существенное падение эффективного КПД.

Разработанный подход позволяет выработать технические требования к электрической машине, работающей в составе электрифицированного турбокомпрессора. В дальнейших исследованиях предполагается, во-первых, рассмотреть более широкий диапазон двигателей при этом внедрить зависимости КПД отдельных узлов от их размерности и во-вторых рассмотреть вопрос формирования конструктивных и компоновочных решений по выбору облика электрифицированного турбокомпрессора, в виде сопряженного осевого компрессора и электрической машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bezos-O'Connor G. M., French B. D. Electrified Powertrain Flight Demonstration (EPFD) Overview and Future //172nd Meeting of the Aeronautics and Space Engineering Board. – 2023.
2. Краев В. М., Тихонов А. И., Силуянова М. В. Перспективы развития авиационного двигателестроения для энергетики и нефтегазовой отрасли //СТИН. – 2020. – №. 4. – С. 7-11.
3. Варюхин А. Н. и др. Традиционные, гибридные и электрические силовые установки самолетов местных воздушных линий //Авиационные двигатели. – 2022. – №. 1 (14). – С. 19.
4. Rendón M. A. et al. Aircraft hybrid-electric propulsion: Development trends, challenges and opportunities //Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2021. – Т. 32. – №. 5. – С. 1244-1268.
5. Madavan N. A NASA perspective on electric propulsion technologies for large commercial aircraft //International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and the International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). – 2016. – №. ARC-E-DAA-TN37026.
6. Vratny P. C. Conceptual design methods of electric power architectures for hybrid energy aircraft : дис. – Technische Universität München, 2019.
7. Pornet C. et al. Methodology for sizing and performance assessment of hybrid energy aircraft //Journal of Aircraft. – 2015. – Т. 52. – №. 1. – С. 341-352.
8. Боровиков Д. А. Методика определения оптимального облика гибридных силовых установок с воздушным винтом в системе летательного аппарата : дис. – 2022.
9. T. Isikveren, C. Pornet, P. C. Vratny, and M. Schmidt. Pornet C. et al. Conceptual studies of future hybrid-electric regional aircraft //ISABE 2015 (Awatef Hamed, Fac. Work Res. Coll. Eng. Appl. Sci. – 2015.. In ISABE, editor, ISABE 2015, pages ISABE – 21 5 – 20285, 2015
10. Vratny P. C. et al. Performance investigation of cycle-integrated parallel hybrid turboshafts //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2017. – Т. 139. – №. 3. – С. 031201.

11. Vratny P. C. et al. Performance Investigation of Cycle-Integrated Parallel Hybrid Turboshafths //Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – American Society of Mechanical Engineers, 2016. – Т. 49682. – С. V001T01A029.
12. Schmitz O. Methodical Assessment of Electric Propulsion Systems for Transport Category Aircraft : дис. – Technische Universität München, 2016.
13. Vratny P. C. et al. Performance investigation of cycle-integrated parallel hybrid turboshafths //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2017. – Т. 139. – №. 3. – С. 031201.
14. Lorenz L. et al. Hybrid power trains for future mobility. – Bonn, Germany : Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2014.

Ямалов И.И., Дмитриев Д. А.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Аннотация: В данной работе представлено теоретическое описание устройства трехфазного корректора коэффициента мощности, рассмотрены протекающих в нем процессы коммутации транзисторов, накопление энергии в магнитном, электрическом полях дросселя. Разработан макетный образец, приведены практические результаты и параметры работы разработанного корректора.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, активная мощность, реактивная мощность, полная мощность, спектр сигнала, гармонические искажения, потребление электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазный корректор коэффициента мощности - это устройство, которое применяется для улучшения коэффициента мощности в трехфазной сети. Виенна-выпрямитель с активной коррекцией коэффициента мощности - это один из способов реализации трехфазного корректора коэффициента мощности (ККМ).

Коэффициент мощности - это отношение активной мощности к полной мощности. Он характеризует степень загрузки сети и может принимать значения от 0 до 1. Если коэффициент мощности меньше 1, это означает, что в сети присутствует реактивная мощность, которая не используется для выполнения работы, но потребляет электрическую энергию. Низкий коэффициент мощности может привести к перегрузке сети, повышению потребления энергии и увеличению затрат на электроэнергию. В данном случае, из-за особенностей работы трехфазного диодного моста и последующими за ними электролитическими конденсаторами большой емкости, система потребляет ток от трехфазной сети короткими импульсами большой амплитуды, что приводит к увеличению реактивной составляющей полной мощности и, как следствие, уменьшению коэффициента мощности.

Известны силовые модули производства Tonhe Technologies, Huawei и Phoenix, в составе которых присутствуют корректоры.

Трехфазный Виенна-выпрямитель с активной коррекцией коэффициента мощности позволяет увеличить коэффициент мощности за счет компенсации реактивной мощности. Принципиальная схема ККМ представлена на рисунке 1. ККМ выполняет три функции: выпрямляет входное переменное напряжение, повышает уровень входного переменного напряжения и выполняет функцию корректора. Схемотехническую основу ККМ составляет трехфазный диодный мост (мост по схеме Ларионова). Перед мостом расположены высокочастотные дроссели (реакторы) L1, L2, L3, которые работают совместно с транзисторами, расположенными после дросселей. Так как, полевые транзисторы содержат в себе диоды сток-исток, нужно учитывать полярность напряжения. С учетом того, что транзисторы работают с переменным напряжением для должной работы они включены встречно-последовательно.

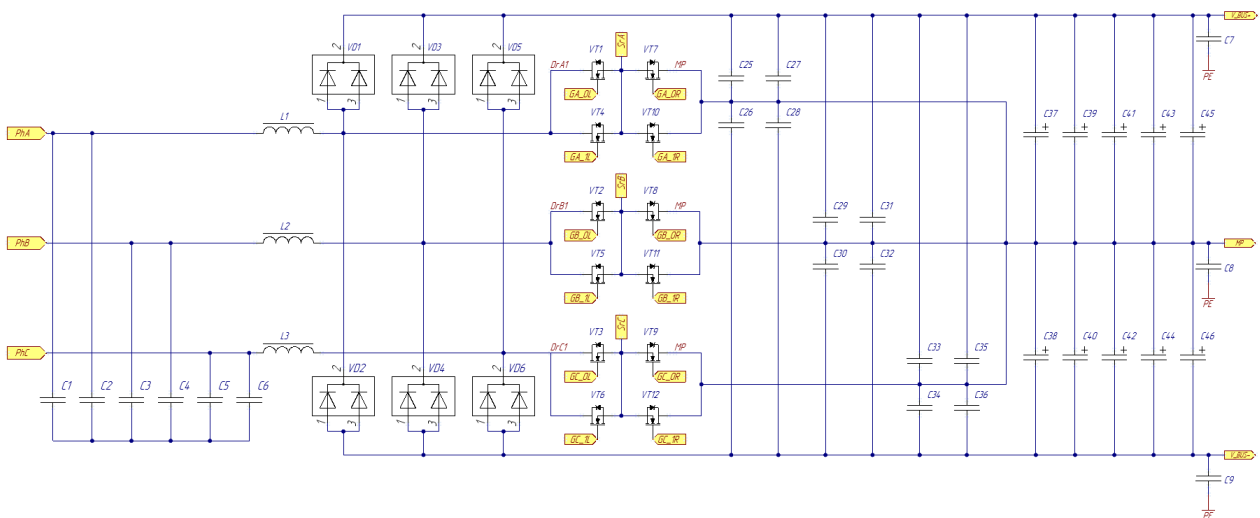


Рис. 1. Принципиальная схема ККМ

Суть работы данного устройства заключается в том, чтобы обеспечить постоянное протекание тока, тем самым превратить короткие импульсы тока в синусоидальную форму. С этой целью, моменты времени, во время которых транзисторы VT1 – VT12 открыты, имеют максимальную длительность в нуле фазного напряжения и минимальную длительность в точках экстремума. Во время того, когда транзисторы открыты, ток протекает через входные дроссели и в них происходит накопление энергии в виде магнитного поля. В момент закрытия транзисторов, ток резко уменьшается, что приводит к появлению ЭДС самоиндукции в дросселях. Они в свою очередь «сбрасывают» ЭДС самоиндукции через мост Ларионова в звено постоянного тока, тем самым обеспечивая протекание тока в моменты времени, в которые ток

отсутствовал бы, если корректора не было. Таким образом, импульсный ток «размазывается» по синусоиде фазного напряжения, что уменьшает реактивную мощность и увеличивает коэффициент мощности.

Перед силовыми дросселями установлены конденсаторы C136 – C141, предназначенные для уменьшения импеданса источника питания (фаз). Это важно, так как при открытии транзисторов ток по фазам способен скачкообразно нарастать. Данные конденсаторы являются частью входного фильтра подавления электромагнитных помех, представленного на рисунке 2, содержащего помимо них синфазные дроссели, синфазные конденсаторы, варисторы, плавкие предохранители и разрядник.

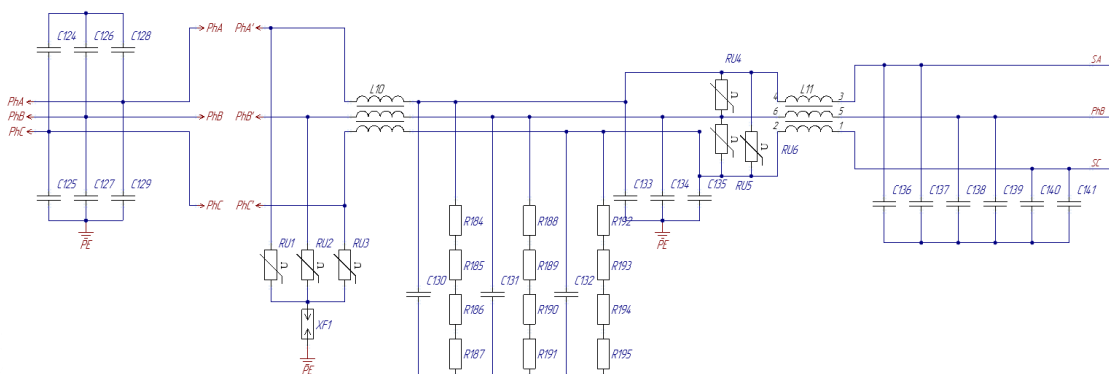


Рис. 2. Входной фильтр ЭМП

Одной из особенностей разработанного алгоритма управления, является инвертирование сигнала ШИМ в моменты перехода фазного напряжения соответствующей фазы через 0. На рисунке 5 представлено фазное напряжение и огибающая сигнала широтно-импульсной модуляции управления силовыми транзисторами для одной из фаз.

Как видно из рисунка, ширина импульсов максимальна в нуле фазного напряжения и минимальна при пиковых значениях. Огибающая ШИМа получена путем существенного ограничения полосы пропускания осциллографа, что привело к заметному сдвигу по фазе. Также на огибающей видны некие “иголочки” – в эти моменты происходит инвертирование ШИМа. 2 “иголочки” принадлежат данной фазе и происходят в момент перехода фазного напряжения через ноль. Остальные 4 принадлежат двум другим фазам и также имеют место быть в моменты перехода фазного напряжения через ноль соответствующих фаз.

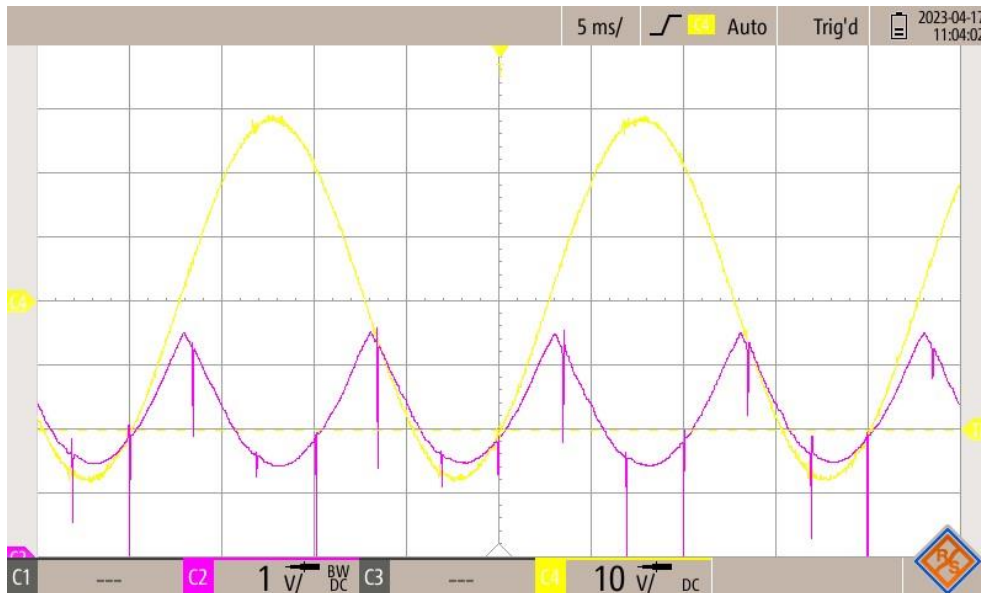


Рис. 5. Фазное напряжение (желтое) и огибающая ШИМа (фиолетовая)

В таблице 1 продемонстрирована необходимость корректоров коэффициента мощности в современных источниках вторичного электропитания. Как видно, с отключенным корректором силовой модуль потребляет при своей работе ток, коэффициент мощности которого равен примерно 0.560. Что означает, что около половины полной мощности приходится на реактивную составляющую. Включение корректора кардинально меняет соотношение между активной и реактивной мощностью, что демонстрируют рисунки 7 - 9.

3_Phase Auto LOCAL OUT				Main		
OUTPUT SETTING				OUTPUT: More Setting		
⊕1	Vac = 220.0V	F = 50.00Hz		Measurement Setting		
⊕2	Vac = 220.0V	F = 50.00Hz				
⊕3	Vac = 220.0V	F = 50.00Hz				
MEASUREMENT				Waveform Viewer		
	V = 220.00	Po = 2528.8		Limitation		
⊕1	I = 20.57	PF = 0.559				
	V = 220.06	Po = 2502.5		Output Mode		
⊕2	I = 20.23	PF = 0.562				
	V = 220.08	Po = 2470.2		Measurement To Page2		
⊕3	I = 19.93	PF = 0.563				
Σ	V ₁₂ = 381.02	V ₂₃ = 380.73				
	V ₃₁ = 381.01	Po = 7501.5				
Recall CH1	Recall CH2	Recall CH3	Recall CH4	Recall CH5	More 1 of 2	2023/03/27 15:18:28

Рис. 6. Коэффициент мощности при отключенном корректоре коэффициента мощности

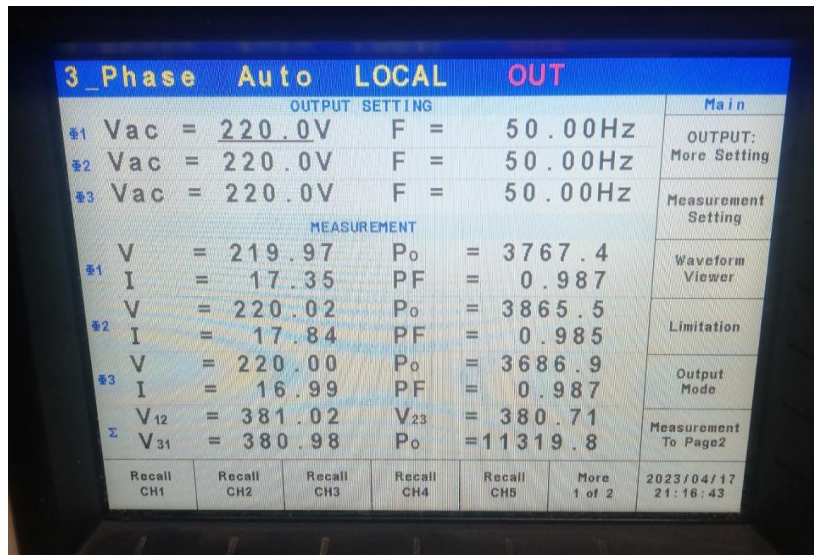


Рис. 7. Коэффициент мощности близкий к 1 при включенном корректоре и номинальном напряжении

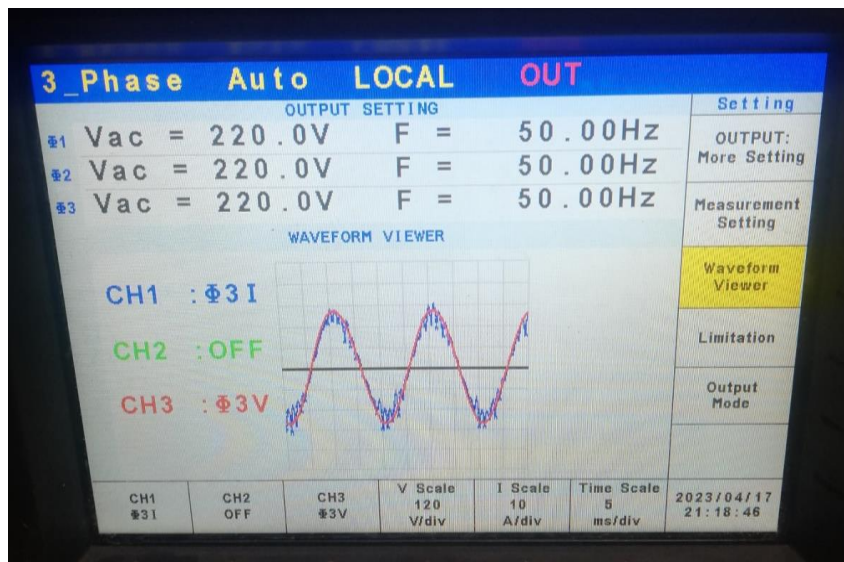


Рис. 8. Фазное напряжение и фазный ток третьей фазы

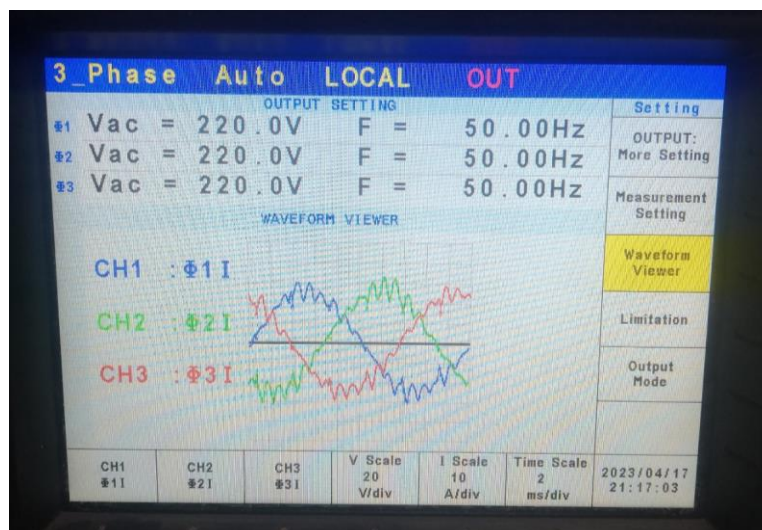


Рис. 9. Фазные токи трех фаз

Далее приведен получившийся коэффициент мощности при фазном напряжении 50 В (рис. 10). На китайском

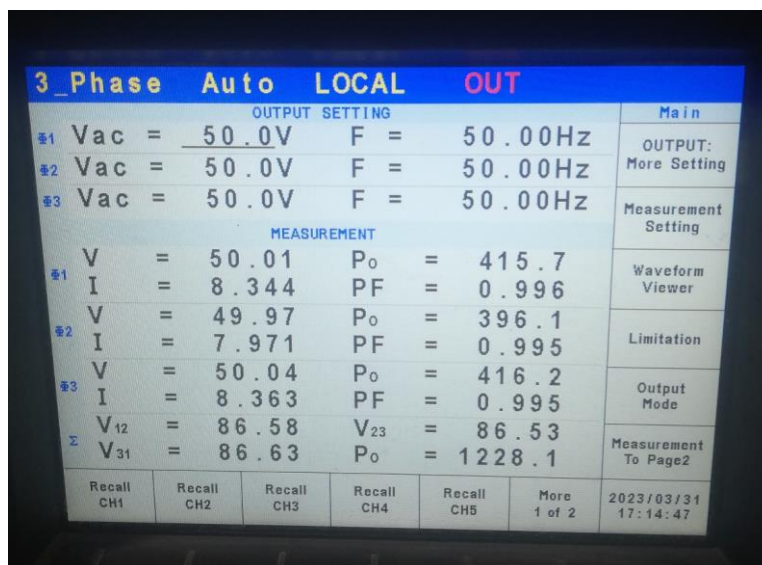


Рис. 10. Коэффициент мощности 0.996 при фазном напряжении 50 В

На следующих осциллограммах (рис. 11 - 15) показаны фазное напряжение (синий), фазный ток (оранжевый), напряжение затвор-исток (зеленый), напряжение сток-исток (желтый). Сначала показана осциллограмма общего вида. Далее следуют осциллограммы, выстроенные по уменьшению мгновенного фазного напряжения. Триггер настроен по переднему фронту.

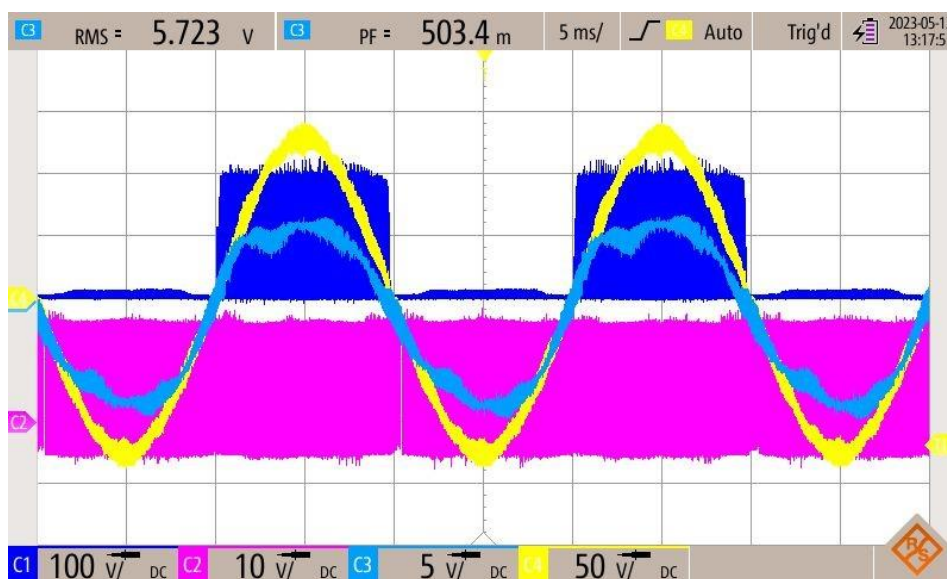


Рис. 11. Общий вид



Рис. 12. При максимальном входном напряжении

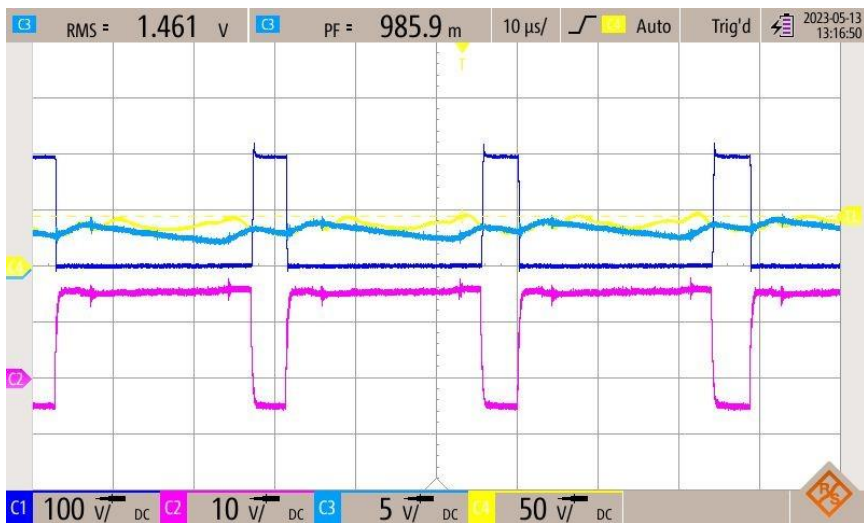


Рис. 13. При 1/3 от амплитудного значения фазного напряжения

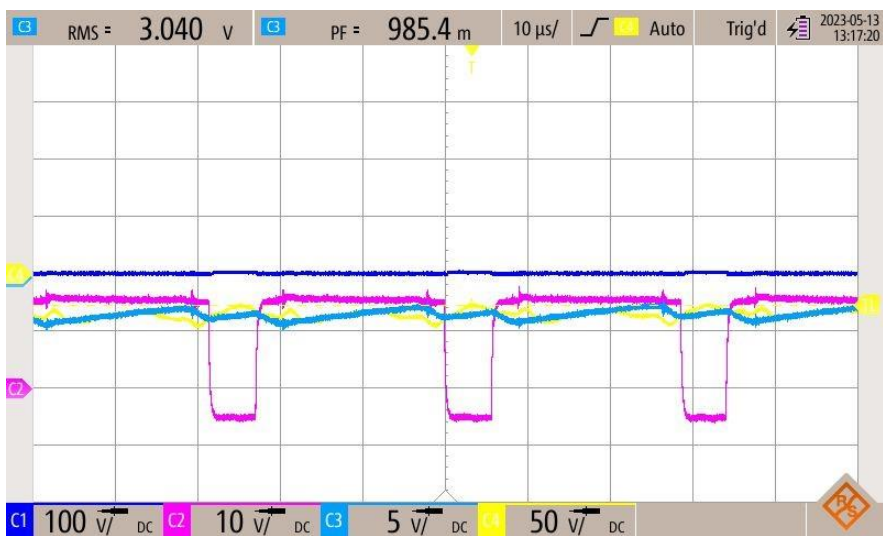


Рис. 14. При 1/3 от отрицательного амплитудного значения фазного напряжения



Рис. 15. При отрицательной амплитуде фазного напряжения

Реализованный алгоритм управления ККМ позволяет удерживать коэффициент мощности близким к 1 даже при пониженном входном напряжении и различной мощности нагрузки, что не наблюдалось на модуле производства компании Tonhe Technology. Далее (рис. 16) для сравнения приведена осциллограмма фазного тока при малой мощности корректора производства компании Tonhe Technologies.

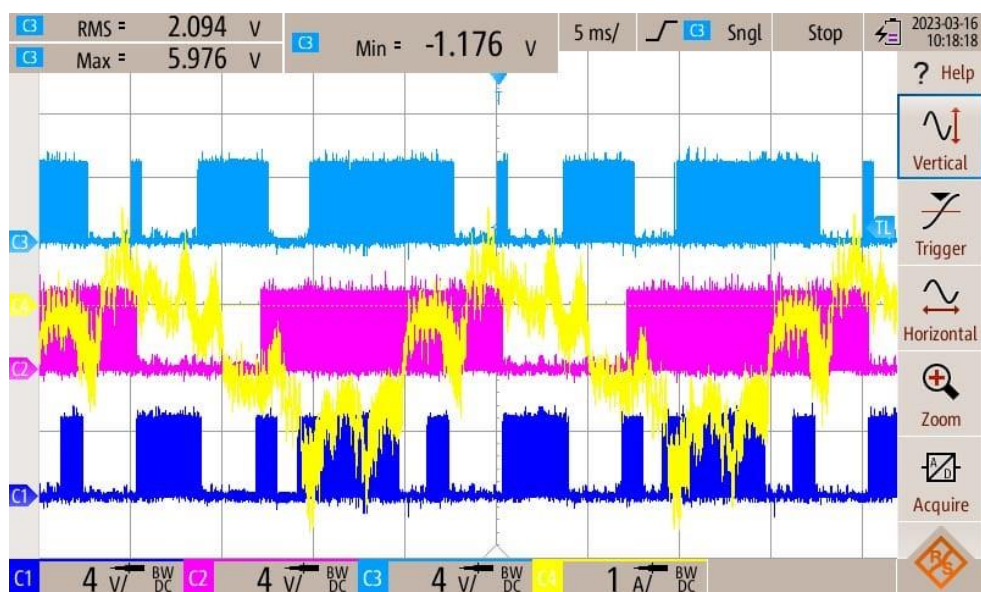


Рисунок 16 – Синий сигнал – фазный ток модуля производства компании Tonhe Technology при малой нагрузке и номинальном входном напряжении

Форма фазного тока имеет значительные искажения и гармоники, что свидетельствует о значении коэффициента мощности при малой нагрузке далеко от 1.

С целью устранения звона при переключении транзисторов предусмотрены RC снабберы, установленные параллельно каналу каждого транзистора (рис. 17).

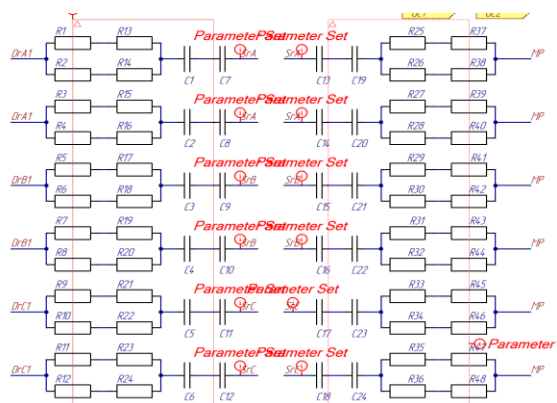


Рис. 17. RC снабберы, установленные параллельно каналу каждого транзистора

Для защиты затворов полевых транзисторов предусмотрены TVS-диоды, включенные параллельно затвор-исток каждого транзистора, не допускающие выход напряжения на затворе за диапазон $-5\text{ В} \dots +20\text{ В}$.

С целью предотвращения случайного открытия транзисторов предусмотрены подтягивающие к истокам резисторы. Конденсаторы параллельно затвор-истоку емкостью 1 нФ призваны устранить возможный звон при переключениях.

Для измерения фазных токов предусмотрены датчики тока на основе эффекта Холла в корпусе WSOIC-16 (рис. 18).

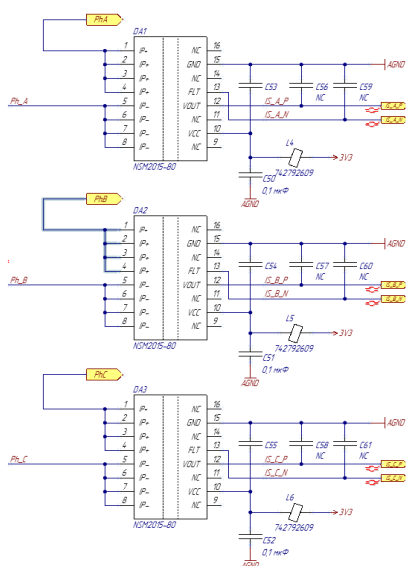


Рис. 18. Датчики тока на основе эффекта Холла в корпусе WSOIC-16

С целью подтверждения характеристик разрабатываемого корректора были проведены сравнительные тесты еще трех ККМ. Таблица 1 показывает сравнение характеристик корректоров силовых модулей различных производителей. Производились измерения входных и выходных значений тока и напряжения, а так же

значение коэффициента мощности (PF). Измерения производились при мощности, близкой к значению 30 кВт, при этом ККМ Huawei и ВИАМ.006 не выдали данные характеристики.

Таблица 1

Сравнение характеристик корректоров силовых модулей

	ВИАМ.006	Huawei	Phoenix	Разрабатываемый ККМ
Ракт, кВт	25,382	21,05	29,98	30,582
Рвх, кВА	27,366	21,08	34,76	30,904
PF	0,93	1	1	0,9896
Uвх, В	230	226,9	263,5	227,21
I вх, А	39,662	30,98	43,97	45,345
Uвых, В	381	351,3	434	904
I вых, А	62,6	57,4	69	31,89
Рвых, кВт	23,85	20,17	29,95	28,83
КПД, %	94	95,6	86,2	93,3

Анализируя полученные данные, можно заключить, что работать на мощности близкой к 30 кВт могут только разработанный ККМ и ККМ производства Phoenix, при этом Разрабатываемый ККМ показал значение коэффициента мощности близкое к 1, а так же значительно более высокое значение КПД. Среди двух других ККМ, работающих при мощности менее 24 кВт по совокупности характеристик КПД и коэффициента мощности можно выделить ККМ фирмы Huawei, с оговоркой на меньшую выходную мощность.

3d модель разработанного ККМ, а так же внешний вид собранного макетного образца представлены на рисунке 19.

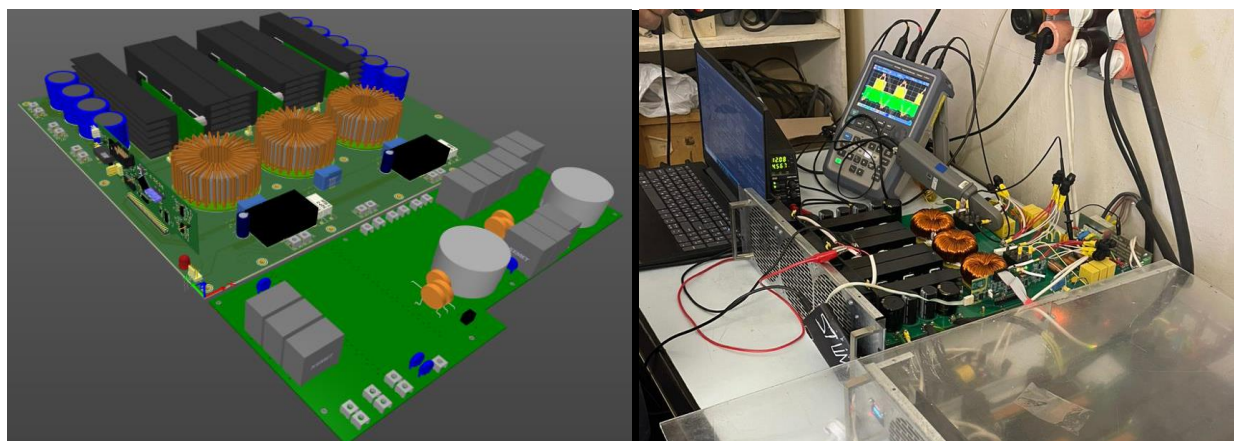


Рис. 19. Плата корректора и фильтра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди особенностей разработанного корректора можно отметить высокий коэффициент мощности в широком диапазоне нагрузок, достигающий 99 % процентов при работе на 30 кВт нагрузку и сравнительно высокий КПД 93,3%, что стало возможным благодаря использованию углерод-кремниевых диодов Шоттки и углерод-кремниевых полевых транзисторов, способных работать с высокими напряжениями за счёт большой величины запрещенной зоны, но, вместе с этим требующих нестандартных схемотехнических решений управляющей транзисторами части. Алгоритм управления корректором основан на применении векторных вычислений, позволяющий реализовать высокие удельные характеристики разработанного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Onsemi - URL: https://www.onsemi.com/site/pdf/H2PToday2102_design_ONSemi.pdf [Электронный ресурс]. Дата последнего обращения: 30.10.23.
2. Three-phase power factor corrector with direct power control and power supply of the unbalanced industrial network - URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1683533123&tld=ru&lang=en&name=e3sconf_ses18_05017.pdf&text=three%20phase%20power%20factor%20correctors&url=https%3A%2F%2Fwww.e3s-conferences.org%2Farticles%2Fe3sconf%2Fpdf%2F2019%2F50%2Fe3sconf_ses18_05017.pdf&lr=172&mime=pdf&110n=ru&sign=1e8e7768bb145ad2a196264ba69317d6&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1683533123%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3De3sconf_ses18_05017.pdf%26text%3Dthree%2Bphase%2Bpower%2Bfactor%2Bcorrectors%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.e3s-conferences.org%2Farticles%2Fe3sconf%2Fpdf%2F2019%2F50%2Fe3sconf_ses18_05017.pdf%26lr%3D172%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D1e8e7768bb145ad2a196264ba69317d6%26keyno%3D0%26nosw%3D1 [Электронный ресурс]. Дата последнего обращения: 30.10.23.
3. Vienna Rectifier with Gallium Nitride (GaN) Devices - URL: https://docviewer.yandex.ru/view/0/?page=1&*=a5nYRQzCibt4DpvWjDaC1d6aQQV7InVybCI6Imh0dHBzOi8vbWluZHMud2lzMzY2Y29uc2luLmVkdS9iaXRzdHJlYW0vaGFuZGxlLzE3OTMvNzQ4NzkwWmh1X111dG9uZyUyMHRoZXNpcy5wZGY%2Fc2VxdWVuY2U9MSZpc0FsbG93ZWQ9eSIsInRpdGxlljoiWmh1X111dG9uZyB0aGVzaXMucGRmP3NlcXV1bmNIPTEiLCJub2lmcFtZSI6dHJ1ZSwidWlkIjoiMCI6InRzljoxNjgyNDMyNzE1MzI4LCJ5dSI6IjcwMzg5MjIwMTE2MzI0NjkyODMiLCJzZXJwUGFyYW1zIjoidG09MTY4MjIwMjcwOCZ0bGQ9cnUmbGFuZz1lbiZuYW1lPVpodV9ZdXRvbmclMjB0aGVzaXMucGRm

P3NlcXVlbnNIPTemaXNBbGxvd2VkPXkmdGV4dD12aWVubmErcmVjdGlmaWVyJnV
ybD1odHRwcyUzQS8vbWluZHMud2lzY29uc2luLmVkdS9iaXRzdHJIYW0vaGFuZGxlLz
E3OTMvNzQ4NzkvWmh1X111dG9uZyUyNTIwdGhlc2lzLnBkZiUzRnNlcXVlbnNIJTNE
MSUyNmIzQWxsb3dlZCUzRHkmbHI9MTcyJm1pbWU9cGRmJmwxMG49cnUmc2lnbj0
yYjhlNjgwN2VmNmI3NTRiY2MwZDU4YzU4YmE5N2QxNCZrZXlubz0wIn0%3D&lan
g=en [Электронный ресурс].

Альмухаметов Д.М., Салихов Р.М., Руднев А.А., Мухаметзянов М.М.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

ИСПЫТАНИЯ ЗАРУБЕЖНОГО МАГНЕТО-ГЕНЕРАТОРА ROTAX ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АНАЛОГОВ

Аннотация: Представленная научная статья содержит техническую информацию о испытании электрических машин и, в частности, магнето-генератора. Целью данной работы является исследование в области производства отечественных систем зажигания ДВС при применении их в авиационной промышленности. В статье рассматривается и анализируется зарубежный магнето-генератор компании ROTAX. Приводится исследование электрической системы авиационного поршневого двигателя, проводится разработка испытательной оснастки и непосредственные испытания магнето-генератора. В статье приведены полученные результаты и выдвинуты предложения по дальнейшей доработке.

Ключевые слова: испытания электрической машины, методика испытаний, проектирование оснастки, авиационно-поршневой двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени в России практически полностью отсутствовало промышленное производство поршневых авиадвигателей (АПД, ДВС) для легких самолетов, вертолетов, БЛА и мотопланеров. Фактически, отечественные моторы, эксплуатируемые до сих пор, представлены лишь моделью М-14 разных модификаций.

Поскольку отрасль СЛА и БЛА более-менее развивалась, то в условиях отсутствия отечественных моторов приходилось закупать и применять АПД зарубежного производства. Для примера можно назвать лишь несколько иностранных двигателей, устанавливаемых на отечественных моделях беспилотников: на «Гранат-4» / «Рубеж-20» применен ДВС фирмы MVVS, на «Луче» (разработан на базе самолета «Сигма-5») – ROTAX-914, на беспилотнике «Орион» – ROTAX-914 и т.д.

Одним из основных зарубежных двигателей устанавливаемых на Российские беспилотные летательные аппараты и самолеты малой авиации является авиационные поршневые двигатели Rotax 912/914 и их различные модификации. Однако с недавнего времени австрийская компания BRP-Powertrain прекратила поставки авиационных двигателей Rotax и ее комплектующих. В связи с чем возникла потребность в импортозамещении компонентной базы данного двигателя.

Для проработки данного вопроса проведена научно-исследовательская работа по основным компонентам электрической системы двигателя Rotax 914, которая включает следующие задачи:

- исследовать электрическую систему и систему электрозапуска двигателя;
- исследовать и описать конструкцию, технологию изготовления и материалы компонентов;
- снять характеристики компонентов электрической системы двигателя;
- сформировать предложения по конструктивным решениям и перечню отечественных материалов и компонентов-аналогов, необходимых для создания электрической системы двигателя.

VI. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. Исследование электрической системы авиационного поршневого двигателя Rotax 914

Электрическая система двигателя ROTAX серии 914 оснащены бесконтактной дублированной системой зажигания (рисунок 1).

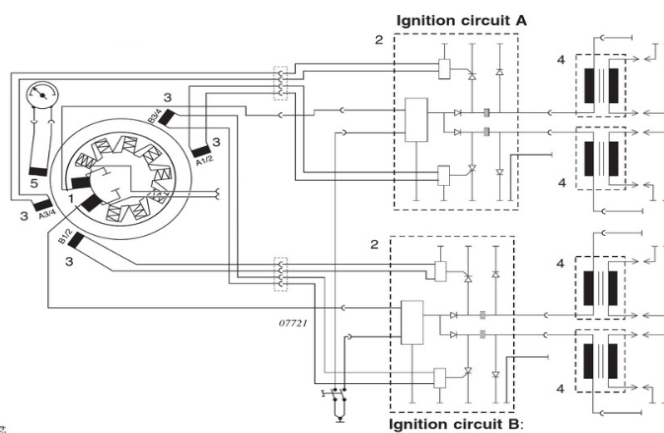


Рис. 1. Схема системы зажигания двигателя ROTAX 914

В стандартное оборудование также входит встроенный генератор переменного тока (6) с внешним выпрямителем-регулятором (12В постоянного тока 250 Вт).

Система зажигания не требует внешнего источника питания. Каждая из двух независимых катушек зажигания (1), расположенных на статоре магнето, питает одну из двух цепей зажигания. Энергия запасается в конденсаторах электронных модулей (2). В момент зажигания сигналы с пусковых катушек (3) вызывают разряд конденсаторов через первичную цепь двойных катушек зажигания (4). Пятая пусковая

катушка (5) предназначена для подачи сигнала тахометра.

Внутренний генератор (магнето) показан на рисунке 2 и состоит из статора с восемью катушками генератора (1) и двумя независимыми катушками зажигания (2), а также десятиполюсного кольца магнето (3). Ступица маховика (4) прикреплена к кольцу магнето. Четыре пусковые катушки (5) установлены снаружи генератора.

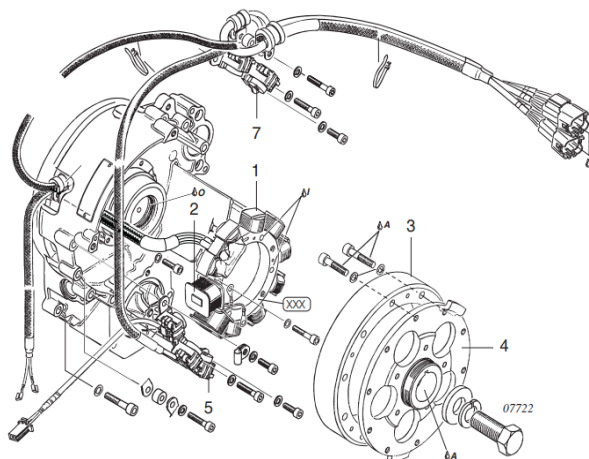


Рис. 2. Внутренний генератор

Экспериментальные исследования электрической системы авиационного поршневого двигателя проводились на базе кафедры электромеханики Передовой инженерной школы «Моторы будущего» ФГБОУ ВО «УУНиТ» в специальных лабораториях, содержащих комплекс необходимого оборудования и контрольно-измерительных приборов.

Целью экспериментальных исследований являлось снятие характеристик компонентов электрической системы авиационного поршневого двигателя ROTAX 914F.

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3. На структурной схеме обозначено:

- 1) комплексный стенд проверки электрических машин;
- 2) магнето Rotax с датчиками (пусковыми катушками);
- 3) специальная оснастка;
- 4) нагрузочная машина;
- 5) система зажигания;
- 6) контрольно-измерительные приборы.

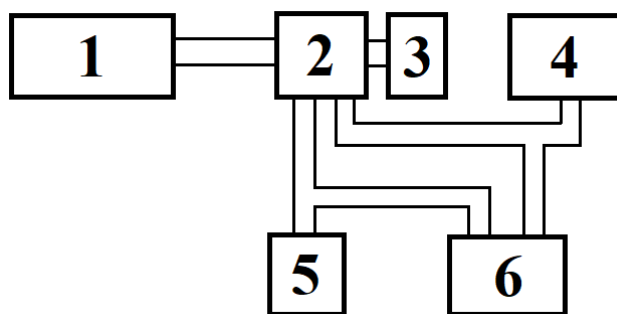


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

Комплексный стенд проверки электрических машин обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) измерение момента на валу до 7,0 Нм при частоте вращения 12000 об/мин. На холостом ходу – в диапазоне от 0 до 18000 об/мин;
- 2) автоматизированное задание необходимого нагрузочного момента в виде циклограмм;
- 3) автоматизированное измерение момента, частоты вращения;

Внешний вид экспериментального стенда для исследования электрической системы и системы электрозапуска с установленными компонентами (магнето, система зажигания) исследуемой электрической системы авиационного поршневого двигателя показан на рисунке 4. [1]



Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда

С целью закрепления ротора магнето на валу комплексного стенда для проверки электрических машин была изготовлена специальная оснастка. Сборная модель оснастки с ротором и статором магнето показана на рисунке 5.

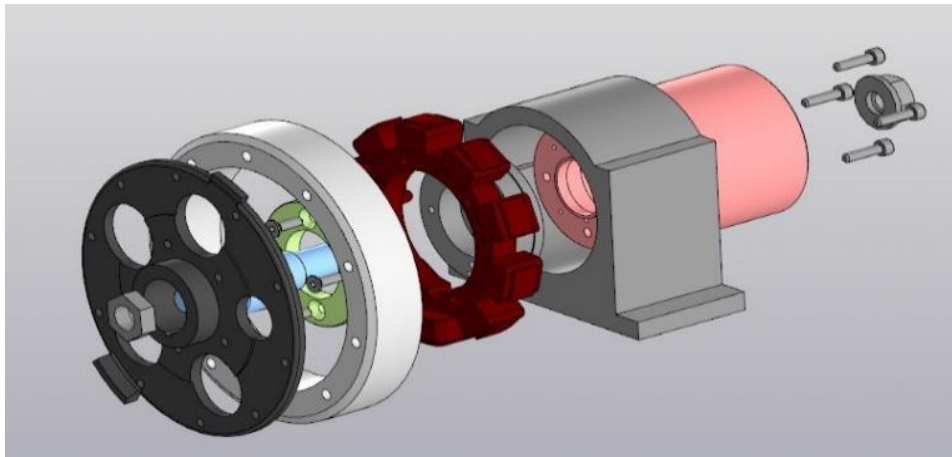


Рис. 5. Модель специальной оснастки

Предварительные испытания закрепленного магнето с отбалансированным ротором показали возможность задавать частоту вращения ротора магнето в сборе с крышкой от 0 до 6000 об/мин без существенного биения и с выдержкой требуемых зазоров для пусковых катушек (индуктивных датчиков) системы зажигания согласно руководству по эксплуатации авиационного поршневого двигателя ROTAX 914.

Испытания магнето и системы зажигания проводились до предельно установленной руководством по эксплуатации частоты вращения вала авиационного поршневого двигателя ROTAX 914, т.е. не более 5800 об/мин.

В. Методика экспериментальных исследований магнето авиационного поршневого двигателя ROTAX 914

Для оценки минимального значения частоты вращения до проведения основных экспериментальных исследований электрической системы и системы электрозапуска на комплексном стенде проверки электрических машин задавалась частота вращения ротора магнето, необходимая для надежного образования искрообразования в свечах зажигания. Минимальная частота вращения ротора магнето, при которой работает система зажигания составила 200 об/мин. Таким образом, для экспериментальных исследований электрической системы и системы электрозапуска частота вращения ротора магнето задавалась в диапазоне 200 – 5800 об/мин.

Целью экспериментальных исследований являлось снятие нагрузочных характеристик магнето, характеристик холостого хода. [2]

С. Результаты экспериментальных исследований магнето авиационного поршневого двигателя ROTAX 914

Экспериментальные исследования проводились осциллографическим методом.

Осциллограммы с выводов катушек зажигания, расположенных на статоре магнето №1 и №2, снятые при частотах вращения 220/1000/2500/4000/5800 об/мин, показаны на рисунках 6 – 7.

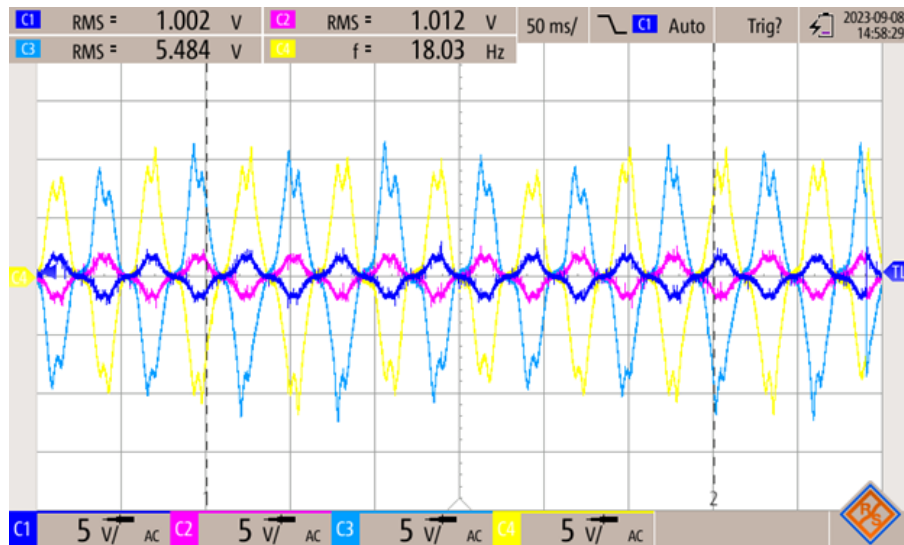


Рис. 6. Среднеквадратичное значение напряжения на выводах катушек зажигания, при частоте вращения 220 об/мин

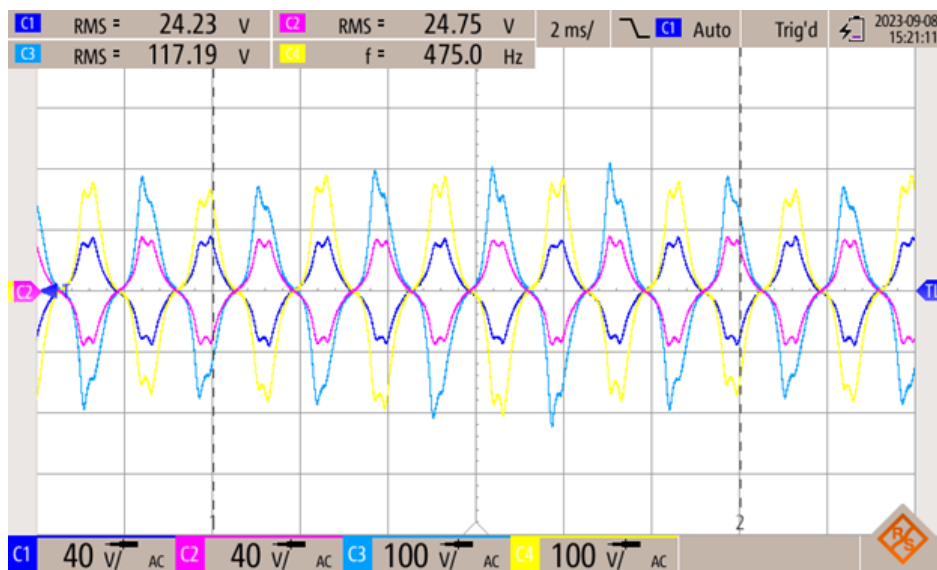


Рис. 7. Среднеквадратичное значение напряжения на выводах катушек зажигания, при частоте вращения 5800 об/мин

В таблице 1 показаны результаты экспериментальных исследований значений напряжений на выводах катушек зажигания магнето без подключенной системы зажигания, т.е. без нагрузки.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований значений напряжений на выводах катушек зажигания

Частота вращения n , об/мин	Частота напряжения f , Гц	Среднеквадратичное значение напряжения RMS, В		Амплитудное значение напряжения A, B	
		Катушка №1	Катушка №2	Катушка №1	Катушка №2
220	18,03	5,48	5,1	11	10
1000	84,75	25,38	24,31	50	57
2500	210,3	59,58	57,51	120	110
4000	334,3	90,64	87,95	170	160
5800	475	117,19	115,9	210	200

Так же были проведены замеры обратной ЭДС катушек питания бортовой сети магнето на холостом ходу.

В таблице 2 показаны среднеквадратичные и амплитудные значения напряжений на катушках стартера магнето для питания бортовой сети на холостом ходу.

Таблица 2

Частота вращения n , об/мин	Частота напряжения f , Гц	Среднеквадратичное значение напряжения RMS, В	Амплитудные значения напряжения A, B
200	12,32	2,16	4
220	16,6	2,66	4
1000	83,82	9,57	18
2500	207,4	23,05	40
4000	334	34,77	55
5800	475,2	49,04	70

Для проверки магнето под нагрузкой, фазный вывод катушек статора, предназначенный для питания бортовой сети, и «масса» подключаются к электронной нагрузке.

Исследования магнето авиационного поршневого двигателя проводились на частотах вращения ротора: 1000/2500/4000/5800 об/мин. Для определения нагрузочных характеристик магнето фиксировались показания фазного напряжения U_f , В; напряжения нагрузки U , В; тока нагрузки I , А. Нагрузочные характеристики магнето указаны в таблице 3.

Нагрузочные характеристики магнето

Частота вращения n , об/мин	Фазное напряжение U_{ϕ} , В	Напряжение нагрузки U , В	Ток нагрузки I , А	Мощность на нагрузке W , Вт
1000	9,8	6,4	7,8	50
2500	18,49	11,5	13,9	161
4000	29,91	15	14	210
5800	39,91	16,9	15	253,5

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований магнето авиационного поршневого двигателя установлено, что при заявленной производителем мощности магнето в 250 Вт, магнето при оборотах ротора 5800 об/мин может выдавать в бортовую сеть до 253,5 Вт. Так же были проведены замеры следующих характеристик магнето. Внешний вид, поясняющий конструкцию магнето, показан на рисунке 8. На внешнем виде обозначено:

- 1) ротор (кольцо магнето);
- 2) статор;
- 3) восемь катушек для питания бортовой сети;
- 4) катушка зажигания для электронного модуля SMD (А) системы зажигания;
- 5) катушка зажигания для электронного модуля SMD (В) системы зажигания;
- 6) клеммы «массы» катушек зажигания.

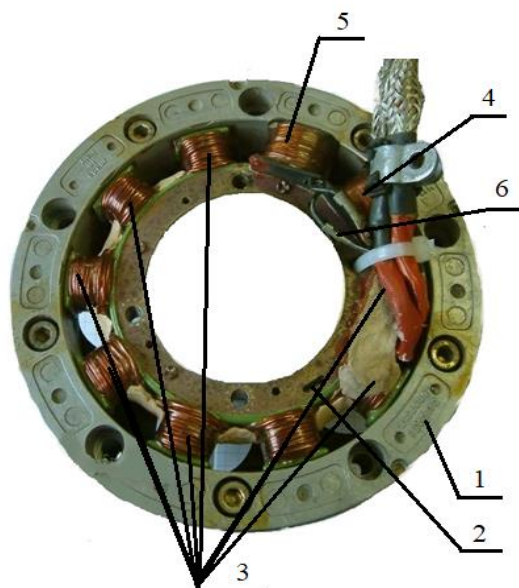


Рис. 7. Внешний вид магнето

В системе автоматизированного проектирования разработана объемная модель магнето в сборе, представленная на рисунке 9.

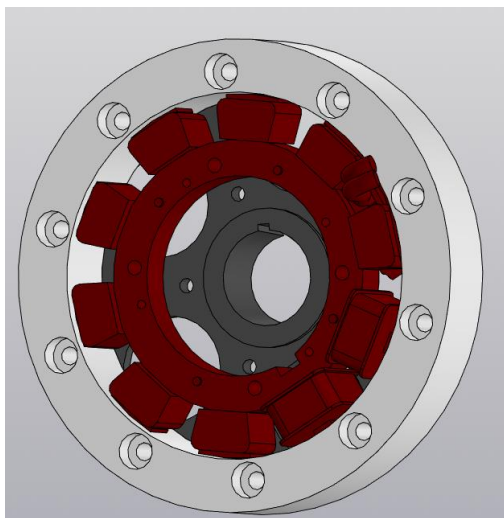


Рис. 9. Объемная модель магнето

Масса магнето в сборе 2,3 кг (масса статора 0,7 кг, ротора 1,6 кг).

В таблице 4 приведены результаты измерений сопротивления и индуктивности обмотки генератора и катушек зажигания при разомкнутой магнитной системе на частотах 120 Гц и 1 кГц.

Таблица 4

Результаты измерений сопротивления и индуктивности обмотки генератора и катушек зажигания при разомкнутой магнитной системе

	Сопротивление R , Ом (при 120 Гц)	Сопротивление R , Ом (при 1 кГц)	Индуктивность L , мГн (при 120 Гц)	Индуктивность L , мГн (при 1 кГц)
Обмотка статора	0,1	0,12	0,3	0,298
Катушка зажигания №1	3,86	7,44	14,99	14,73
Катушка зажигания №2	3,86	7,45	14,92	14,67

В таблице 5 приведены результаты измерений сопротивления и индуктивности обмотки генератора и катушек зажигания при замкнутой магнитной системе на частотах 120 Гц и 1 кГц. [4]

Таблица 5

Результаты измерений сопротивления и индуктивности обмотки генератора и катушек зажигания при замкнутой магнитной системе

	Сопротивление R , Ом (при 120 Гц)	Сопротивление R , Ом (при 1 кГц)	Индуктивность L , мГн (при 120 Гц)	Индуктивность L , мГн (при 1 кГц)
Катушка зажигания №1	4,32	14,3	12,58	10,52
Катушка зажигания №2	4,35	14,3	12,60	10,51

Результаты измерения поверхностной индукции полюсов ротора приведены в таблице 6.

Таблица 6

Поверхностная индукция полюсов ротора

Номер полюса	Индукция B , мТл
1	182
2	187
3	181
4	183
5	174
6	179
7	182
8	180
9	179
10	187

По результатам исследований были определены химические составы различных материалов магнитопровода ротора, полюсных наконечников ротора, магнитопровода статора. Материал магнитопровода ротора – алюминиевый сплав АК8М3 по ГОСТ 1583-93, материал полюсных наконечников ротора – сталь 10кп по ГОСТ 1050-2013, материал магнитов – 95% железо (оксид) и 5% стронций (оксид), материал магнитопровода статора – сталь 10кп по ГОСТ 1050-2013. [3]

Конструкция статора магнето выглядит следующим образом. Статор собран из 23 листов стали толщиной 0,51 мм. Листы стали скреплены заклепками. Полюса и

межполюсные пространства покрыты эпоксидным компаундом. Обмотки катушек намотаны на полюса якоря. Количество витков обмотки катушки для питания системы зажигания на одном полюсе – 482 витка. Диаметр провода – 0,46 мм. Количество витков обмотки катушки для бортового питания на одном полюсе – 36 витков. Диаметр провода – 1,1 мм.

При изготовлении обмоток статора в качестве провода могут быть использованы медные обмоточные провода марок ПЭВ, ПЭТВ, ПЭЛ, ПЭТ (ГОСТ 26615-85 Провода обмоточные с эмалевой изоляцией. Общие технические условия).

Критические технологии при изготовлении статора отсутствуют.

Производство исследованного статора могут освоить российские предприятия соответствующего профиля.

Ротор магнето состоит из ярма, полюсных наконечников, магнитов, залитых алюминиевым сплавом.

Технология сборки ротора магнето выглядит следующим образом.

- 1) изготавливается специальная форма для литья под давлением;
- 2) изготавливаются ярмо, полюсные наконечники;
- 3) производится размещение ярма, полюсных наконечников в специальной форме, которая прижимает магниты (т.е. фиксирует расположение магнитов и расположение крепежных отверстий);
- 4) проводится заливка под давлением алюминиевого сплава;
- 5) проводится механическая обработка по внутреннему и внешнему диаметру;
- 6) проводится балансировка ротора (кольца магнето).

Критические технологии при изготовлении ротора (кольца магнето) отсутствуют.

Производство исследованного ротора (кольца магнето) могут освоить российские предприятия соответствующего профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оригинальном исполнении в магнитопроводе (статоре) магнето используется электротехническая сталь толщиной 0,5 мм. Для улучшения характеристик, а именно уменьшения потерь на вихревые токи, целесообразно использовать отечественный материал-заменитель: электротехническая сталь толщиной 0,18 мм или 0,27 мм марки 2421. Также использование постоянных магнитов с более высокой коэрцитивной силой, такие как NdFeB, SmCo, позволит увеличить мощность, выдаваемую системой.

Альтернативой ротора из алюминия с инкорпорированными магнитами станет магнитопровод статора магнето из электротехнической стали, который способствует локализации потока магнитной индукции и снизит потери на рассеивание.

Использование трехфазной системы генерирования, вместо однофазной, позволит уменьшить зубцовый момент, а также стабилизировать выходное напряжение.

Разработка, изготовление и выпуск серийных серий магнето, стартера для авиационного поршневого двигателя возможны на базе Передовой инженерной школы «Моторы будущего» при ФГБОУ ВО «УУНиТ»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по эксплуатации двигателей Rotax 914 всех серий. <https://reaa.ru/threads/chem-zamenit-kommutator-dukati-programmiruemuj.19515/page-2> (дата обращения 02.08.2023).
2. Хатунцев С.Г., Панфилов А.В. Конструкция и эксплуатация двигателя Rotax: учебное пособие / Челябинск: Изд-во «УТЦ «ЧелАвиа», 2014. – 111с.
3. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Чигвинцев В.А., Лобанов А.В. Комбинированный измеритель пробивных напряжений плазменных свечей зажигания газотурбинных двигателей / Электротехнические и информационные комплексы и системы, УГУЭС, Уфа, №2, т.9, 2013. С. 5-8.
4. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М. Методика расчета индукционных катушек с электромагнитным прерывателем / Учебное пособие / Издание УГАТУ, Уфа, 2013, С. 54.

К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРОВ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: Электроэнергетика является важнейшей составной частью топливно-энергетического комплекса страны, бесперебойное и эффективное функционирование которого, снабжение потребителей электроэнергией — является одной из основ развития экономики страны и повышения ее конкурентоспособности. Для устойчивого роста экономики и улучшения качества жизни жителей Российской Федерации перед электроэнергетической отраслью стоит задача обеспечения нормативного уровня надежности электроснабжения. Эта цель недостижима без четкой и слаженной работы персонала, так как одним из факторов, влияющих на уровень производительности труда и конкурентоспособность предприятий электроэнергетики, выступает качественная работа персонала, как руководящего звена, так и работников непосредственно отвечающих за качество и безопасность работ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика обуславливает особые требования к организационной структуре и деятельности персонала в электросетевых компаниях, а также в сфере охраны труда и трудоустройства. Недостаток компетенций управленческого персонала в данной сфере может иметь отрицательное влияние на качество работы организации. Основная образовательная программа, ориентированная на профиль "Управление персоналом в электроэнергетике" в рамках направления 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника", направлена на подготовку специалистов, способных эффективно разрабатывать решения, принимая во внимание специфику электросетевой деятельности в области управления персоналом. Программа формирует компетенции, необходимые для повышения мотивации персонала и обеспечения их безопасности при выполнении трудовых функций. Кроме того, в организациях существует определенная специфика приема сотрудников на работу. Развитие кадровой политики, как предусмотрено в "Энергетической стратегии России на период до 2035 года" [1] и в Приказе «Об утверждении Правил работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации» [2], имеет важное значение для эффективного и устойчивого развития энергетической отрасли

страны. В целях обеспечения квалифицированного и профессионального персонала в сфере электроэнергетики, уделяется внимание комплексному развитию кадрового потенциала, включающего обучение, повышение профессиональных навыков и подготовку специалистов с учетом современных требований в области энергетики и инновационных технологий. Реализация этих мероприятий помогает обеспечить надежность и безопасность энергосистемы России, повысить эффективность производства электроэнергии и обеспечить устойчивое развитие отрасли на долгосрочную перспективу. Особое внимание уделяется требованиям к работе персонала электроэнергетических компаний, при решении ряда новых и нестандартных задач.

В рамках «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» предусмотрены мероприятия, регулирующие работу персонала в сфере электроэнергетики. Некоторые из них включают:

1. Создание системы профессионального образования и подготовки кадров в энергетической отрасли. Это включает разработку и внедрение программ профессионального обучения и повышения квалификации для персонала электроэнергетических организаций.

2. Внедрение системы сертификации и аттестации персонала. Целью этого мероприятия является установление стандартов квалификации и компетенций для работников в энергетической отрасли, а также обеспечение их соответствия требованиям безопасности и эффективности работы.

3. Развитие системы мотивации и стимулирования персонала. В рамках этого мероприятия планируется создание механизмов поощрения и премирования работников, проявляющих высокую профессиональную компетентность и достигающих высоких результатов в своей работе.

4. Внедрение инновационных технологий и цифровизации в энергетической отрасли. Это мероприятие направлено на обеспечение перехода к современным технологиям и автоматизации процессов работы, что требует соответствующей подготовки и обучения персонала.

5. Развитие системы охраны труда и безопасности персонала. В рамках этого мероприятия планируется усиление контроля за соблюдением правил и норм безопасности при работе с электроустановками, а также проведение обучения и

инструктажей персонала по охране труда. Эти мероприятия направлены на обеспечение эффективной и безопасной работы персонала в сфере электроэнергетики, а также на развитие профессиональных навыков и квалификации работников отрасли.

Зачастую нехватка компетенций специалистов, осуществляющих функции управления персоналом, полученных после обучения по направлению «Управления персоналом» без учета вышеперечисленных требований и особенностей отрасли может привести к утечке кадров, неготовности оценить ситуацию, не учитывать потенциал человеческих ресурсов, что конечно же отразится на эффективности работы электроэнергетической компании. Несмотря на высокую актуальность и интерес к мероприятиям по теме повышения компетенций специалистов-энергетиков остается недостаточно изученной проблема разработки образовательных программ уровня магистратуры по профилю «Управление персоналом в электроэнергетике».

II. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В своем обзоре И. Волкова [3] определила, как взаимодействуют энергетические компании с вузами-партнерами в реализации образовательных программ по подготовке специалистов отрасли. Автор провела заочный круглый стол со специалистами по управлению ПАО «Россети», ПАО «РусГидро», компании Электроцит Самара в ходе которого было выявлено, что традиционная система среднего и высшего образования порой просто не успевает за изменениями профессиональных компетенций в электроэнергетике. Поэтому центр ответственности за образовательный процесс давно уже сместился в сторону работодателей. Каким будет инженер-энергетик будущего зависит от того как взаимодействуют энергетические компании с вузами-партнерами в реализации образовательных программ по подготовке специалистов отрасли.

Мирошниковым С. и Никулиной Ю. [4] предложены рекомендации по разработке циклограммы карьерного развития молодёжи, повышению эффективности взаимодействия вуза и кадровых партнёров за счёт создания студенческого объединения профессионального развития, ориентированного на активизацию профориентационной деятельности университета, выявление творческого, научного и предпринимательского потенциала студентов, развитие навыков, необходимых для повышения конкурентоспособности на рынке труда, помощь в планировании и построении карьеры студентов и выпускников университета.

Л.Д. Гительманом [5] проведен анализ ключевых факторов формирования междисциплинарных компетенций: управленческая парадигма, на которую ориентирован образовательный процесс, модель знаний и умений, адекватных содержанию задач технологического прорыва, методологии анализа междисциплинарных взаимосвязей в управленческих решениях. Представлен соответствующий опыт реализации разработанного подхода при подготовке руководителей разного уровня, обладающих повышенной готовностью к непрерывному освоению и внедрению технологий будущего.

Этим же автором в статье [6] представлен концептуальный механизм системы опережающего обучения менеджеров; выделены возможные методологии формирования учебных модулей для образовательных программ бакалавриата и магистратуры, на основе анализа которых разработан комплексный подход, позволяющий создавать образовательные продукты повышенной ценности. Разработан комплекс образовательных технологий для ее прикладной реализации, в числе которых: электронный учебно-тренировочный комплекс опережающего обучения, конвейер непрерывного наращивания компетенций, гибкая модульная архитектура учебного процесса, «модуль в модуле».

Г. И. Камалова, Ю. М. Гришаева приводят анализ принципов формирования общепрофессиональных компетенций у магистров направления «Электроэнергетика и электротехника» и представляют план организации исследовательской работы. Особую роль в статье отводится научной подготовке магистров, так как именно в магистратуре чаще всего обучающийся получает знания по определенному направлению (профилю, специализации) [7]. Отмечено, что получение исследовательских навыков в магистратуре — это регламентируемое федеральными государственными образовательными стандартами, требование в части формируемых общепрофессиональных компетенций для всех профилей подготовки.

В. Филиппов, И. Филиппова [8] указывают что необходимо разрабатывать эффективные стратегии и механизмы минимизации рассогласования между региональным рынком образовательных услуг и потребностями экономических систем в профессиональных кадрах, позволяющих повысить профильную занятость профессионально подготовленных кадров, минимизировать структурную текучесть и обеспечить партнерские отношения учебных организаций и предприятий в вопросах

подготовки и трудоустройства персонала. Показано, что важнейшей тенденцией, способствующей лучшей координации рынка образовательных услуг и потребностей экономики в квалифицированных кадрах, является установление стратегического партнерства между учебными организациями и предприятиями, заинтересованными в привлечении профессионально подготовленных кадров.

Авторы статьи Т. Н. Блинова, и А. В. Федотова [9] исследуют проблему несоответствия структуры подготовки кадров с высшим образованием текущей и перспективной отраслевой специализации экономики России. Авторами статьи проанализировано соответствие структуры подготовки кадров с высшим образованием текущим и перспективным потребностям социально-экономического развития России в целом и ее регионов в частности. В ходе исследования сопоставлялась структура подготовки кадров с высшим образованием по укрупненным группам специальностей и направлениям подготовки с текущей и перспективной структурой валового регионального продукта, а также с распределением занятых по отраслям экономики всех субъектов Российской Федерации. Результаты анализа по федеральным округам основаны на данных, полученных по субъектам РФ, и позволяют оценить разбалансированность структуры подготовки кадров с высшим образованием, сформулировать возможные причины сложившихся дисбалансов на уровне регионов, страны в целом и вузов в частности.

Шайтор Н. [10] освещает вопросы разработки профессиональных компетенций обучаемых с учетом введения новых профессиональных стандартов для работников предприятий электроэнергетики. Автором использован метод сбора данных, основанный на анализе документов. Получены профессиональные компетенции для основных образовательных программ, которые рекомендовано использовать при подготовке бакалавров и магистров по профилям направления подготовки электроэнергетика и электротехника.

Авторами Л. З. Рязановой, Л. А. Китаевой [11] рассмотрена актуальность разработки основных образовательных программ с учетом содержания компетенций профессиональных стандартов при переходе на ФГОС нового поколения. Выявлена необходимость проектирования «профиля выпускника», определяемого набором актуальных трудовых функций и спецификой направления подготовки. Выделены универсальные функции, характерные для 6-го-7-го квалификационных уровней

профессиональных стандартов, необходимые для проектирования блоков (модулей) дисциплин общеинженерного, экономико-управленческого и социогуманитарного характера, являющихся неотъемлемой частью подготовки специалистов соответствующей квалификации. Приведен сравнительный анализ дескрипторов трудовых функций, определяющих организационно-технический компонент инженерной деятельности. Определена необходимость разработки инвариантного ядра учебного плана, объединяющего подготовку по различным направлениям в рамках образовательной организации, и вариативной части, позволяющей учитывать потребности отрасли, профессиональную специфику, индивидуальные запросы обучающихся и региональные особенности. Предложены подходы к проектированию блоков дисциплин при формировании учебных планов различных профилей для инженерно-технических направлений подготовки.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализировав имеющуюся литературу и сведения о существующих образовательных программах, находящихся в открытом доступе, авторами был сделан вывод о том, что в настоящее время в России нет специализированных магистерских программ по управлению персоналом в электроэнергетике. Вместо этого существуют профильные магистерские программы по электроэнергетике и электротехнике, которые предлагают вузы, такие как Национальный исследовательский университет «МЭИ», Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина и Казанский государственный энергетический университет. Однако эти программы ориентированы на другие профессиональные направления.

В своей основной задаче магистратура должна стремиться обеспечить высокое качество подготовки конкурентных специалистов (магистров), обладающих профессиональными знаниями и способностями в высокотехнологичных секторах российской экономики. Реализация этой цели осуществляется путем партнерства вузов с мировыми научными школами и передовыми предприятиями в этой сфере. Например, представители бизнеса привлекаются к обучающим мероприятиям кадровых резервов компаний вместе с вузами-партнерами. В рамках сотрудничества с вузами разрабатываются и реализуются специальные программы подготовки кадрового резерва на руководящие должности в электроэнергетической отрасли. Такой подход позволяет студентам получить комплексные знания, необходимые для

профессиональной деятельности, и способствует эффективному управлению и использованию трудовых ресурсов.

Одной из основных целей образовательной программы магистратуры является формирование универсальных и общепрофессиональных компетенций, связанных с будущей трудовой деятельностью, а также профессиональных компетенций в области управления персоналом в российской электроэнергетике.

На кафедре электромеханики Уфимского университета образовательная деятельность по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника ведется на протяжении многих лет. Из опыта работы была выявлена заинтересованность специалистов в вопросах управления персоналом в организациях электроэнергетики, в связи с перечисленными выше изменениями в отрасли. Из анализа нормативных актов и профессиональных стандартов по вопросам развития системы управления персоналом на электроэнергетических предприятиях на кафедре электромеханики ФГБОУ ВО Уфимского государственного авиационного технического университета (ныне Уфимский университет науки и технологии) была разработана Программа по профилю «Управление персоналом в электроэнергетике» в рамках направления 13.03.04 «Электроэнергетика и электротехника».

Все изучаемые дисциплины в программе профиля «Управление персоналом в электроэнергетике» обладают высокой актуальностью и значимостью для студентов, планирующих заняться профессиональной деятельностью в данной отрасли. «Охрана труда в электроэнергетике» способствует осознанию и оценке рисков, связанных с работой в этой сфере, а также приобретению навыков по применению мер безопасности. «Формирование и развитие кадрового потенциала предприятий электроэнергетики» предоставляет возможность освоить навыки управления персоналом, что является существенным фактором в быстро развивающейся отрасли. «Основы построения цифровой подстанции» позволяют ознакомиться с технологиями автоматизации и цифровизации процессов в электроэнергетике. «Энергоэффективность и энергосбережение» обеспечивают знания по оптимизации энергопотребления и внедрению мер по сокращению энергозатрат. [12]

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый выпуск магистрантов по профилю «Управление персоналом в электроэнергетике» состоялся в 2022 году, и в нем приняло участие 25 магистрантов.

Из них 15 являются специалистами электросетевых компаний, а 10 - специалистами промышленных предприятий. Второй - в 2023 году, и в нем приняло участие 20 магистрантов. Среди них 15 являются специалистами сетей, а 5 - специалистами промышленных предприятий. На сегодняшний день обучение магистрантов продолжается и в 2024 году состоится следующий выпуск магистров по данному профилю.

Навыки, непрерывное опережающее образование, необходимые для успеха в электроэнергетике, являются фундаментальными элементами оптимальной работы системы энергоснабжения. Они обеспечивают стабильность, эффективность и надежность в обеспечении энергетических потребностей общества и являются неотъемлемой частью профессионального роста специалистов в данной области

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 22.09.2020 № 796 «Об утверждении Правил работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации».
2. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.
3. Как готовятся будущие специалисты в области электроэнергетики? // Энергоэксперт. – 2022. – № 3(83). – С. 16-19. – EDN MPTBWN.
4. Мирошников, С. А. Кадровое сотрудничество вуза и промышленных партнёров в контексте карьерного развития молодёжи / С. А. Мирошников, С. В. Нотова, Ю. Н. Никулина // Высшее образование в России. – 2022. – Т. 31, № 8-9. – С. 99-115. – DOI 10.31992/0869-3617-2022-31-8-9-99-115. – EDN SYVHOC.
5. Междисциплинарные компетенции менеджеров для технологического прорыва / Л. Д. Гительман, А. П. Исаев, М. В. Кожевников, Т. Б. Гаврилова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 182-198. – DOI 10.17747/2618-947X-2022-3-182-198. – EDN TGMEBМ.
6. Опережающее управленческое образование для технологического прорыва / Л. Д. Гительман, А. П. Исаев, М. В. Кожевников, Т. Б. Гаврилова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 290-303. – DOI 10.17747/2618-947X-2022-4-290-303. – EDN WIKRUF.
7. К вопросу о совершенствовании научно-исследовательской подготовки в магистратуре по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / Г. И. Камалова, Ю. М. Гришаева, Н. Л. Аграпонова, Н. А. Лебедева // Вестник Международной академии наук (Русская секция). – 2022. – № S1-1. – С. 95-98. – EDN SPPSRM.
8. Филиппов, В. Н. Развитие рынка образовательных услуг во взаимосвязи с потребностями экономики в квалифицированных кадрах (на примере

Калининградской области) / В. Н. Филиппов, И. П. Филиппова // Проблемы межрегиональных связей. – 2021. – № 15. – С. 52-54. – EDN WSNNLK.

9. Блинова, Т. Н. Соответствие структуры подготовки кадров с высшим образованием потребностям экономики: проблемы и решения / Т. Н. Блинова, А. В. Федотов, А. А. Коваленко // Университетское управление: практика и анализ. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 13-33. – DOI 10.15826/umpra.2021.02.012. – EDN GTLKYD.

10. Шайтор Н.М. Особенности подготовка кадров для предприятий электроэнергетического сектора региона в условиях введения новых профессиональных стандартов / Н. М. Шайтор // Инновационное развитие экономики: Материалы второго Крымского инновационного форума, Симферополь - Алушта, 25 июня – 18 2020 года / ФГБУН «НИИСХ Крыма», Научно-технический союз Крыма. – Симферополь - Алушта: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2020. – С. 213-218. – EDN YJIFYW.

11. Л. З. Рязанова, Л. А. Китаева Профессиональные стандарты как детерминирующая база проектирования основных образовательных программ / Л. З. Рязанова, Л. А. Китаева // Управление устойчивым развитием. – 2019. – № 3(22). – С. 101-105.

12. Хабирова Я.Ф., Бабилова Н.Л. К вопросу формирования профессиональных

компетенций в структуре магистерской подготовки // Педагогический журнал. 2023. Т. № 9А. С. 411-421. DOI: 10.34670/AR.2023.24.57.054.

Хуснуллина А.Р.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация: в данной статье рассмотрены пути этапы становления системы обеспечения безопасности на производстве от истоков до современного состояния, выделены ключевые области, требующие отдельного внимания. Предложены методы совершенствования процесса подготовки специалистов области производственной безопасности с использованием современных подходов, основанных на концепции «Vision zero».

В второй части статьи рассматривается концепция «Нулевой травматизм», приведены краткие сведения о реализации политики риск-ориентированного подхода и его внедрения в производственную деятельность, а также современные подходы в изучении методов оценки рисков и анализа опасностей.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация, риск-ориентированный подход, подготовка специалистов по безопасности процессов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Вопросами обеспечения безопасности производственных процессов в России впервые начали заниматься в 1818 году, а именно 7 января был принят закон о надзоре за работами, целью которого являлось повышение уровня безопасности при проведении работ на заводах и рудниках.

Более сорока лет понадобилось для развития данного направления и в 1859 году появилась система оценки условий труда на заводах, которую проводила специально образованная комиссия. Первые результаты были неутешительными: высокий риск травматизма, мероприятия по обеспечению безопасности производственных процессов отсутствовали вовсе. Итогом данной проверки или, как принято говорить сейчас, комплексного аудита, стал один из первых нормативных документов – кодекс правил работы.

На сегодняшний день в области обеспечения безопасности производственных процессов тысячи документов и основным навыком специалиста в области организации мероприятий по безопасному проведению работ является не только способность ориентироваться в требованиях законодательства, но и уметь правильно его трактовать, а в части случаев, когда документы в некоторых частях противоречат

друг другу, находить верные пути решения по организации процесса и недопущению нарушения законодательства РФ.

II. ОТ ИСТОКОВ К СОВРЕМЕННОСТИ

Эпоха развития автоматизации производств в Советском Союзе ознаменовалась развитием охраны труда, которая из хаотичного, стихийного процесса модернизируется в упорядоченную систему, внедряемую на всех предприятиях страны.

Именно в этот период создается система нормативно-технической базы, которая использовалась даже в современной России, такой специалист как «инженер по технике безопасности» появляется на каждом предприятии промышленного комплекса.

Внедряется ступенчатая система надзора за состоянием охраны труда, в которой особая роль отводится профсоюзам, также создаются органы контроля и надзора: Энергетический надзор, Санитарный надзор, Инспекция по труду, Прокуратура СССР выполняла роль инстанции, наделенной правом урегулирования спорных и конфликтных ситуаций.

90-е годы охарактеризовались упадком промышленного сектора и такого направления как охрана труда, контроль со стороны государства ослаб, немаловажную роль сыграли недостатки и пробелы в законодательной базе, но уже в 1993 году были приняты «Основы законодательства РФ об охране труда» и необходимость создания на предприятиях служб охраны труда закрепили на законодательном уровне.

Конец 90-х годов ознаменовался принятием целого пакета законодательных актов, значительно была обновлена нормативная база, в том числе Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 № 181-ФЗ, который ввел понятие «охрана труда», в последующем этот термин был закреплён в 209 статье «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ. Так в конце 90-х начале 2000-х годов термин «техника безопасности», а уже через несколько лет высшие учебные заведения начали готовить специалистов по направлению «Техносферная безопасность» [1].

III. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

2016 год для России стал стартом для риск-ориентированного подхода, который широко внедрялся Правительством Российской Федерации в национальную систему

охраны труда. Начало перехода открыло множество проблем и пробелов в системе подготовки специалистов профильного направления, в том числе:

- отсутствие учебной литературы на русском языке;
- отсутствие общепринятых на законодательном уровне методик оценки рисков;
- отсутствие отечественных специалистов, которые могли бы передать опыт и знания.

С момента старта проекта прошло уже более 5-ти лет, тем не менее вопросы оценки рисков так и остаются на начальном уровне, а в процесс подготовки специалистов по направлению «Техносферная безопасность» данные вопросы не получили общераспространенного внедрения.

При этом во всем мире методики оценки рисков непрерывно совершенствуются, так широкое применение методик Hazid (Identification of Hazards) и Hazop (Hazard and Operability Study), соответственно позволяют оценить опасности в начале старта проекта по разработке месторождений, строительства новых производств и принять решение о возможности дальнейшей работы над проектом, а также определить возможные риски и опасности во время производственных процессов [3].

04.09.2017 на XXI Всемирном конгрессе по безопасности и гигиене труда в Сингапуре была принята глобальная программа нулевого травматизма «Vision Zero», цель концепции определена как снижение статистики смертности и травматизма на производстве, а также исключение формального подхода к вопросам обеспечения безопасности на производстве.

В октябре 2017 года на 10-м Европейском региональном совещании Международной организации труда в Стамбуле Россия в лице Министра труда и социальной защиты РФ поддержала принципы концепции нулевого травматизма.

В декабре 2017 года на площадке Международной специализированной выставки "Безопасность и охрана труда - 2017" был подписан меморандум между Министерством труда и социальной защиты РФ и Международной ассоциацией социального обеспечения (МАСО) о взаимопонимании и сотрудничестве по продвижению концепции нулевого травматизма. В результате Минтруд стал официальным партнером соответствующей глобальной кампании Vision Zero.

В январе 2018 года официальным партнером Vision Zero становится Фонд социального страхования РФ (с 01.01.2023 Социальный фонд России), в связи с чем были внесены изменения в государственную программу «Содействие занятости населения», она была дополнена новой подпрограммой – «Безопасный труд», согласно которой Министерство труда в период до окончания 2020 должно было провести просветительскую кампанию «Россия за нулевой травматизм» [5].

Комплекс мер направленных на стимулирование работодателей и работников на выполнение мероприятий по улучшению условий труда был утвержден Распоряжением Правительства РФ от 26.04.2019 N 833-р, кроме того, с 01.03.2022 года вступили в силу изменения в Трудовой кодекс РФ, которые, по сути, повторяют основополагающие принципы концепции нулевого травматизма.

IV. КОНЦЕПЦИЯ НУЛЕВОГО ТРАВМАТИЗМА

Суть концепции заключается даже не в снижении рисков несчастных случаев на производстве, а в том, чтобы свести травматизм работников организации к нулю. Приоритет здесь - жизнь и здоровье работников. Особое внимание уделяется именно профилактике травматизма: поскольку несчастные случаи на производстве не происходят просто так, а всегда вызваны той или иной причиной, их можно предотвратить, организовав систему охраны труда должным образом.

«Нулевой травматизм» – это новый подход к организации профилактики травматизма, который объединяет три направления:

- безопасность;
- гигиену труда;
- благополучие работников на всех уровнях производства [2].

Концепция «Нулевой травматизм» предлагает семь "золотых правил", реализация которых поможет снизить показатели производственного травматизма и профессиональной заболеваемости.

Правило 1. Стать лидером, а именно собственным примером показать приверженность принципам «Нулевого травматизма». Данное правило основано на прямой зависимости – если руководитель не соблюдает требования безопасности, но требует этого.

Правило 2. Выявлять угрозы, то есть управлять рисками. Как описано выше – оценка рисков является ключевым инструментом, позволяющим выявлять опасности и риски, принимать профилактические меры.

Правило 3. Определять цели – планирование деятельности по управлению охраной труда путем разработки и внедрения системы управления охраной труда, позволяет обеспечивать безопасность и охрану здоровья на работе.

Правило 4. Создать систему безопасности и гигиены труда и довести ее до высокого уровня. Данное правило объединяет требования к формированию службы охраны труда, организации процессов, направленных на совершенствование системы: внедрение общественного контроля (комитеты по охране труда), рассмотрения предложений работников, а также необходимость «обратной связи».

Правило 5. Обеспечивать безопасность и гигиену на рабочих местах, при работе со станками и оборудованием. Безопасные производственные помещения, оборудование и рабочие места – обязательное условие безаварийной работы.

Правило 6. Повышать квалификацию – развивать профессиональные навыки. Получение образования, улучшение качества знаний, повышение квалификаций и компетенций относится к базовым основам формирования культуры безопасности и реализации стратегии нулевого травматизма.

Правило 7. Инвестировать в кадры – мотивировать посредством участия. В концепции Vision Zero сказано: "Мотивируйте своих работников, привлекая их к решению всех вопросов охраны труда. Эти инвестиции окупаются!" [5].

V.ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ

В условиях постоянного изменения внешней среды, непрерывной модернизации производственных процессов, появления новых видов механического оборудования и электрических машин, необходимы современные подходы в вопросах подготовки специалистов и в основе должна лежать концепция нулевого травматизма, в совокупности с использованием новых методов подхода в оценке рисков.

С этой целью обязательным для внедрения в учебный является предмет «Оценка рисков», который должен разделяться на блоки, предусматривающие изучение профессиональных и процессных рисков, способы документирования и хранения информации, при этом основной упор необходимо делать на использование материалов, направленных на отраслевые риски [4].

При этом изучение методик оценки рисков должно сопровождаться выполнением практических кейсов, аналогично тем, что используют учебные центры, специализировавшиеся на подготовке специалистов для иностранных компаний в рамках изучения курсов NEBOSH, YOSH.

В ходе изучения курсов такого типа у студентов формируется понимание процесса управления рисками, что в последующем, при осуществлении профессиональной деятельности, позволит влиять на уровень безопасности организации работы. Изучение данного курса должно базироваться на изучении международных стандартов серии ISO 31000 «Риск менеджмент» и требований ГОСТов РФ, что позволит учащимся изучить способы поиска эффективные мероприятия для контроля рисков, основанных на методике иерархии мер контроля, барьерных методов и временной шкале.

Особое внимание необходимо уделять количественным или качественным методам оценки рисков, либо возможности их сочетать.

В ходе курса обязательно рассмотрение европейского подхода в оценке рисков, основанных на методе пяти шагов», при этом в учебный план в том числе необходимо включать изучение иерархии мер контроля, поскольку, как показала практика, при составлении карт рисков учащиеся всегда на первое место ставят такие меры контроля как инструктажи на рабочих местах и использование средств индивидуальной защиты, в то время как данные меры согласно иерархии являются самыми малоэффективными.

В частности, при изучении методологии «пяти шагов» обязателен поэтапный подход, а именно:

1. Способы и методы идентификация опасностей, в частности рассмотрение методик использования опросных листов, результаты аудитов по безопасности и в данном случае упор необходимо делать не только на фокусировании на рисках в области охраны труда, но и промышленной, и пожарной безопасности;

2. Определения круга воздействия: кто может пострадать, данный раздел целесообразно рассматривать с позиции международного стандарта ISO 45001-2020 «Система менеджмента безопасности труда и здоровья» с позиции рассмотрения заинтересованных сторон. Данный стандарт не ограничивается рассмотрением рисков для конкретной организации и ее работников, но и дает определение термину «Заинтересованные стороны»;

3. Оценка уровня потенциального риска, определение применяемых мер контроля риска включающая анализ вероятности и тяжести последствий опасного события. С этой целью используется матрица рисков, как инструмент позволяющий ранжировать риски и принимать решения по дальнейшей работе с риском или, как принято говорить, «управлять риском». При выборе мер управления рисками, как правило, используется метод ALARP (с английского As Low As Reasonably Practicable - снижение риска «до предельно низкого целесообразного уровня»), в данном случае применяются барьерные методы: «Швейцарский сыр» или метод «Галстук-бабочка».

4. Подготовка документированной информации: риска: реестр рисков, карты рисков, паспорта рисков

5. Систематический пересмотр рисков с использованием более простых методов оценки.

Особое внимание в изучении данной дисциплины должно быть отведено подготовке документации, начиная от момента подготовки методик оценки рисков, в том случае, если на предприятии отсутствует собственная методика, либо адаптации корпоративных методик с учетом особенностей проводимых технологических операций и видов работ, заканчивая методами документации карт рисков.

Помимо описанного выше, специалисты в области безопасности производственных процессов должны обладать дополнительными знаниями в областях, относящихся не только к вопросам безопасной эксплуатации оборудования, но и иметь базовые знания в области медицины, токсикологии, психологии, физиологии труда, эргономики, экономики – все эти вопросы необходимо учитывать при проведении оценки рисков и разработке мероприятий по профилактике производственного травматизма.

Помимо изучения риск-ориентированного подхода необходимо глобальное внедрение культуры «Vision Zero», при этом ориентироваться необходимо не только на специалистов области «Техносферной безопасности», но и всех остальных инженерно-технических специальностей в рамках изучения курса «Безопасность жизнедеятельности». Студенты должны не просто знать о данной концепции, но и научиться ей следовать, таким образом можно управлять рисками для персонала в первый год после начала работы, поскольку, как показывает практика, наиболее высокий риск характерен для специалистов только пришедших на производство. Такие

факторы как неопытность, пробелы в профессиональной подготовке, ответственность, приводят к повышению вероятности ошибок, вызывающих несчастные случаи.

Как показал мировой промышленный опыт, вопрос снижения травматизма и аварийности невозможно решить только инженерными методами, и в данном случае психология безопасности труда является одним из наиболее важных элементов в иерархии мер контроля.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ориентация на успешное достижение поставленных целей является неотъемлемой частью любой деятельности, без гарантированной безопасности запланированный успех часто оборачивается катастрофой.

Лозунгом практически всех иностранных производств, работавших в России, было: «Безопасность превыше всего!» («Safety first!»), зачастую за этой фразой стояла целая система, а иногда и образ жизни. Подобные практики необходимо перенимать и внедрять в учебный процесс, только так мы сможем привить новый образ мышления будущим специалистам на всех уровнях управления предприятием, начиная от топ-менеджмента, заканчивая непосредственными исполнителями работ, для всех сфер производства основной и приоритетной задачей должно быть сохранение жизни и здоровья работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илиев А.Г., Гончарова А.Г. Анализ методов совершенствования риск-ориентированного подхода к управлению охраной труда при обеспечении производственной безопасности // Наукосфера. 2021. № 5–2. С. 93–100.
2. Кондаурова И.А. Анализ зарубежных тенденций в сфере охраны труда // Вести Автомобильно-дорожного института. 2021. № 2 (37). С. 97–104.
3. Кузнецова Е.А. «Нулевой травматизм» история и современность // Экономика труда. – 2018. – Том 5. – № 2. – С. 521-540.
4. Попов А.Н., Ивашова Н.С., Деулин А.А. и др. Риск-ориентированный подход в промышленной безопасности // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. 2015. № 2 (99). С. 20–22.
5. Усикова О.В., Майданкина Д.К. Анализ реализации концепции Vision Zero на территории Российской Федерации // Экономика труда. – 2020. – Том 7. – № 12. – С. 1323-1336.

Лач С.Ю.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

Аннотация: Современный темп работы конструкторских бюро заводов-производителей электрических машин определяет их конкурентоспособность на рынке, как внутреннем, так и внешнем. В связи с этим производства более не готовы тратить время и ресурсы на ожидание вовлечения новых сотрудников в работу предприятия. Поэтому все чаще крупные заводы-изготовители обращаются к вузам с вопросом создания студенческих конструкторских бюро, позволяющих студентам, заинтересованным в профильной работе, определиться с тем, отражает ли их та или иная должность на предприятии их видение рабочей деятельности после выпуска.

Ключевые слова: Студенческие конструкторские бюро, СПб ГУАП, Силовые машины, электрические машины, турбогенераторы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Любое предприятие, выпускающее собственную продукцию заинтересовано в повышении её качества. В связи с этим в рамках программы развития «Приоритет 2030» ведущими университетами страны предлагаются программы по созданию студенческих конструкторских бюро, где происходит углубленная профильная подготовка студентов как будущей рабочей деятельности на предприятиях-партнерах.

В связи с повышением конкурентоспособности выпускников на рынке труда в 2020 году в Государственном университете аэрокосмического приборостроения, совместно с АО «Силовые машины» было открыто Студенческое конструкторское бюро «Силовые машины – ГУАП» Инженерной школы (далее СКБ).

II. СТРУКТУРА СКБ «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ – ГУАП» ИШ

Структурно СКБ представляет собой рабочее пространство, на базе которого студенты, заинтересованные в профессиональной траектории в качестве инженера-конструктора, а также прошедшие предварительный отбор и собеседование с куратором направления от партнера, могут выполнять рабочие задачи, не отвлекаясь от процесса обучения. В связи с этим СКБ оборудовано персональными компьютерами с доступом к внутренней сети партнера.

Деятельность СКБ имеет 3 направления:

- выполнение задач АО «Силовые машины» в СКБ под руководством наставника от партнера и куратора от ГУАП;
- подготовка кадров по программе дополнительного профессионального образования для АО «Силовые машины»;
- проектная деятельность студентов.

Под проектной деятельностью подразумевается, как индивидуальная, так и командная работа студентов под руководством заведующего лабораторией по выполнению кейсов, научно-исследовательских работ и прочих задач подразделения.

В качестве проектных работ являются и выпускные квалификационные работы студентов, которые выполняются на базе СКБ.

III. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СКБ

1. Подготовка инженеров-конструкторов для АО «Силовые машины»

Данное направление включает:

- выполнение задач АО «Силовые машины» в СКБ под руководством наставника от партнера и куратора от ГУАП;
- подготовка кадров по программе дополнительного профессионального образования для АО «Силовые машины»;

К отбору допускаются студенты, проходящие обучение на 3 курсе бакалавриата и выше, а также студенты магистратуры, обучающиеся на 1 курсе. Эти требования обусловлены тем, что подготовка в СКБ длится в течение не менее 2х лет. В случае нижней планки (3 курс бакалавриата) – это минимальные требования в связи с учебными программами университета, а в случае с верхней (1 курс магистратуры) – невозможность продолжения подготовки после выпуска из ВУЗа.

Для начала обучения по дополнительной образовательной программе студенту необходимо пройти 2 этапа отбора.

Первым этапом является тестовое тематическое задание или участие в проводимых на базе СКБ хакатонах. Таким образом выявляются навыки в области моделирования и расчета электрических машин, которыми уже владеет студент. В случае хакатонах, даже если студент не занимает призовых мест он все-равно имеет возможность перейти к следующему этапу, если он показывает заинтересованность и достаточные знания о расчете электрических машин и базовые навыки

конструирования (моделирования), а также знание ЕСКД.

По итогу первичного отбора проводится встреча с кураторами направлений АО «Силовые машины», где в формате собеседования определяется готовность студентов к последующей работе, их заинтересованность в данном типе деятельности и склонность к выполнению конкретных задач, направляемых предприятием-партнером.

На данный момент СКБ работает по двум направлениям:

- Проектирование электрических машин;
- Проектирование турбогенераторов.

Выбор направления работы обусловлен компетенциями, которые формируются у обучающихся в рамках образовательных программ высшего образования по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также потребность в тот или иной момент предприятия-партнера в профильных специалистах.

Сейчас в ГУАП реализуются следующие образовательные программы по 13УГСН:

- «Цифровая энергетика»;
- «Электромеханика»;
- «Менеджмент в электроэнергетике».

Образовательные программы бакалавриата и магистратуры (далее – ОП) включают базовый набор требований АО «Силовые машины» к требуемому уровню подготовки на входе в СКБ. Ежегодно ОП актуализируются в части внедрения в образовательный процесс разработок/ кейсов и т.д., реализуемых в СКБ (лабораторные/практические работы, курсовые проекты, ВКР).

После прохождения отборов студенты устраиваются на долю ставки в структуру АО «Силовые машины», позволяющую им комфортно продолжать обучение в ВУЗе и одновременно выполнять задачи подразделения, к которому они приписаны. Данная доля обсуждается с каждым студентом лично, в зависимости от их возможностей.

Стоит заметить, что предприятие-партнер обеспечивает конкурентную заработную плату по отрасли для студентов, еще не имеющих диплома о высшем образовании или имеющих диплом бакалавра.

Помимо базового оклада студенты могут получать премию, варьирующуюся от степени вовлеченности в рабочий процесс. К примеру, студент, перевыполняющий

норму по задачам подразделения на 40% и выше может рассчитывать на серьезную прибавку к заработной плате. Оценка производится каждый месяц куратором от университета совместно с кураторами направлений от предприятия.

Первый договор заключается на полгода, для того чтобы студенты могли понять, какие задачи будут ставиться им в ходе работы, а также привыкнуть к требованиям и темпу выполнения задач.

После истечения данного срока, с теми, кто желает продолжать работу в таком формате предприятием-партнером подписывается целевой договор, по которому будущий работник обязуется отработать не менее 3х лет в подразделениях предприятия после окончания магистратуры. По данному договору, на время обучения в ВУЗе студент получает возможность рассчитывать на выплату стипендии от предприятия-партнера, а также на компенсацию части расходов на проживание. В случае расторжения целевого договора студент обязуется выплатить всю ранее полученную материальную помощь.

Куратор от университета в случае данной функции СКБ выполняет роль ментора, который оказывает помощь обучающимся на первых этапах, проводит обучение по согласованной с предприятием-партнером программе дополнительного образования и помогает осуществлять коммуникацию студентов с кураторами направлений конструкторского бюро АО «Силловые машины». Также куратора решает организационные вопросы, связанные с оборудованием и прочим проблемам, которые могут возникнуть у начинающих инженеров-конструкторов.

При этом студентам не обязательно выполнять задачи именно на базе СКБ. Так как в Санкт-Петербурге расположены площадки АО «Силловые машины», студенты, по согласованию с кураторами подразделений могут часть рабочего времени проводить на территории конструкторского бюро. Это позволяет будущим инженерам конструкторского бюро влиться в коллектив, а также уточнять рабочие вопросы непосредственно у специалистов, выдающих задания.

Все задачи являются реальными и актуальными изделиями, с которыми на данный момент ведется работа на предприятии. В связи с этим у студентов не возникает чувства абстрактности, выполняемых ими работ.

Помимо ежемесячной отчетности о выполнении поставленных задач проводится и ежегодные мероприятия на площадке партнера, где студенты могут познакомиться с

работниками других СКБ, а также с их задачами и возможностями.

Уже в ходе работы студенты могут получить повышение категории инженера студенческого КБ, что позволит им увеличить получаемый оклад, а также возможность более быстрого роста после перевода на должность в конструкторское бюро предприятия.

После окончания обучения и выпуска из университета, согласно целевому договору, происходит перевод работника на эквивалентную должность в конструкторское бюро предприятия.

2. Внутреннее подразделение Инженерной школы ГУАП

В качестве внутреннего подразделения СКБ «Силовые машины – ГУАП» решает задачи внедрения новых форматов инженерного образования и практико-ориентированной подготовке студентов.

Для обеспечения соответствия передовым форматам обучения студентов на базе СКБ проводится проектная деятельность для студентов ГУАП.

Проектная деятельность ведется в нескольких форматах:

- в рамках модуля проектной деятельности, встроенного в ОП;
- в рамках выпускной квалификационной работы, стартапа или научно-исследовательской работы, при соответствии компетенциям лаборатории.

Таким образом студенты получают поддержку при выполнении проектов, а также вовлекаются в новые, смежные или иные проекты, обеспечивающие всестороннее развитие выпускника.

Так на данный момент в лаборатории ведется работа над такими проектами, как: «Учебная роботизированная ячейка для взаимодействия с промышленным роботом-манипулятором, предназначенная для демонстрации и описания процесса палетизирования» и «Робототехническая система для диагностики турбогенераторов в период ремонтов».

Структура Инженерной школы позволяет не ограничиваться научными исследованиями и публикациями, а дает возможность подготовки студентами в течение обучения готового изделия или прототипа. Так как наличие большого количества лабораторий и предприятий-партнеров позволяет разработать, выполнить техническую документацию по проекту, провести макетирование и прототипирование изделия. Так, по первому из данных проектов, студент-разработчик имеет возможность

с, на данный момент, изготовленной моделью роботизированной ячейки заниматься поиском инвесторов и заинтересованных предприятий на мероприятиях, в которых участвует ГУАП (рис. 1).



Рис. 1. Представление проекта «Робототехническая система для диагностики турбогенераторов в период ремонтов» на стенде ГУАП на РМЭФ в Санкт-Петербурге

Такой тип взаимодействия со студентами позволяет развивать в них качества работы в команде, представления собственных проектов и продвижения идей.

На Битве роботов в 2023 году был представлен проект команды лаборатории машинного обучения ГУАП совместно с СКБ. Командой студентов данных лабораторий был подготовлен робот для боев, конструкторскую документацию для которого подготовили сотрудники СКБ (рис. 2).

Компетенции лаборатории и используемое программное обеспечение позволяют проводить дни открытых дверей для учеников школ Петербурга, организовывать занятия для Политехнического класса ГУАП, проводятся международные летние школы и прочие демо-дни и мастер-классы.

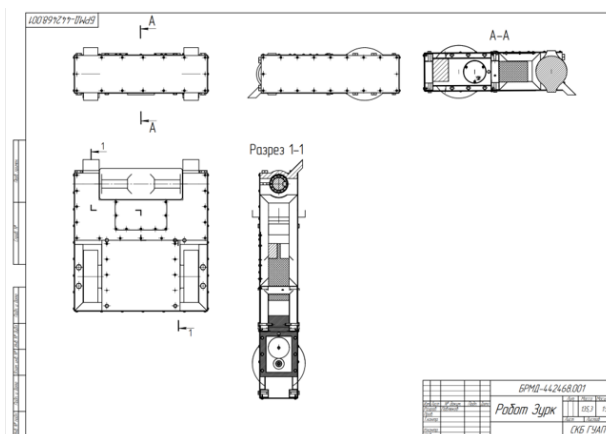


Рис. 2. Техническая документация к роботу Мега Зурк

В лаборатории проводится практика для студентов энергетических и робототехнических направлений обучения. В ходе практики студенты подробнее знакомятся с реальными задачами по проектированию, моделированию и расчету электрических машин, которые могут применяться с учетом специфики их подготовки. Так за 2022 учебный год практику на базе СКБ прошло 63 студента, для которых были подобраны индивидуальные и командные проектные задачи, отражающие их будущую рабочую деятельность. В ходе работы над проектами была зарегистрирована программа для ЭВМ, а также за 2022 учебный год было опубликовано 16 результатов интеллектуальной деятельности в изданиях различных типов.

Также силами лаборатории составляются и коммерциализируются программы повышения квалификации и программы дополнительного образования в области электрических машин и проведения расчетов, моделирования и проектирования с использованием различных АСАD.

Сотрудники СКБ занимаются выпуском научно-методического обеспечения для профильной кафедры университета «Электромеханики и робототехники».

IV. РАБОТА С ПАРТНЕРОМ

Совместно с АО «Силовые машины» для профильной кафедры ГУАП проводятся регулярные экскурсии на предприятия партнера, где студенты знакомятся с процессом производства электрических машин, а также получают представление о условиях возможной будущей работы.

Для привлечения студентов к инженерной деятельности в области электромашиностроения проводятся различные встречи и баркемпы, так в 2023 году проводилось ознакомительное мероприятие для студентов, участвовавших в ежегодном акселераторе ГУАП, где генеральный конструктор АО «Силовые машины» А.А. Ивановский рассказывал о планах развития предприятия на 2024 год.

Чуть ранее, в сентябре проводилась встреча студентов с кураторами направлений подготовки Студенческих конструкторских бюро АО «Силовые машины», где были обозначены условия трудоустройства, обучения и прочие интересующие студентов вопросы (рис. 3).

На данный момент идет разработка целевой программы дуального образования бакалавриата «Энергетические электрические машины» для студентов кафедры «Электромеханики и робототехники» ГУАП.



Рис. 3. Информационная встреча с кураторами программы Студенческие конструкторские бюро АО «Силловые машины»

Ключевые особенности данной практико-ориентированной образовательной программы:

1. В рамках образовательной программы студенты получают рабочую специальность на территории учебного центра СМ;
2. Занятия по специализированным предметам ведут действующие сотрудники СМ, максимум информации подкреплено реальными практическими примерами;
3. Студенты, находясь на практике, зачисляются в штат с выплатой зарплаты согласно штатному расписанию;
4. Темы ВКР по заказу СМ + наставник от СМ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОАВТОБУСА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация: Проведено математическое моделирование воздействия магнитных полей электроавтобуса на организм человека, предложены рекомендации для снижения воздействия магнитного поля на водителя.

Ключевые слова: математическое моделирование, электромагнитное поле, электроавтобус, организм, человек.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается производство автономного электротранспорта. Например, правительством города Москвы ведется планомерная работа по широкому применению пассажирского и грузового электротранспорта на территориях повышенной экологической ответственности, а также транспортной техники, использующей альтернативные источники энергии, в том числе электрические. При всех известных преимуществах [1] электробус является источником магнитных полей, которые представляют угрозу здоровью человека.

В таблице 1 приведены характеристики магнитных полей различных видов электротранспорта [2,3].

В соответствии с таблицей 1, городской автономный электротранспорт является источником магнитного поля, величина которого превышает норму в 10-25 раз, что негативно влияет на человека.

Таблица 1

Характеристики магнитных полей различных видов электротранспорта

Вид транспорта и род потребляемого тока	Среднее значение величины магнитной индукции, мТл	Максимальное значение величины магнитной индукции, мТл	Превышение нормы
Пригородные электропоезда	80	150	в 8-15 раз
В кабине машиниста электрички	100	200	в 10-20 раз

В моторных вагонах электрички	120	250	в 12-25 раз
В вагоне метро	150	250	в 15-25 раз
Городской электротранспорт на постоянном токе (трамвай троллейбус)	250	500	в 25-50 раз
Городской автономный электротранспорт (электроавтобус)	100	250	в 10-25 раз

В таблице 2 приведены негативные эффекты в организме человека, возникающие под воздействием магнитного поля разной напряженности при времени воздействия минут (среднее время нахождения пассажиров в пути) [4].

Таблица 2

Негативные эффекты в организме человека

Уровень напряженности магнитного поля, H , кА/м	Время действия магнитного поля, t , мин	Негативные эффекты в организме человека
2 - 4	$t \leq 60$	изменение сердечного ритма, увеличение кровяного давления на 5 – 10 мм, у аллергиков может развиваться эпилептическая реакция
4 - 6		изменение ферментов на молекулярном уровне, сильное возбуждение клеток головного мозга
6 - 8		изменение белка в коже, невозможные разрывы клеток ДНК, у беременных усиливается образование антител к тканям плода
8 - 10		рост лейкозных клеток (приводит к онкологическим заболеваниям кроветворной системы, повреждение нейронов, увеличение содержания адреналина в крови)

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Математическое моделирование воздействия электромагнитного поля электроавтобуса на организм человека проведено на основе закона электромагнитной

индукции Фарадея, согласно которому при изменении магнитного поля, проходящего через тело водителя электроавтобуса, в нем генерируется электрическое поле.

Магнитный поток через замкнутый контур, который представляет собой тело водителя электроавтобуса, длиной L и площадью поверхности S , можно определить из выражения

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где α – угол между магнитной индукцией B и площадью поверхности S .

$$\varepsilon = \int_L E dl = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \cos \alpha \frac{dB}{dt} - B \cos \alpha \frac{dS}{dt} - BS \frac{\cos \alpha}{dt}$$

Таким образом, электродвижущая сила в организме водителя электроавтобуса будет возникать в следующих случаях:

1) при изменении во времени магнитного поля, пронизывающего тело человека:

$$\varepsilon_1 = -S \cos \alpha \frac{dB}{dt} = -S \cos \alpha \sum_{i=1}^z B_i \cos(\omega_i t - \varphi_i),$$

где S – площадь поверхности головы водителя электроавтобуса; B_i – магнитная индукция ЭМП электроавтобуса.

2) при изменении во времени сечения контура (тело человека), при наличии магнитного поля:

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} &= -B \cos \alpha \frac{dS}{dt} - B \cos \alpha \frac{dS}{dr} V = \\ &= -B \cos \alpha \sum_{j=1}^q S_j \omega_j \sin(\omega_{Sj} t - \varphi_{Sj}) - B \cos \alpha \sum_{j=1}^y S_j \cos(\omega_{Vj} - \varphi_{Vj}) \end{aligned}$$

где ω_j – частота изменения площади поверхности S_j во времени.

3) при изменении во времени угла α между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности замкнутого контура:

$$\varepsilon_3 = -SB \frac{d \cos \alpha}{dr} V = -SB \sum_{j=1}^y A_j \cos(\omega_{\alpha j} t - \varphi_{\alpha j})$$

где A_j – коэффициент угла α .

Тогда электродвижущая сила, наводимая в организме водителя электроавтобуса

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -S \sum_{i=1}^z B_i \cos \alpha_i \cos(\omega_i t - \phi_i) - \\ & -B \cos \alpha \left(\sum_{j=1}^q S_j \omega_j \sin(\omega_{Sj} t - \phi_{Sj}) + \sum_{j=1}^y S_j \cos(\omega_{Vj} t - \phi_{Vj}) \right) - \\ & -SB \sum_{j=1}^y A_j \cos(\omega_{\alpha j} t - \phi_{\alpha j}) \end{aligned} \quad (1)$$

Проведены расчеты по соотношению (1) для двух случаев. Первый вариант, при заземлении, производимом на корпус, в перегородке между водительской кабиной и пассажирским салоном расположен один токоведущий провод, расчет представлен в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов электродвижущей силы, наводимой в организме водителя электроавтобуса при расположении одного токоведущего провода в перегородке

x , м	B , мкТл	$B_{\text{пуск}}$, мкТл	S , м ²	ε_1 , В	ε_2 , В	ε_3 , В	ε , В
0,1	580	2320	0,047	-	-	-	-
0,2	290	1160		68,15	1366	54,52	1489
0,3	193	773		45,402	910,5	36,33	992,2
0,4	145	580		34,075	683,2	27,26	744,5
0,5	116	464		27,26	136,6	5,452	169,3
0,1	580	2320	0,054	-	-	-	-
0,2	290	1160		78,3	1569	62,64	1710
0,3	193	773		52,164	1046	41,74	1140
0,4	145	580		39,15	784,6	31,32	855,1
0,5	116	464		31,32	156,9	6,264	194,5
0,1	580	2320	0,073	-	-	-	-
0,2	290	1160		95,7	1917	76,56	2089
0,3	193	773		63,756	1278	51,02	1392
0,4	145	580		47,85	958,5	38,28	1045
0,5	116	464		38,28	191,7	7,656	237,6
0,1	580	2320	0,073	-	-	-	-
0,2	290	1160		105,85	2120	84,68	2311
0,3	193	773		70,518	1413	56,43	1540
0,4	145	580		52,925	1060	42,34	1155
0,5	116	464		42,34	212	8,468	262,8

Второй вариант при двух токоведущих проводах, расположенных в перегородке между водительской кабиной и пассажирским салоном электроавтобуса, расчет представлен в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчета электродвижущей силы в организме водителя электроавтобуса при расположении двух токоведущих проводов в перегородке

x , м	B_{Σ} , мкТл	$B_{\Sigma \text{ пуск}}$, мкТл	S , м ²	ε_1 , В	ε_2 , В	ε_3 , В	ε , В
0,1	546	2183	0,047	128,26	2571	102,6	2802
0,2	142	571		33,511	672,6	26,84	732,9
0,3	64	256		15,04	301,5	12,03	328,6
0,4	36	144		8,46	169,6	6,768	184,8
0,5	23	93		5,452	109,5	4,371	119,4
0,1	546	2183	0,054	147,37	2953	117,9	3218
0,2	142	571		38,502	772,4	30,83	841,8
0,3	64	256		17,28	346,3	13,82	377,4
0,4	36	144		9,72	194,8	7,776	212,3
0,5	23	93		6,264	125,8	5,022	137,1
0,1	546	2183	0,066	180,11	3608	144,1	3932
0,2	142	571		47,058	943,7	37,69	1028
0,3	64	256		21,12	423,1	16,9	461,1
0,4	36	144		11,88	238	9,504	259,4
0,5	23	93		7,656	153,7	6,138	167,5
0,1	546	2183	0,073	199,22	3990	159,4	4348
0,2	142	571		52,049	1044	41,68	1137
0,3	64	256		23,36	467,9	18,69	509,9
0,4	36	144		13,14	263,2	10,51	286,8
0,5	23	93		8,468	170	6,789	185,2

На рис. 1 приведена зависимость от расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя и при различных значениях площади поперечного сечения S .

На рис. 2 приведена зависимость электродвижущей силы ε от площади поперечного сечения S при различных значениях расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя.

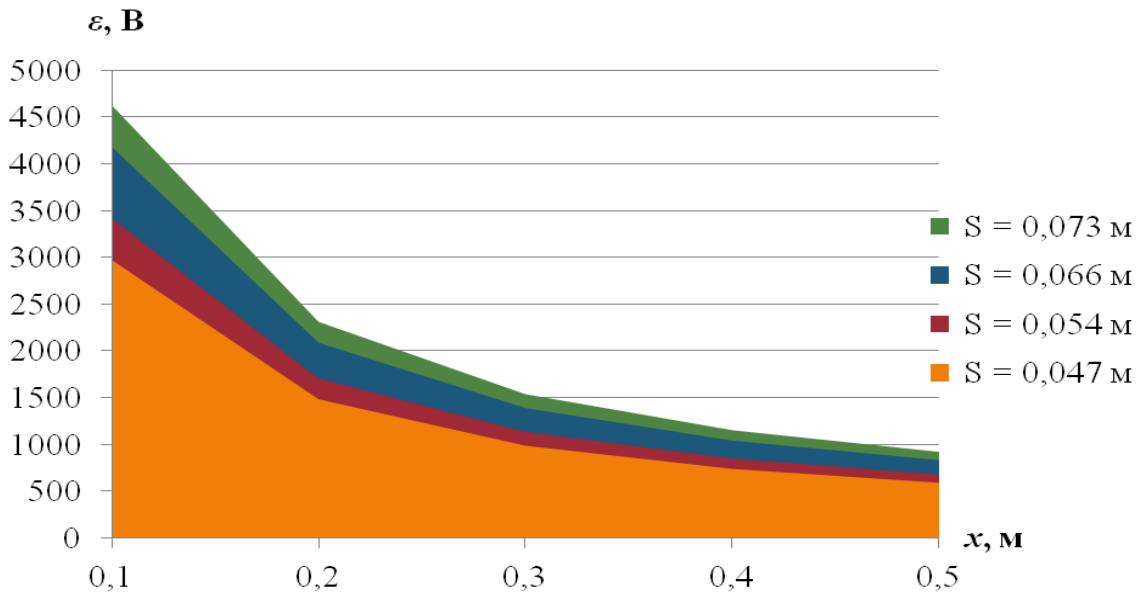


Рис. 1. Зависимость электродвижущей силы ϵ наводимой в организме водителя электроавтобуса от расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя и при различных значениях площади поперечного сечения S

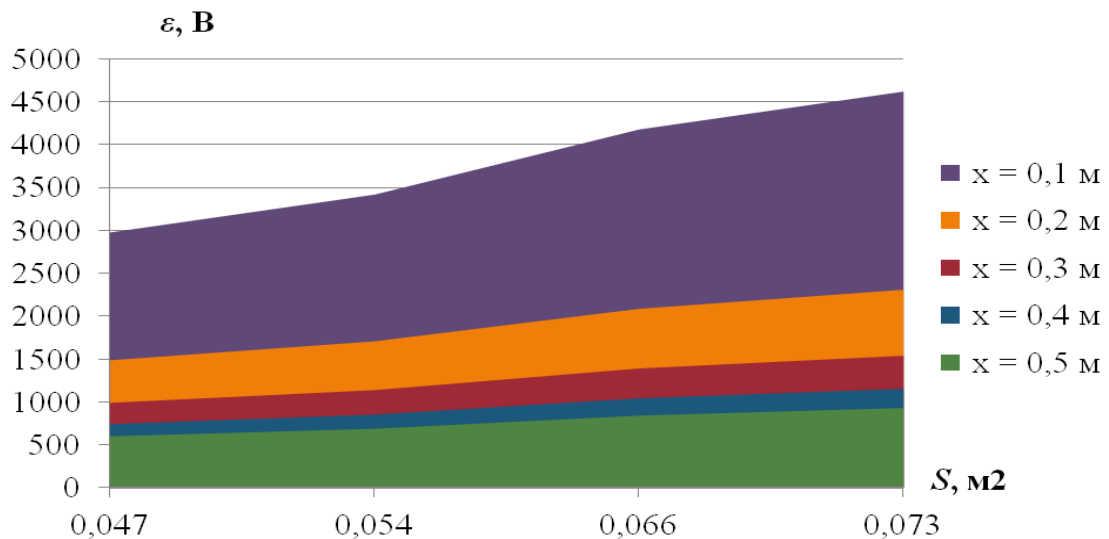


Рис. 2. Зависимость электродвижущей силы ϵ от площади поперечного сечения S при различных значениях расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя

На рис. 3. приведена зависимость электродвижущей силы наводимой в организме водителя электроавтобуса от расстояния от токоведущих проводов до головы водителя при различных значениях площади поперечного сечения S .

На рис. 4. приведена зависимость электродвижущей силы ϵ от площади поперечного сечения S при различных значениях расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя.

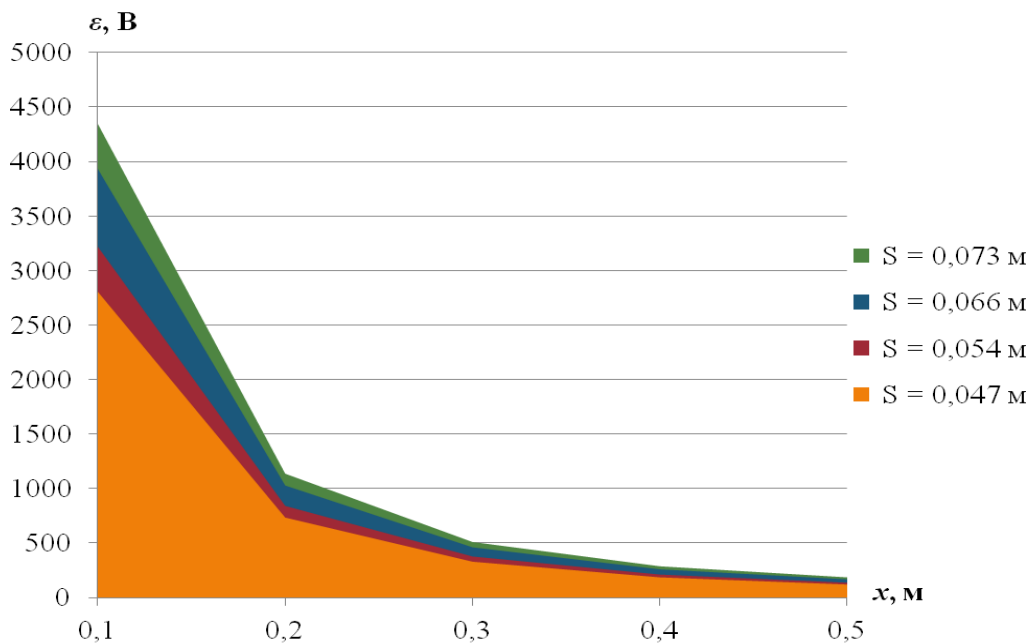


Рис. 3. Зависимость электродвижущей силы наводимой в организме водителя электроавтобуса от расстояния от токоведущих проводов до головы водителя при различных значениях площади поперечного сечения S

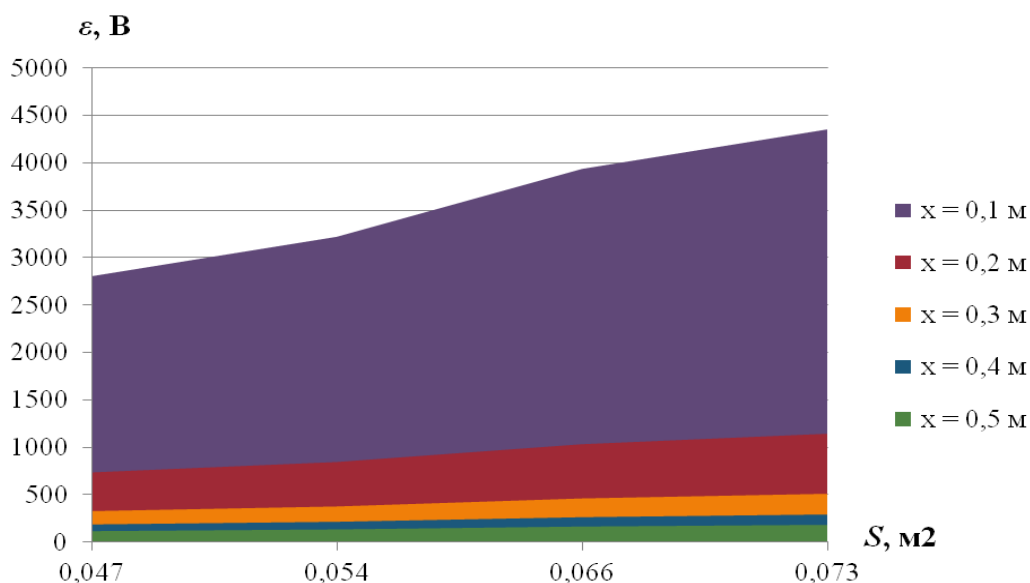


Рис. 4. Зависимость электродвижущей силы ϵ от площади поперечного сечения S при различных значениях расстояния x от токоведущих проводов до головы водителя

Проведено компьютерное моделирование, в программном комплексе Ansys Maxwell, на основе закона полного тока и суперпозиции магнитных полей для токоведущих проводников, расположенных в перегородке, отделяющей водительскую кабину от пассажирского салона электроавтобуса, до головы водителя, при пусковом режиме работы, при трех расстояниях между проводниками: 0,03 м; 0,05 м; 0,1 м, результаты показаны на рис. 5–7.

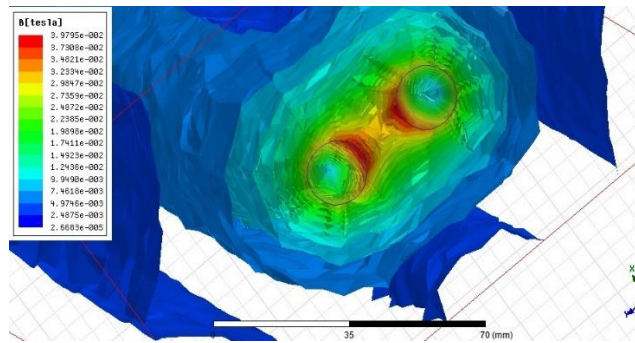


Рис. 5. Распределение магнитного поля двух токоведущих проводников при пусковом режиме работы при расстоянии между проводниками 0,03 м

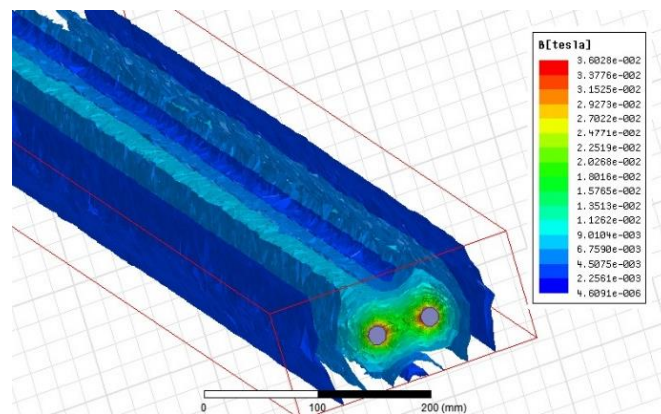


Рис. 6. Распределение магнитного поля двух токоведущих проводников (расстояние 0,05 м), расположенных в перегородке, до головы водителя

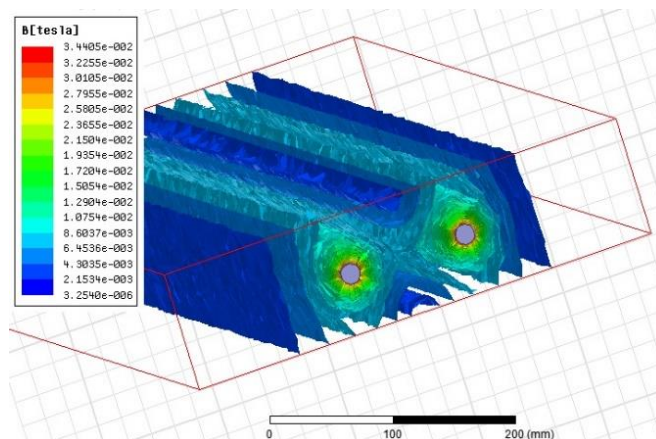


Рис. 7. Распределение магнитного поля двух токоведущих проводников (расстояние 0,1 м), расположенных в перегородке, до головы водителя

На рис. 8 представлены зависимости индукции магнитного поля от расстояния x от проводов, расположенных в перегородке, до головы водителя при двух режимах работы номинальном и пусковом.

Разработана математическая модель физического воздействия электромагнитного поля электроавтобуса на организм человека. Получено выражение для определения

электродвижущей силы, наводимой в организме водителя под действием магнитного поля в электроавтобусе. С увеличением площади поперечного сечения головы водителя электроавтобуса и расстояния от головы водителя до токоведущего провода эта электродвижущая сила возрастает.

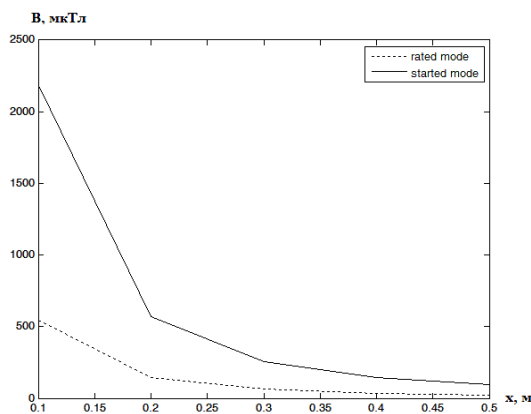


Рис. 8. Зависимости индукции магнитного поля от расстояния x от проводов, расположенных в перегородке, до головы водителя при двух режимах работы номинальном и пусковом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено компьютерное моделирование, в результате которого установлено, что: при увеличении расстояния между проводниками магнитное поле, создаваемое ими, уменьшается, поэтому провода нужно располагать на расстоянии не менее 0,1 м друг от друга; при увеличении расстояния x от проводов, расположенных в перегородке между кабиной водителя и пассажирским салоном, до головы водителя индукция магнитного поля уменьшается, т.е. чем дальше находится водитель от проводов, тем меньше вредное воздействие магнитного поля. На расстоянии от проводов до головы водителя равном 0,2 м индукция магнитного поля снижается на 50%, а на расстоянии 0,3-0,5 м – на 70-80%. Учитывая это, следует установить кресло водителя на расстоянии не менее 0,3 м от перегородки между водительской кабиной и пассажирским салоном, а также зафиксировать регулировку спинки водительского кресла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преимущества электротранспорта
http://elektrovar21.ru/news/top_10_pljusov_ehlektrotransporta/2019-04-30-167
2. Птицына Н.Г. и др. Электромагнитная безопасность электротранспортных систем: основные источники и параметры магнитных полей// Научно-технический

вестник информационных технологий механики и оптики. № 2(84) 2013. С. 65-70
<https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnaya-bezopasnost-elektrotransportnyh-sistem-osnovnye-istochniki-i-parametry-magnitnyh-poley/viewer>

3. Пашали Д.Ю., Хасанова В.Ф., Хасанова А.С. Методы защиты от электромагнитного излучения электротранспорта // Nauka-Rastudent.ru. – 2016. – № 3 (027) С. 44.

4. Рыбаков Ю. Л. Влияние внешнего магнитного поля на гомеостатические показатели организма человека // Медицина и высокие технологии. №2. 2015. С.13-18.

Юсуфов Т.А.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

СТУДЕНЧЕСКИЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

Аннотация: В данной статье рассмотрены различные формы организации рабочего процесса и взаимодействия студенческих конструкторских бюро и индустриальных партнеров из числа высокотехнологичных компаний. Рассмотрена ретроспектива студенческих конструкторских бюро и их место в инженерном образовании во времена СССР. Приведены преимущества и проблемы рассматриваемых форм взаимодействия на примере деятельности студенческих организации в рамках реализации проекта Передовой инженерной школы «Моторы будущего» Уфимского университета науки и технологий.

Ключевые слова: инженерное образование, студенческие конструкторские бюро, Передовые инженерные школы, промышленность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества инженерного образования – одно из приоритетных направлений развития высших учебных заведений нашей страны. Для достижения поставленных задач разработаны и внедрены новые технологии и методики обучения, одним из которых является создание сети студенческие конструкторских бюро (далее СКБ), в рамках деятельности которых студенты среднего профессионального и высшего образования, школьники, магистранты, аспиранты, молодые ученые, рабочие и инженеры (до 35 лет), активно участвуют в техническом творчестве, прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах. Подобное решение позволяет сформировать компетенции необходимое на предприятиях реального сектора экономики.

II. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ СТУДЕНЧЕСКИХ КОНСТРУКТОРСКИХ БЮРО

Сама идея создания студенческих объединений известна еще с времен Советского Союза, где подобная практика была достаточно распространена. В 1979 году в стране насчитывалось более 390 СКБ, где по разным данным трудилось порядка 100 тыс. студентов дневных форм обучения. При этом общий финансовый объем научных исследований достигал 25,4 млн. руб. (примерно 7,1 млрд рублей по современному

курсу) [1].

Важно также отметить тот факт, что деятельность СКБ в ВУЗах регламентировалась всесоюзным законом об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования в СССР [2], который выступал в роли нормативной базы при создании новых структурных подразделении и регламентирующим документом при регулировании деятельности существующих организаций.

Подобный централизованный подход, несомненно, приносил свои плоды, однако нельзя не отметить и проблемы, возникшие при попытке масштабирования опыта наиболее успешных студенческих объединений на все ВУЗы страны. Так в конце 1960-1970-х гг. система столкнулась с формализмом, погоней за количественными показателями, припискам, стремлением вузов любой ценой «открыть» свой СКБ и отчитаться перед вышестоящими инстанциями. Это в свою очередь снизило эффективность подобного рода студенческих объединений с точки зрения решения задач реального сектора экономики, а также негативно сказалось на вовлеченность молодых специалистов ввиду распространения негативного опыта, связанного с организацией работы, между участниками.

III. СТУДЕНЧЕСКИЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО В СОВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ

В современных реалиях развития экономики создание сети СКБ наиболее востребовано в наукоемких областях промышленности ввиду возможности адаптации рабочего процесса под современные тенденции развития ключевых областей без привязки к общеобразовательному процессу и рабочим программам специальностей. Данное решение позволяет организовать формирование у студентов знаний и навыков, необходимых промышленности, также позволяет познакомить студентов – будущих инженеров со спецификой той или иной отрасли.

Важно отметить, что реализация вышеописанного подхода невозможна в отсутствие хотя бы одного якорного индустриального партнера, при этом число индустриальных партнеров теоретически не ограничено.

Далее рассмотрены варианты взаимодействия ВУЗа и Индустриального партнера, реализованные или планируемые к реализации в рамках деятельности Передовой инженерной школы «Моторы будущего» Уфимского университета науки и технологий

(далее ПИШ «Моторы будущего»).

А. Интегрированное студенческое конструкторское бюро

В России значительная часть крупнейших промышленных предприятий расположена в отдалении от региональных центров и столиц субъектов, что негативно сказывается на кадровой ситуации на этих предприятиях, особенно в условиях ежегодно возрастающего оттока молодых специалистов из провинции. В связи с этим крупным предприятиям необходимо в значительной степени пересматривать свою кадровую политику, в том числе с точки зрения социальных гарантий. Студенческое конструкторское бюро при взаимодействии с индустриальным партнером выступает в качестве обособленного подразделения, расположенного в удалении от предприятия. При этом работа в СКБ гибко подстраивается под условия организации труда на предприятии. Данная схема реализована в ПИШ «Моторы будущего» при поддержке ПАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны).

Студенты выполняют задачи, связанные с производственным процессом Индустриального партнера, выступающего в этом случае в качестве заказчика. Постановка задач осуществляется ответственным куратором со стороны предприятия. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия СКБ и индустриального партнера на примере СКБ «КАМАЗ» ПИШ «Моторы будущего».

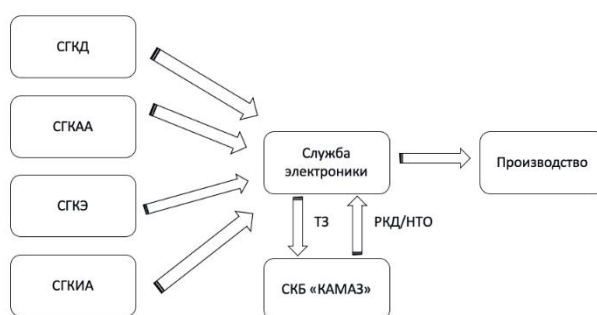


Рис.1. Схема постановки задач в СКБ «КАМАЗ»

Как показано на рисунке 1 постановка задачи осуществляется службой электроники, находящейся в зоне ответственности главного конструктора по инновационным автомобилям. Сама задача может быть сформирована в виде технического задания с указанием сроков выполнения работ. По результатам выполнения формируется комплект рабочей конструкторской документации, либо научно-технический отчет, где подробно описаны результаты.

Финансирование подобного рода СКБ осуществляется за счет средств приносящей доход деятельности (ПДД) по договорам выполнения НИОКР. При этом возможен вариант с трудоустройством студентов на предприятии партнера, с предоставлением рабочего пространства со стороны ВУЗа.

В целях формирования в студентах СКБ необходимых знаний и навыков сформированные команды на первоначальных этапах направляются на дополнительное повышение квалификации, при этом индустриальный партнер принимает непосредственное участие за счет организации образовательной базы, базы практик. При этом постоянный контакт со специалистами предприятия формирует в студентах эмоциональные привязки, что в свою очередь положительно сказывается при принятии решения студентом о дальнейшем построении карьеры на базе индустриального партнера.

Важно отметить, что при наличии нескольких индустриальных партнёров возможно возникновение конкуренции и своеобразной борьбы за внимание будущих потенциальных высококвалифицированных кадров, что в конечном счете положительно сказывается на условиях дальнейшей работы выпускников.

С точки зрения управления коллективом СКБ можно выделить два основных момента:

1. Наличие куратора от организации-партнера, осуществляющего стратегическое управление СКБ в части формирования плана загрузки СКБ.
2. Обязательное наличие руководителя СКБ, при этом на начальном этапе формирования структурного подразделения данную должность должен занимать штатный сотрудник ВУЗа, ответственный за оперативное управление и формирование кадрового потенциала. Далее руководителем может стать студент из числа работников СКБ, проявивший выдающиеся лидерские качества и способности управленца.

Высокая степень интеграции СКБ в бизнес-процессы предприятия-партнера требует также построение совместимых бизнес-процессов в рамках деятельности студенческого объединения. Данная особенность структурных подразделений ВУЗа теоретически достаточно проста с точки зрения организации рабочего процесса, однако на практике органичное внедрение требует также изменение устоявшихся процессов у Индустриального партнера с точки зрения организации взаимодействия с соисполнителями, что часто вызывает отторжение у исполнителей на местах.

Преодолеть переходный период возможно только при тесном взаимодействии руководящего состава ВУЗа и Индустриального партнера, а также при непосредственной заинтересованности руководителей среднего звена на предприятии-партнере. Также, ввиду наличия специфики тех или иных бизнес-процессов индустриальных партнеров, требуется периодическое повышение компетенций сотрудников СКБ, что достигается не только методами, описанными ранее, но и единообразием используемых инструментов, в том числе программным обеспечением. В рамках сотрудничества с ПАО «КАМАЗ» было закуплено специфичное программное обеспечение: САПР Siemens NX и PLM-система Team Center. Таким образом обеспечивается взаимодействие работников СКБ и Индустриального партнера в единой программной среде.

Подобная форма реализации на сегодняшний день показала наилучшие показатели с точки зрения эффективности.

В. Студенческое конструкторское как малое инновационное предприятие

На сегодняшний день в стране реализуется множество программ по поддержке малого и среднего предпринимательства (далее МСП) в том числе малых инновационных предприятий. Существует множество программ по поддержке инновационных проектов направленных на создание высокотехнологичных продуктов, в том числе направленных на решение задач крупных промышленных организаций [3].

Большой перечень программ грантовой поддержки направленных на создание новых и развитие действующих высокотехнологичных компаний, коммерциализацию результатов научно-технической деятельности предоставляет ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Перечень с кратким описанием представлен в таблице 1 [4].

В таблице 1 приведена лишь малая часть возможных мер поддержки молодых ученых и малых инновационных предприятий. В рамках трехстороннего взаимодействия Индустриальный партнер – ВУЗ – молодой ученый основная задача СКБ – создать комфортные условия для разработки инновационных решений в интересах индустриальных партнеров.

Также важно отметить, что индустриального партнера на начальном этапе может и не быть, однако это не должно стать помехой при создании инновационных продуктов. При этом основной задачей ВУЗа становится продвижение инновационных

продуктов путем ведения переговоров с потенциальными Заказчиками на уровне, достаточном для принятия решений. При этом в случае удачного завершения этапа разработки проект должен пройти этап акселерации на базе ВУЗа, что в свою очередь приводит к созданию малых инновационных предприятий при участии Университета.

Таблица 1

Перечень программ поддержки фонда содействия инновациям

№ п/п	Наименование программы	Краткое описание
1	УМНИК	Программа направлена на поддержку коммерчески ориентированных научно-технических проектов молодых исследователей.
2	СТУДЕНЧЕСКИЙ СТАРТАП	Программа направлена на выполнение работ студентами по разработке новых товаров, изделий, технологий или услуг с использованием результатов собственных научно-технических и технологических исследований, имеющих потенциал коммерциализации и находящихся на самой ранней стадии развития.
3	СТАРТ	Программа направлена на создание новых и поддержку существующих малых инновационных предприятий, стремящихся разработать и освоить производство нового товара, изделия, технологии или услуги с использованием результатов собственных научно-технических и технологических исследований
4	КОММЕР-ЦИАЛИЗАЦИЯ	Программа направлена на поддержку малых инновационных компаний, завершивших стадию НИОКР и планирующих создание или расширение производства инновационной продукции

В мировой практике немало примеров, когда крупные организации приобретают малые стартап проекты вместе с командами разработчиков. Выгодоприобретателями в данном случае являются все стороны:

1. Индустриальный партнер получает либо инновационный продукт,

закрывающий потребности его производства, либо возможность вывода на рынок нового (имеющего спрос) продукта и развития у себя нового направления, а также готовую команду разработчиков, способную генерировать идеи и реализовывать проекты до этапа опытного прототипа.

2. ВУЗ получает прибыль от продажи собственной доли в малом инновационном предприятии, а также прав на использование интеллектуальной собственности. Также немаловажным является тот факт, что у ВУЗа появляется лояльная команда в структурах индустриального партнера.

3. Команда малого инновационного предприятия является основным выгодоприобретателем ввиду высокой доли в организации, а также, в конечном итоге, работы в структурах индустриального партнера, либо в качестве дочерней фирмы.

По результатам на 2022 г. в ПИШ «Моторы будущего» победителями по программе «УМНИК» стали 3 человека, соответственно в случае успешного завершения проекта возможно создание 3-х малых инновационных предприятий.

IV. СЛОЖНОСТИ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СКБ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

По результатам работы СКБ «КАМАЗ» в составе ПИШ «Моторы будущего» на протяжении полутора лет можно сделать некоторые выводы.

Во-первых, первоначальное предположение «СКБ как образовательное структурное подразделение ВУЗа, интегрированное в образовательные программы подготовки», не оправдалось. Достаточно проблематично объединить базовую подготовку инженерных кадров с деятельностью в рамках студенческого объединения, ввиду не только высокой загрузки студентов в образовательном процессе, различий в скорости, этапности и организации деятельности в образовательном процессе и в проектной работе в СКБ, но и различий в компетентностных моделях выпускника с точки зрения ВУЗа и индустриального партнера.

В результате принято решение об изменении позиционирования СКБ относительно образовательного процесса. Теперь студенческие конструкторские бюро, наравне с проектными командами передовой инженерной школы, играют роль обособленных подразделений, решающих инженерные задачи в рамках НИОКР, при этом по результатам выполнения проектов, а также обратной связи с индустриальным партнером формируется компетентностная модель выпускника, востребованного на

рынке. Таким образом, СКБ может выступать в качестве Заказчика по формированию структуры образовательных результатов, которые будут получены при обучении студентов в ВУЗе. При этом ключевые тематики деятельности СКБ могут выступать в роли задач для ВКР выпускников профильных кафедр.

Важно отметить, что несмотря на изменение позиции СКБ относительно других структур ВУЗа, образовательная составляющая изменилась незначительно. Это связано в первую очередь с необходимостью формирования у будущих выпускников специфических компетенций, присущих деятельности якорного индустриального партнера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чагадаева О. А. Студенческие конструкторские бюро: от неформальных кружков к официальным научно-исследовательским институтам (1960-1980 гг.) // Проблемы деятельности ученых и научных коллективов. С.213-221. <https://cyberleninka.ru/article/n/studencheskie-konstruktorskie-byuro-ot-neformalnyh-kruzhkov-k-ofitsialnym-nauchno-issledovatel'skim-institutsiyam-1960-1980-gg>
2. "Об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования в СССР" от 24.12.1958 // Верховный Совет СССР. – 1958
3. Стратегия развития малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 02.06.2016 № 1083-р // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru>
4. О Фонде содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере: Постановление Правительства РФ от 03.02.1994 № 65 (ред. от 21.06.2013) // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 27.06.2018).

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТАНЦИИ

Аннотация: Основной задачей исследования было разработать принципиальные схемы ТЭЦ с различными вариантами внедрения топливных элементов. В работе рассмотрены три варианта компоновки схем станции с топливными элементами с рассмотрением достоинств и недостатков от внедрения каждой из них. Каждая из схем показывает свою работоспособность, но требуют более глубокого изучения для дальнейшего внедрения. В статье также рассмотрены варианты добычи водорода для работы топливных элементов, экономические и экологические аспекты от их внедрения на станции.

Ключевые слова: топливные элементы, тепловая электрическая станция, парогазовая установка, комбинированная установка, гибридные силовые установки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Идея применения водорода в энергетике зародилась еще в 20 веке. Многие ученые заинтересовались данным вопросом и в процессе работы были разработаны различного рода двигатели на водородном топливе. Во многих странах реализуются программы по разработке новых и усовершенствованию старых технологий применения водорода.

Одной из таких технологий, которая нашла своё широкое применение, является топливный элемент (ТЭ).

В 1838 году физикохимик Уильям Роберт Гроув впервые подробно рассказывает о создании первого в мире ТЭ, на основе которого затем был изобретен его знаменитый гальванический элемент «элемент Гроув».

Открытие ТЭ не осталось без внимания и над ними стали работать многие ученые, в том числе Людвиг Монд, который в 1889 году предложил применять в качестве окислителя воздух, а восстановителя – метан и различные виды топлив.

Одним из основоположников применения ТЭ на станциях является Вильгельм Оствальд. Именно им в 1894 году впервые было предложено внедрение ТЭ непосредственно на тепловые станции для крупномасштабной генерации электроэнергии с использованием угля в качестве восстановителя. Однако реализовать идею на практике так и не удалось.

В связи с открытием первых бинарных парогазовых установок (ПГУ) в 1913 году преобладающая часть ученых устремила свои исследования именно в эту область так как их создание требовало наименьших металлозатрат, а технология создания ПГУ была уже наиболее проработана. Тем самым технология развития ПГУ вытеснила технологию паротурбинных установок (ПТУ) с ТЭ.

ПГУ получили свое активное развитие и продолжают развиваться на сегодняшний момент, однако, как бы не пытались усовершенствовать парогазовый контур, достигается все меньший прирост КПД данных энергоустановок и их единичной мощности. Такое явление связано с достижением их термодинамического, механического и экономического предела.

ПГУ перестали быть новейшей прорывной технологией и многие ученые задумались о совершенствовании выработки тепловой и электрической энергий посредством частичной или полной замены существующих агрегатов новым инновационным оборудованием, которое позволило бы перешагнуть через устоявшийся многолетний предел.

Одной из таких технологий являются ТЭ, изучение и совершенствование которых вновь восстановилось. Их начали широко применять в автомобилестроении, на самолетах и кораблях. Стали разрабатываться мини-ТЭЦ с топливными элементами, предназначенные для электро- и теплоснабжения небольших жилых комплексов или поселков.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. *Методы и результаты*

Для оценки целесообразности внедрения ТЭ на станциях на рис. 1 представлено графическое отображение сопоставления КПД производства электроэнергии различными технологиями.

Как можно отметить, комбинированный цикл ТЭ с ГТУ достигает наибольших значений КПД, чем применения чисто ПГУ.

Однако, здесь не учтено применение комбинированного цикла ТЭ с ПГУ. Исходя из многих трудов ученых и из простых логических соображений такой цикл будет наиболее эффективен и несопоставим ни с одной технологией.

Топливные элементы – это электрохимический источник тока и тепла, работающем на водороде либо богатом водородом топливе.

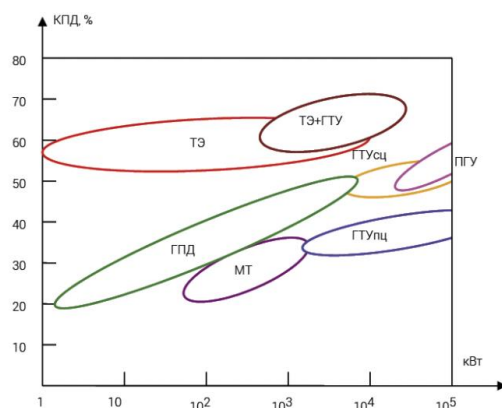


Рис. 1. Сопоставление КПД производства электроэнергии различными технологиями в диапазоне установленной электрической мощности от 41 кВт до 100 МВт: МТ – микротурбины; ГПД – газопоршневые двигатели; ГТУпц – газотурбинные установки простого цикла; ГТУсц – газопоршневые установки со сложным циклом; ПГУ – парогазовые установки; ТЭ – топливные элементы; ТЭ+ГТУ – гибридные установки

Простейшая схема работы представлена на рис. 2. На анод поступает водород или водородосодержащее топливо. Топливо теряет свои электроны, которые пропускаются электролитом и проходят по внешней электрической цепи. Часть электронов уходит в цепь, а другая часть направляется на катод, где поступающие с другой стороны молекулы кислорода соединяется с электроном и прошедшим через мембрану протоном водорода. В результате на выходе мы имеем некоторое количество электроэнергии и воду либо пар.

Также на рис. 2 представлены некоторые из наиболее популярных разновидностей ТЭ с различными электролитами. Более подробно о каждом типе ТЭ можно ознакомиться в статье [1-3].



Рис. 2. Общий вид и классификация топливных элементов

Как говорилось ранее, наиболее широкое применение ТЭ получили в машиностроении, на летательных аппаратах и на мини-ТЭЦ, однако они также широко применяются в гибридных установках с ГТУ, ПТУ и ПГУ, в качестве автономного источника тепло- и электроснабжения, в системах коммуникации, в качестве источников энергии для портативных устройств.

В работе предложены три схемы компоновки топливных элементов с ПГУ. Предлагается применение твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), так как по отношению к другим типам они имеют наибольший КПД и температуру на выходе (около 1000 °С).

На рис. 3 представлен основной контур ПГУ, на основе которого выполнялась дальнейшая модернизация. В данном контуре применялось следующее оборудование: паровая турбина SST-300, газовая турбина SGT-800, котел-утилизатор E-57,5/12,0-7,4/0,6-520/280. В качестве метода добычи водорода принимается метод паровой конверсии метана.

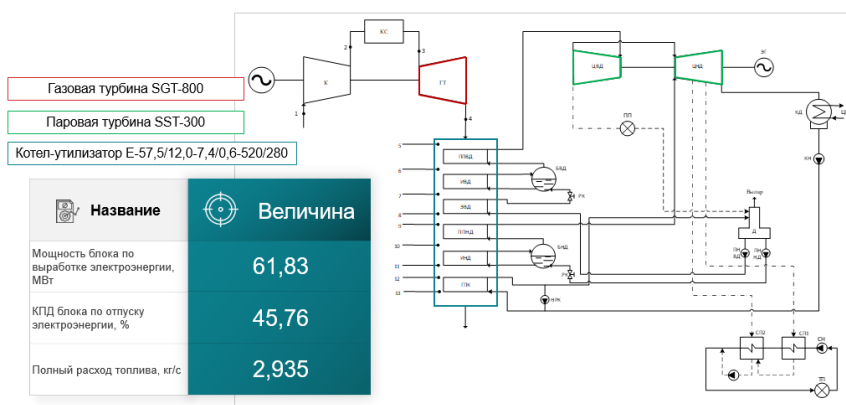


Рис. 3. Основной парогазовый контур

Исходя из расчетов были получены следующие данные: мощность блока по выработке электроэнергии 61,8 МВт, КПД блока по отпуску электроэнергии 45,8 %, полный расход топлива 2,94 кг/с.

Первый вариант компоновки схемы ПГУ с ТЭ представлен на рис. 4.

В данной схеме предлагается заменить камеру сгорания (КС) на ТЭ. Предполагается, что такая манипуляция позволит увеличить КПД блока по отпуску электроэнергии и снизить затраты топлива на его сжигание, тем самым увеличивая финансовую выгоду от внедрения.

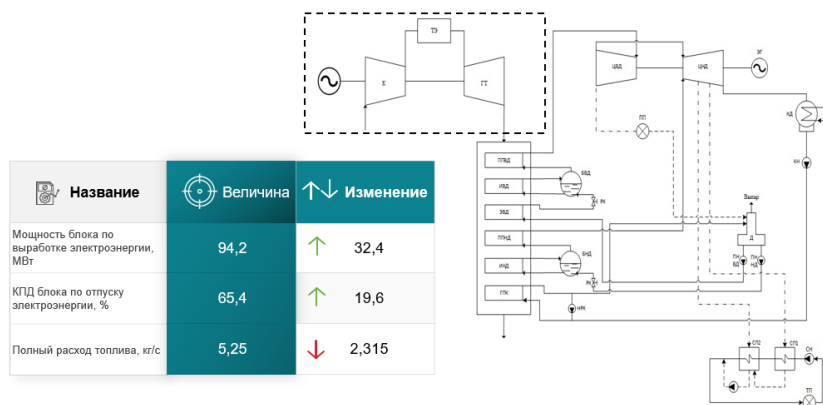


Рис. 4. Парогазовый контур с топливными элементами и замещенной камерой сгорания

Согласно расчетам, получены следующие параметры: мощность блока по выработке электроэнергии 94,2 МВт, КПД блока по отпуску электроэнергии 65,4 %, Полный расход топлива 5,25 кг/с

Таким образом мощность блока по выработке электроэнергии выросли на 32,4 МВт и 19,6 % соответственно, однако, полный расход топлива тоже увеличился почти в 2 раза о первоначально значения. Это связано с тем, что, то топливо, которое предполагалось не сжигать, а направлять на паровую конверсию требует больших расходов на протекание данного процесса и достижения параметров на выходе как у замененной КС. То есть в первоначальной схеме приняты стационарные параметры, которые необходимо достичь при ее дальнейшей модернизации.

Также, при такой компоновке ТЭ подвергаются наибольшей деградации из-за воздействия больших температур (около 1000 °С) и повышенному давлению от компрессора.

Такая схема имеет место быть, но при проектировании надо иметь ввиду необходимость частой замены блоков ТЭ новыми.

На рис. 5 представлена вторая схема компоновки ТЭ с ПГУ.

Для снижения деградации ТЭ предлагается не все тепло для газовой турбины получать в ТЭ, а лишь часть. Для получения требуемых значений температуры газовая смесь отправляется после ТЭ в КС для дожигания.

При такой компоновке получены следующие расчетные параметры: мощность блока по выработке электроэнергии 80,48 МВт, КПД блока по выработке электроэнергии 58,9 %, полный расход топлива 2,6 кг/с.

Исходя из расчетов можно сделать вывод, что такая схема позволяет увеличить все интересующие параметры при этом снизив температурную нагрузку на ТЭ.

Третий вариант компоновки представлен на рис. 6.

Предлагается полностью заменить контур ГТУ топливными элементами.

При такой компоновке получены следующие параметры: мощность блока по выработке электроэнергии 43,3 МВт, КПД блока по выработке электроэнергии 34,1 %, полный расход топлива 15,8 кг/с.

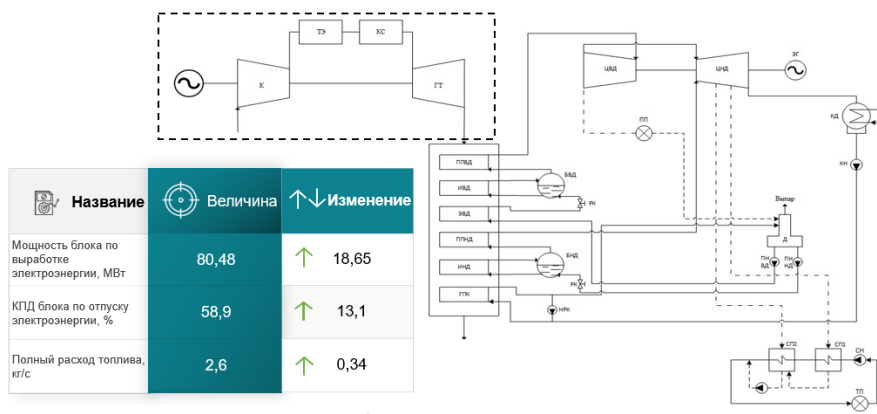


Рис. 5. Парогазовый контур с топливными элементами и дожиганием в камере сгорания

По отношению к другим схемам потребление топлива выросло практически в 6 раз. То есть значительно увеличатся затраты на топливо.

При этом такая компоновка имеет место быть в связи с тем, что при такой компоновке ТЭ работают при наименьших воздействиях деградации в связи с тем, что не нагнетается высокое давление от компрессора и рабочая температура достигает примерно 600 °С.

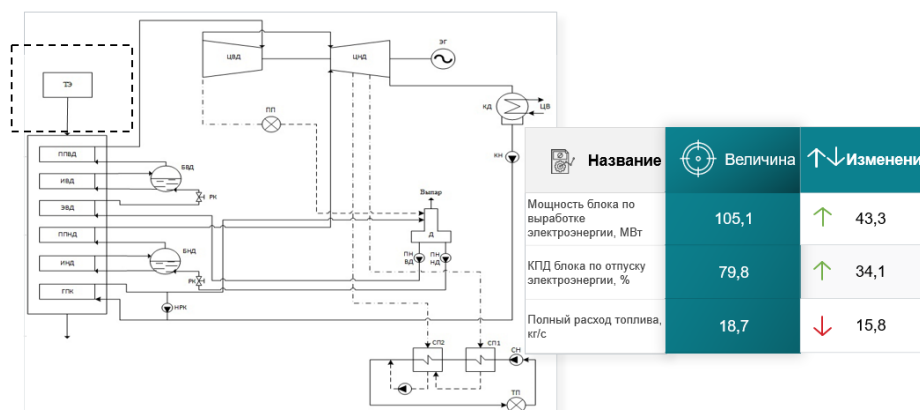


Рис. 6. Парогазовый контур с топливными элементами и замещенной схемой газотурбинной установки

В. Экономические аспекты

Если рассмотреть комплексно представленные компоновки и свести данные воедино, то можно сделать вывод, что наиболее энергоэффективна схема компоновки ПГУ с топливными элементами и замещенной схемой ПГУ (таблица 1). Однако, как говорилось ранее, наиболее выгодной является компоновка ПГУ с топливными элементами и дожиганием в КС.

При такой компоновке появляется возможность регулирования нагрузкой ТЭ с полным их отключением, например, для ремонта или на период низкого энергопотребления (ночное время суток), при этом основной процесс работы цикла не будет нарушен.

Таблица 1

Результаты расчета схем ТЭЦ с топливными элементами

Название схемы	Суммарная мощность, МВт	Суммарный КПД, %	Мощность топливного элемента	Расход топлива, кг/с
ПГУ	61,83	45,76	-	2,935
ПГУ с топливными элементами и замещенной камерой сгорания	94,2	65,4	32,4	5,25
ПГУ с топливными элементами и дожиганием в камере сгорания	82,48	58,9	18,7	2,6
ПГУ с топливными элементами и замещенной схемой ГТУ	105,1	79,8	43,3	18,7

Добыча водорода в данной работе предлагается путем применения метода паровой конверсии. Исходя из расчетов, представленных в таблице 2, можно сделать вывод, что наименее финансовозатратной является технология паровой конверсии метана.

С учетом стоимости выработки водорода и финансовых издержек на обслуживание именно ТЭ наиболее рентабельной является схема ПГУ с ТЭ и замещенной камерой сгорания (таблица 3).

Оценка себестоимости производства водорода

Название параметра	Паровая конверсия	
Энергетический и материальный балансы		
Исходное вещество	метан	пропан
Суммарная реакция	$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$	$C_3H_8 + 6H_2O \rightarrow 3CO_2 + 10H_2$
Масса углеводорода для получения 1 кг водорода + сжигаемого для поддержания температуры с учетом доли извлечения чистого водорода из получаемой водородосодержащей смеси газов, кг	3,56	4
Масса воды для получения 1 кг водорода, кг	5,1	6,9
Суммарные затраты электроэнергии на производство 1 кг водорода и сжатия его до 40 МПа, кВт*ч	6	
Операционные затраты при эксплуатации ТЭ		
Материальная и энергетическая составляющие затрат на производство 1 кг водорода, руб/кг	48,2	1224,28
Капитальные и операционные затраты на ТЭ		
Оценочная стоимость установки получения водорода производительностью 10 кг/ч, млн.руб.	80	85
Оценочная стоимость батарей с максимальным расходом 150 кг/ч, тыс.руб.	90 000	
Удельные амортизационные отчисления и налог на имущество, руб/кг _{водорода}	178,5	183,8
Себестоимость отпускаемого водорода без НДС/с НДС	290/348	371/445

Оценка себестоимости внедрения топливных элементов на станции

Наименование параметра	ПГУ с ТЭ и замещенной КС	ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС	ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ
Стоимость установки с водородными топливными элементами без учета транспортировки, млрд. руб.	4,131	2,360	12,98
Оценочная стоимость установки получения водорода производительностью 10 кг/ч, млрд.руб.	4,643	2,278	16,64
Затраты на эксплуатацию и ТОиР, млрд. руб/кг*год	15,04	7,379	53,93
Удельные амортизационные отчисления и налог на имущество, млрд. руб/кг*год	29,83	14,64	106,9
Стоимость природного газа, млрд.руб/год	5,298	2,599	18,99
Себестоимость отпускаемой электрической энергии, млрд.руб/год	250,9	180,4	252,8
Суммарная годовая прибыль, млрд.руб./год	192	151,2	43,36

С. Экологические аспекты

Рассматривая работу ТЭ с экологической точки зрения необходимо отметить, что сами топливные элементы не вырабатывают ничего вредящего атмосфере и окружающей среде.

Тем не менее, от их внедрения происходит увеличение углеродного следа. Это связано именно с применением паровой конверсии метана, то есть именно на этапах добычи водорода у нас происходят наибольшие выбросы парниковых газов.

Как видно из рис. 7, наибольший углеродный след виден при компоновке ПГУ с топливными элементами и замещенной схемой ГТУ, две другие же находятся примерно на том же уровне, что и при обычном сжигании топлива в КС.

Паровая конверсия рассматривается в связи с тем, что это наиболее изученный и освоенный процесс в промышленности, однако, сейчас активно развивается

автотермический риформинг метана, (паровая конверсия совместно с парциальным окислением) в том числе на установках с твердой мембраной. Также для снижения углеродного следа можно применять специальные фильтры, улавливающие диоксид углерода.

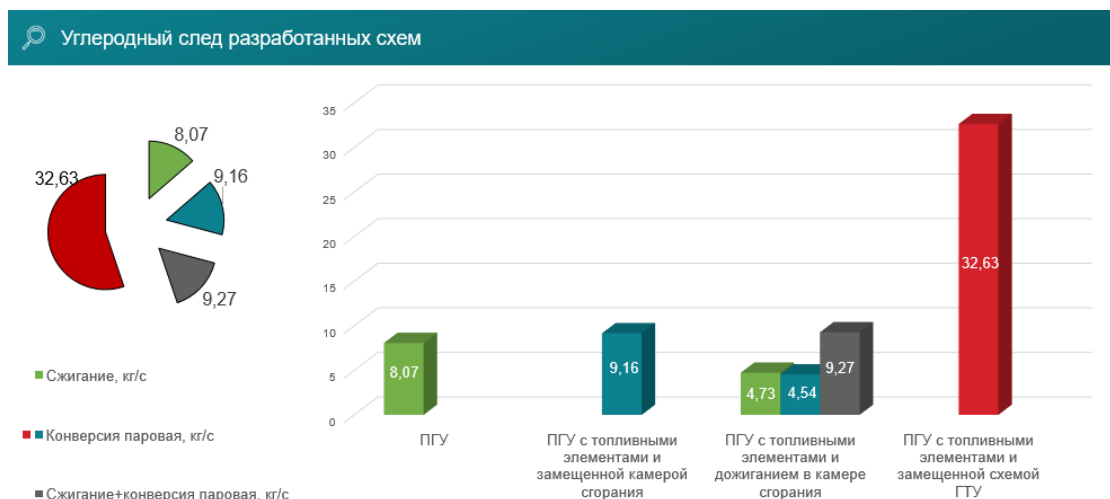


Рис. 7. Оценка углеродного следа от применения каждой из схем

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно рассчитанным данным можно сделать вывод, что наиболее эффективной является компоновка ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ, а наиболее рентабельной является схема ПГУ с ТЭ и замещенной КС.

Тем не менее, исходя из логических соображений, можно сделать вывод, что несмотря на свою энергетическую и экономическую эффективность наиболее применимой является схема ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС. При такой компоновке, как говорилось ранее, появляется возможность активного управления самим ТЭ, увеличивая или уменьшая его эффективность, при необходимости, или даже полностью выводить из строя либо ТЭ, либо КС. Также при такой компоновке достигается рентабельность, позволяющая в достаточно быстрые сроки окупить внедрение установки (не более 5 лет), а также производить амортизационный отчисления для дальнейшей модернизации всего оборудования.

Также, не смотря на небольшое увеличение углеродного следа, относительно классической схемы ПГУ, грамотно применяя имеющиеся технологии и правильно подобрав метод фильтрации можно достичь снижения углеродного следа в более чем 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Топливные элементы – перспективные химические источники электрической энергии // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. №2(38). С. 7-22.
2. Коровин Н.В. Топливные элементы и электро-химические энергоустановки. М: Издательство МЭИ, 2005. 278 с.
3. Радченко В.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике : учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 229 с.

Крылова И.А.

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ НАГРУЗКИ

Аннотация: Газотурбинные установки с открытым циклом находят широкое применение в энергетике, охватывая диапазон мощностей от нескольких сотен киловатт до нескольких сотен мегаватт. Газотурбинные установки с замкнутым циклом, использующие внешние источники тепла, рассматриваются как перспективные средства энергетического обеспечения, имея ряд преимуществ, такие как использование различных источников тепла, выбор рабочего тела с оптимальными теплофизическими свойствами и высокий коэффициент полезного действия. Однако, ряд недостатков, такие как сложность конструкции, большие габариты, ограничения температуры цикла, а также увеличение тепловой инерционности установки при наличии крупных теплообменных аппаратов, могут ограничивать их эффективность, особенно в контексте выработки электроэнергии. В статье приведен обзор мирового опыта применения вспомогательного двигателя в составе газотурбинных установок, а также предложена концептуальная модель такого вспомогательного двигателя в составе газотурбинной установки с замкнутым циклом.

Ключевые слова: газотурбинная установка, замкнутый цикл, преобразователь частоты, вспомогательный двигатель, накопитель энергии.

I. ВВЕДЕНИЕ

Согласно распоряжению Правительства РФ от 9 июня 2020 года № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» в комплекс ключевых мер, обеспечивающих решение задачи повышения эффективности электросетевого комплекса входит модернизация неэффективной дизельной (мазутной, угольной) генерации на изолированных и труднодоступных территориях.

В перечень технологического оборудования, востребованного организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, создание или локализация производства которого необходимы на территории Российской Федерации до 2035 года входит оборудование и технологии автономных

энергогенераторных установок на основе газообразного и водородного топлива и других источников автономного энергообеспечения, предназначенных для постоянной генерации [1].

Наибольшее применение в энергетике нашли газотурбинные установки (ГТУ) с открытым (разомкнутым) циклом. Номенклатура выпускаемых наземных энергоустановок на базе таких ГТУ (ГТЭС) Российской и зарубежной промышленности включает установки от нескольких сотен киловатт до нескольких сотен мегаватт.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Газотурбинные установки, работающие по замкнутому циклу (ЗГТД), использующие внешние источники тепла для нагрева рабочего тела, рассматриваются в качестве перспективных средств энергетического обеспечения и обладают следующими достоинствами [2]:

- возможность использования различных источников теплоты;
- возможность выбора и использования в качестве рабочего тела ГТ газообразных веществ, обладающих наилучшими теплофизическими свойствами;
- достаточно высокий КПД (от 0,20 для мощности менее 100 кВт до 0,50 при мощностях в десятки мегаватт).

Недостатки ЗГТД [3]:

- относительная конструкционная сложность узлов;
- большие габариты теплообменных аппаратов, подогревателя;
- ограничение температуры цикла условиями работы металла теплообменника.

Присутствие в составе ГТУ на базе ЗГТД крупных теплообменных аппаратов увеличивает тепловую инерционность установки, ухудшая быстродействие в тракте управления частоты вращения. Настройка контура регулирования частоты вращения, базирующаяся на принципах изменения тепловых характеристик замкнутого контура, становится недостаточно эффективной. Применительно к выработке электроэнергии, данная особенность является сдерживающим фактором [4].

А. Мировой опыт. СПГ

Проблема недостатка мощности на валу может быть решена за счет синергии электрической машины и газовой турбины, что было успешно реализовано на рынке СПГ 30 лет назад [5].

Функции, выполняемые таким двигателем: режим генератора, вспомогательный режим («помощник»), полностью электрический режим (электрический привод компрессора), режим запуска турбины.

В контексте управления частотой вращения ЗГТД интересным является вспомогательный режим работы – электрическая машина включена для преобразования электроэнергии в механическую энергию для увеличения мощности газовой турбины (при снижении выходной мощности летом) при полной нагрузке, когда ее недостаточно для компрессора.

В. Мировой опыт. Выработка электроэнергии

Применительно к системам выработки электроэнергии отклонение частоты вращения компенсируется за счет применения следующих технических решений:

- применение в составе ГТЭС преобразователя частоты для энергообеспечения электрических нагрузок, частота и амплитуда напряжения на выходе которого не зависит от частоты вращения вала [6];

- применение в составе ГТЭС устройства накопления электрической энергии для обеспечения мощностью, необходимой для успешного преодоления переходного процесса (в сочетании с инвертором) [7];

- избыточная мощность рассеивается на балластных сопротивлениях, либо служит для дополнительного заряда источника электрической энергии [8], [9];

- прогнозирование изменения электрической нагрузки на выходе генератора, в том числе на основе модели турбины [10], [11].

С. Мировой опыт. Авиация

Основные производители авиационных двигателей в настоящее время уделяют повышенное внимание созданию гибридных силовых установок (ГСУ), в составе которых комбинируется газотурбинный двигатель (ГТД) и электрический двигатель.

Технические решения включают электрическую машину (интегрированную в ГТД), преобразователь частоты, накопитель электрической энергии. Применение такого двигателя, помимо стандартных функций электростартера и генератора, имеет ряд преимуществ:

- электрический двигатель позволяет избежать колебания частоты вращения вала ГТД путем добавления (отвода) механической энергии вращения на (от вала) [12];

- ограничение температуры газов на выходе из турбины путем коррекции

крутящего момента (электродвигатель позволяет избежать ухудшения характеристик тяги для поддержания достаточного температурного запаса) [13];

- коррекция крутящего момента может осуществляться при достижении предельных значений заданного значения топлива (дополнительный электрический крутящий момент позволяет обеспечить запас регулирования для контура регулирования расхода топлива) [13];

- обеспечение дополнительной мощности для поддержания двигателя на заданных оборотах холостого хода при одновременном снижении расхода топлива [14];

- защита газотурбинного двигателя от внезапной потери нагрузки или перегрузки вала двигателя [15].

Стоит отметить, что тенденция к гибридным силовым установкам является относительно недавним явлением. Использование электрической машины в составе ГСУ в качестве «помощника» является перспективным с точки зрения повышения КПД и решения ряда проблем работы ГТД в составе летательного аппарата.

D. Мировой опыт. ЗГТД

Мероприятия по улучшению динамики частоты вращения ЗГТД сводятся к применению следующих технических решений:

- технологическая схема ЗГТД содержит накопители тепловой энергии [16];

- рассеивание избыточного тепла происходит на дополнительном охлаждающем теплообменнике [17];

- комбинированное управление с использованием изменения тепловых характеристик замкнутого контура в сочетании с электрическими аккумуляторами и преобразователями частоты для энергообеспечения электрических нагрузок [18];

- избыточная мощность рассеивается на балластных сопротивлениях [19];

- балластная нагрузка может быть встроена внутрь замкнутого газового контура [20].

E. Концептуальная модель ГТЭС на базе ЗГТД

На рис. 1 представлена концептуальная модель ГТЭС на базе ЗГТД, предназначенная для работы изолированно от внешней сети. Структура ЗГТД принята согласно [21]. Далее структура ЗГТД отдельно не рассматривается. Высокооборотный вал ЗГТД соединен с низкооборотным валом синхронного генератора G1 с помощью

редуктора Р. Выход генератора G1 соединен с распределительным устройством низкого напряжения (РУНН) 220/380VAC через вводной генераторный выключатель QFG. Далее система управления генератором G1 также отдельно не рассматривается.

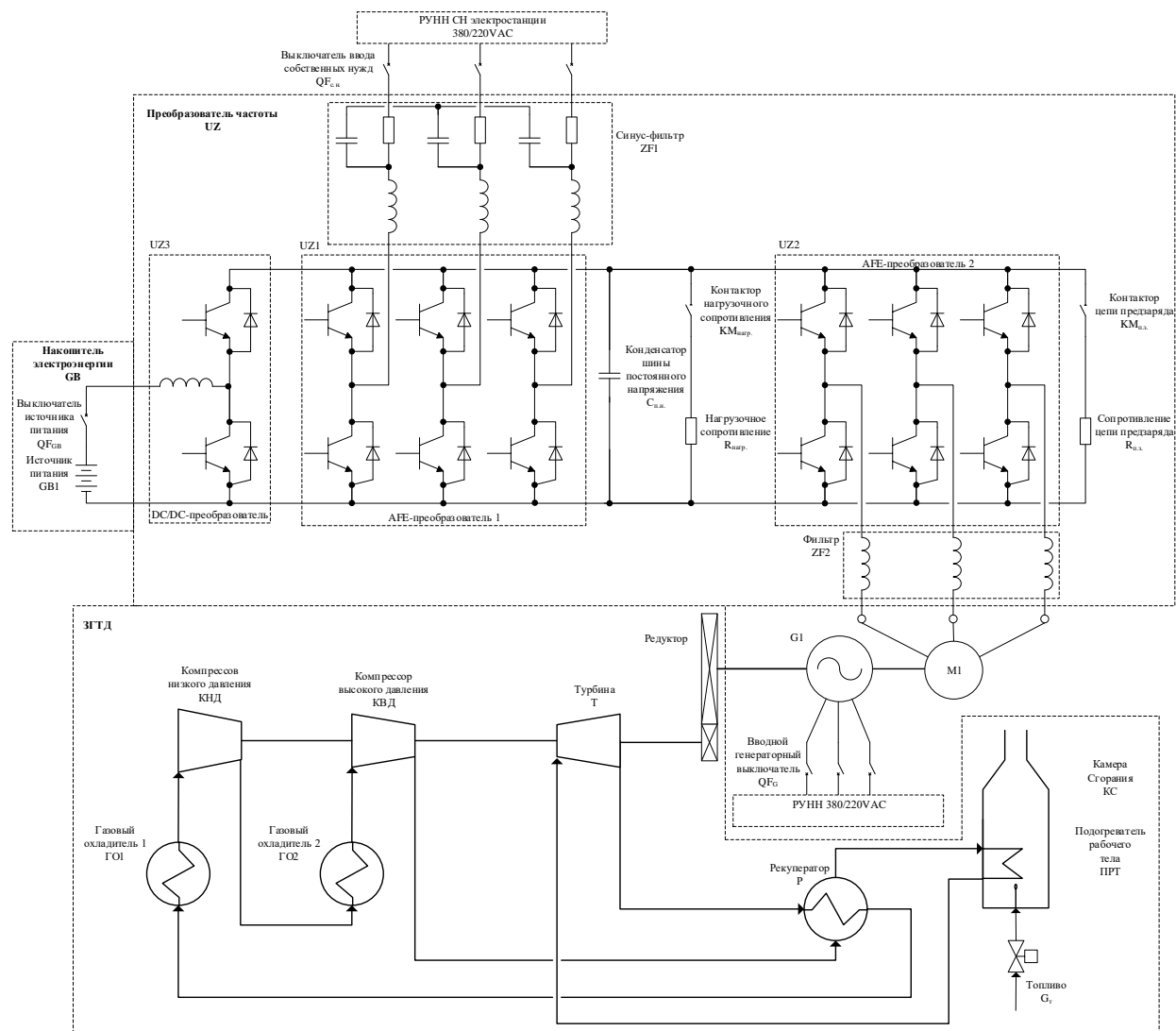


Рис. 1. Концептуальная модель ГТЭС на базе ЗГТД

На одном низкооборотном валу с генератором G1 расположен электрический двигатель M1 (синхронный двигатель с постоянными магнитами), работающий в режимах:

- электростартера – синхронный двигатель M1 предназначен для работы в пусковом режиме ЗГТД;
- генератора – синхронный двигатель M1 предназначен для работы в качестве синхронного генератора для электрообеспечения распределительного устройства низкого напряжения собственных нужд (РУНН СН) электростанции 220/380VAC в

нормальном режиме ЗГТД;

- вспомогательном – синхронный двигатель М1 позволяет избежать колебания частоты вращения вала ЗГТД путем добавления (отвода) механической энергии вращения на (от вала) в переходных режимах при набросе (сбросе) электрической нагрузки 220/380VAC на РУНН.

Преобразователь частоты UZ состоит из двух AFE-преобразователей UZ1 и UZ2, DC/DC-преобразователя UZ3, конденсатора шины постоянного напряжения $C_{п.н.}$, цепи нагрузочного сопротивления ($R_{нагр.}$, контактор $KM_{нагр.}$), цепи предварительной зарядки конденсаторов ($R_{п.з.}$, контактор $KM_{п.з.}$). Преобразователь частоты UZ соединен с РУНН СН электростанции 220/380VAC через выключатель ввода собственных нужд $QF_{с.н.}$. На выходе преобразователя частоты располагается фильтр высших гармоник ZF1 для РУНН СН электростанции, а также фильтр мотора-генератора ZF2/.

Шины постоянного напряжения преобразователя частоты UZ соединены через DC/DC-преобразователь UZ3 с накопителем электроэнергии GB, который состоит из источника питания GB1 (элементы питания могут быть представлены в том числе суперконденсатором) и выключателя источника питания QF_{GB} .

Преобразователь частоты UZ предназначен для двунаправленного преобразования электрической энергии:

- в нормальном режиме работы ЗГТД – от генератора М1 к РУНН СН 220/380VAC электростанции, происходит также дозарядка накопителя электроэнергии GB (при необходимости);

- в пусковом режиме или в режиме наброса электрической нагрузки на РУНН при недопустимом снижении частоты вращения ЗГТД – от накопителя электроэнергии GB к синхронному двигателю М1, РУНН СН 220/380VAC электростанции получает электропитание также от накопителя электроэнергии GB;

- в режиме сброса электрической нагрузки на РУНН при недопустимом завышении частоты вращения ЗГТД – от синхронного двигателя М1 к накопителю электроэнергии GB, РУНН СН 220/380VAC электростанции получает электропитание также от накопителя электроэнергии GB, происходит также дозарядка накопителя электроэнергии GB (при необходимости); в случае перенапряжений на шине постоянного напряжения включается цепь нагрузочного сопротивления.

Ф. Достоинства, недостатки предложенной концептуальной модели

Отличительное преимущество представленной концептуальной модели заключается в минимизации мощности (и как следствие – стоимости и габаритов) преобразователя частоты и источника электрической энергии в составе ГТЭС, которые выбираются не исходя из потребной мощности нагрузки на ЗГТД (которая может исчисляться в мегаваттах), а исходя из потребной мощности на собственные нужды энергоустановки (или на запуск ЗГТД).

Недостатком является необходимость уточнения (возможного увеличения) минимально необходимой мощности вспомогательного двигателя, преобразователя частоты, накопителя электрической энергии в составе ЗГТД для успешного преодоления переходного процесса по частоте вращения (с регламентируемыми показателями качества переходного процесса по [4]) при изменениях электрической нагрузки. Это достигается путем математического моделирования системы, представленной на рис. 1 [22].

Г. Выводы

В настоящей статье была предложена концептуальная модель автономной ГТЭС на базе ЗГТД, где вспомогательный двигатель выступает в качестве не только электрического стартера или генератора, но и в качестве «помощника» для преодоления отклонений по частоте вращения при изменениях электрической нагрузки на выходе ЗГТД.

Следует также отметить, что для корректной работы такой установки необходимо обеспечивать комбинированное управление, при котором сочетаются изменение тепловых характеристик замкнутого контура, а также корректировка крутящего момента путем добавления (отвода) механической энергии вращения на (от вала) с помощью вспомогательного двигателя, источника электрической энергии и преобразователя частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 04.12.2023).
2. Арбеков, Александр Николаевич. Выбор параметров и эффективных тепловых схем газотурбинных установок замкнутого цикла для наземного и космического применения : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.04.12 /

Арбеков Александр Николаевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2019. - 31 с.

3. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов/ [А. Н. Арбеков и др.]; под общ. ред. А. Ю. Вараксина. 4-е изд., испр. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 678, [2] с. : ил.

4. ГОСТ 33115-2014. Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 72-П от 14.11.2014 : введен впервые : дата введения 01.06.2016 / разработ. Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ) и Автономной некоммерческой организацией "Центр по сертификации электроагрегатов и передвижных электростанций" ("ЦС ЭА и ПЭС"). – Офиц. изд. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 25 с.

5. Santini M. et al., "Hybrid gas turbine (GT) mech drive from BHGE". Presented at the 9th International Gas Turbine Conference, Brussels, Belgium, 2018.

6. Suresh C. Gupta, Douglas R. Burnham, J. Michael Teets, Jon W. Teets, inventors; Capstone Green Energy Corp, assignee. Method and apparatus for compensating output voltage fluctuations of turbine/alternator on common shaft. U.S. patent US6909199 B2. Jun. 21, 2005.

7. Claude Khalizadeh, Wacknov Joel, inventors; Capstone Green Energy Corp, assignee. Transient ride-through or load leveling power distribution system. U.S. patent US20030015873 A1. Sep. 7, 2004.

8. Simon Wall, Brian Dickey, Guillermo Pont, inventors; Capstone Green Energy Corp, assignee. Turbogenerator with electrical brake. U.S. patent US20020190695 A1. Aug. 31, 2004.

9. Mark Gilbreth, Joel Wacknov, Simon Wall, inventors; Capstone Green Energy Corp, assignee. Power controller. U.S. patent US6487096 B1. Nov. 26, 2002.

10. Scott Douglas Waun, Michael Thomas Gansler, Mary Kathryn Thompson, Joshua Tyler Mook, Michael Robert Notarnicola, Aigbedion Akwara, Kevin Michael VandeVoorde, inventors; Hyliion Holdings Corp, assignee. System for anticipating load changes. U.S. patent US20200389106 A1. Apr. 5, 2022.

11. Sunil Unnikrishnan, Karl Dean Minto. Omprakash Pobbati, inventors; General Electric Co, assignee. System and method for model based turbine shaft power predictor. U.S. patent US10033316 B2. Jul. 24, 2018.

12. Robert Jon McQuiston, Cameron Roy Nott, Stefan Joseph Cafaro, inventors; General Electric Co, assignee. Hybrid electric engine speed regulation. U.S. patent US11725594 B2. Aug. 15, 2023.

13. Cedrik Djelassi, inventors; Safran Aircraft Engines SAS, assignee. Method for controlling a turbine engine comprising an electric motor. France patent FR3116865 B1. Jul. 14, 2023.

14. Патент 2725296 С1. Российская Федерация. Способ снижения расхода топлива газотурбинного двигателя (ГТД), снабженного стартером. Буряшкин С.Л., Букин В.А., Соколов А.А.; патентообладатель — ООО НПО "ШТОРМ"; заявка № 2019138797 от 30.11.2019 г. // Бюллетень № 19, опубликовано 30.06.2020 г.
15. Neil Terwilliger, Gary Collopy, inventors; RTX Corp, assignee. Hybrid gas turbine engine starting control. U.S. patent US20210025339 A1. Jan. 10, 2023.
16. Daniel Reznik, Henrik Stiesdal, inventors; Siemens Gamesa Renewable Energy AS, assignee. Installation for storing thermal energy. U.S. patent US9829254 B2. Nov. 28, 2017.
17. Philippe Larochelle, Raj Apte, inventors; Malta Inc, assignee. Storage of excess heat in cold side of heat engine. U.S. patent US10233787 B2. Mar. 19, 2019.
18. Roberto Bini, Mario Gaia, inventors; Turboden S.p.A., assignee. Speed regulation system of a turbine and relevant control method. WIPO patent application WO 2023002305 A1. Jul. 13, 2022.
19. Fischer R. L. E. et al. Static parasitic speed controller for Brayton-cycle turboalternator // NASA / NASA-TN-D-4176, 1967.
20. Патент 2748874 С1. Российская Федерация. Ядерная энергетическая установка. Готовцев К.В., Каревский А.В., Кошляков В.В., Ошев Ю.А.; патентообладатель — АО «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»; заявка № 2020130807 от 18.09.2020 г. // Бюллетень № 16, опубликовано 01.06.2021 г.
21. Патент 2629515 С1. Российская Федерация. Система для утилизации тепла замкнутого типа (варианты). Снитко А.А., Корнилков Н.А., Садреев И.М., Чупраков А.Г.; Скорик М.С., заявка № 2016122998 от 09.06.2016 г. // Бюллетень № 25, опубликовано 29.08.2017 г.
22. Крылова И.А., Кавалеров Б.В. Исследование способов управления стартер-генератором для стабилизации частоты вращения газотурбинной установки // Электротехнические комплексы и системы: материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции (Уфа, 15-16 дек. 2022 г.). — Уфа: УУНиТ, 2022. — С.353-364.

Судаков А.И., Зиятдинов И.Р.

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА УДАРНОГО ТОКА ИЗ ОПЫТА ВКЗ ДЛЯ СИНХРОННЫХ МАШИН СВЫШЕ 100 КВТ

Аннотация: Стендовые испытания являются важной составляющей в процессе производства синхронных машин. Программа приемочных и приемо-сдаточных испытаний в отечественных стандартах имеет важный опыт внезапного короткого замыкания. Основным методом получения параметров синхронных машин в отечественных и зарубежных стандартах является графоаналитический метод, который обладает недостатками. В статье описаны проблемы и актуальность ускоренной оценки ударного тока по результатам обработки осциллограмм с зашумлённым переходным процессом в опыте внезапного короткого замыкания синхронных машин более 100 кВт. Представлен подход к идентификации переходных процессов. Предложенный способ оценки ударных токов для синхронных турбомашин более 100 кВт полностью исключают трудоемкость идентификации параметров переходной составляющей симметричного тока статора для любых длительных переходных процессов в опытах внезапного короткого замыкания, благодаря ядру эффективной точечной выборки.

Ключевые слова: синхронные турбомашины, переходный процесс, ударный ток, внезапное короткое замыкание.

I. ВВЕДЕНИЕ

Быстроходные синхронные турбомашины в настоящее время востребованы многими отраслями промышленности развитых стран мира. Прежде всего, газовой, нефтяной, химической, металлургической, машиностроительной и многими другими отраслями в разных странах мира. С момента появления быстроходных турбодвигателей и турбогенераторов до настоящего времени актуальным является исследование и идентификация экспоненциально затухающих (или возрастающих) быстропротекающих синусоидальных переходных процессов (ПП), которые возникают при внезапных нарушениях электромагнитного состояния турбомашин. При этом, возникающие ПП достаточно хорошо описаны в отечественной и зарубежной литературе. Методы определения электромагнитных постоянных времени затухания (или возрастания) возникающих составляющих рассматриваемых процессов, а также параметров СМ широко представлены в отечественных и

зарубежных стандартах на их испытания в опытах внезапного короткого замыкания (ВКЗ), гашение поля (ГП), восстановление напряжения (ВН), ударное возбуждение (УВ) [1-2]. Следует подчеркнуть, что графоаналитические методы (ГАМ) при этом до настоящего времени слабо развиваются. Они устарели, не точны и настолько трудоёмки, что из-за разброса результатов исследования и идентификации составляющих ПП для быстропротекающих процессов не способны к вариационным и оптимизационным процедурам для точной и достоверной обработки данных процессов по результатам стендовых испытаний в указанных опытах. При этом возникает проблема, что из-за разброса результатов идентификации зашумлённых ПП классические методы математики не позволяют выйти на точные и достоверные результаты идентификации ПП СМ [3-4]. Выходом из тупиковой ситуации послужил поиск новых подходов на базе использования элементов и методов теории вероятности (ТВ) и математической статистики (МС) [5-7]. После разработки базового варианта ВСМ для исследования и идентификации быстропротекающих ПП СМ в указанных опытах (основы которых были заложены и разработаны ещё в 80-90 годах прошлого столетия на кафедре «Электротехники и электроники» Пермского политехнического института) [8] в процессе многочисленных последующих исследований указанных ПП мощных СМ вскрылась очередная проблема, связанная с повышенной трудоёмкостью исследования ПП даже с использованием ЭВМ [9-11]. С увеличением мощности СМ возрастает длительности ПП и соответственно трудоёмкость исследования и идентификации самой продолжительной переходной составляющей ПП, которая существует на протяжении всего процесса. Поскольку от точности идентификации переходной составляющей симметричного тока статора зависит точность идентификации сверхпереходной составляющей, поэтому с открытием ядра ЭТВ в области нижней границы исследуемого ПП с одной составляющей позволило эффективно решить и эту новую возникшую проблему. Использование современных технических средств записи рассматриваемых быстропротекающих процессов СМ, например, таких как ЦЗО с мощным математическим аппаратом регистрации быстропротекающих длительных процессов из-за огромных объёмов дискретизации длительных зашумлённых ПП с частотой сети питания (50 Гц) не удаётся достоверно выделить вершины для ЭТВ, отклоняющихся с минимальной относительной погрешностью от математического ожидания (МО) участка ПП с одной переходной

составляющей симметричного тока и установившимся значением тока статора. Данная статья посвящается модернизации базового варианта ВСМ с использованием ядра эффективной точечной выборки (ЭТВ) с результатами исследования по опытным данным стендовых испытаний в опыте ВКЗ на примере синхронного турбодвигателя мощностью 800кВт при напряжении испытания 4512 В, серии СТД-800-2, $U_n = 6$ кВ (рис.1), а на рис.2 представлена осциллограмма ПП из опыта ВКЗ с целью демонстрации полного исключения трудоёмкости исследований и идентификации зашумлённых быстропротекающих, синусоидальных, затухающих по экспоненциальному закону аналоговых ПП СМ по результатам их стендовых испытаний из опытов ВКЗ с высокой точностью и достоверностью.

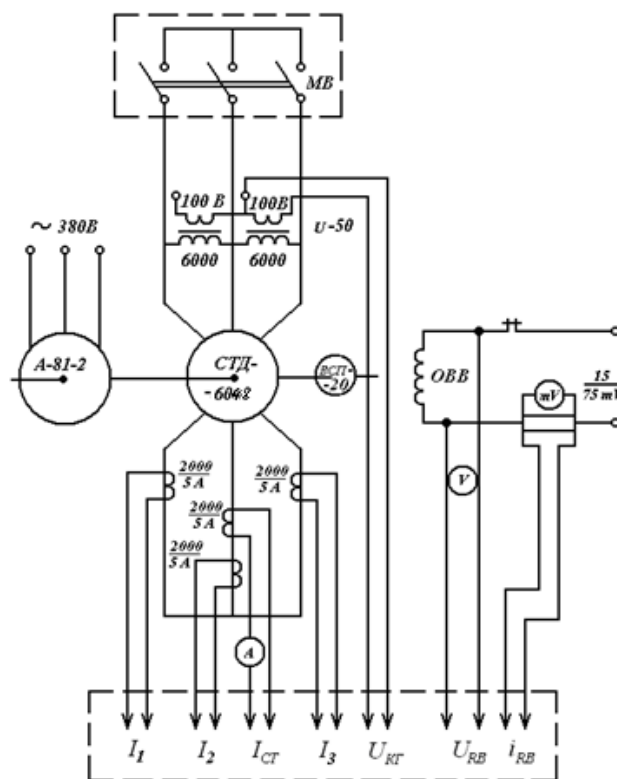


Рис. 1. Штатная силовая и измерительная схема для осциллографирования ПП в процессе стендовых испытаний СМ в опытах ВКЗ и ГП

Благодаря использованию обнаруженного ядра ЭТВ в области нижней границы исследуемого участка симметричного тока статора с одной переходной составляющей и установившимся значением тока якоря полученного математически по зашумлённым опытным вершинам удаётся с высокой вероятностью снизить трудоёмкость исследований с обеспечением достоверности ударного тока.

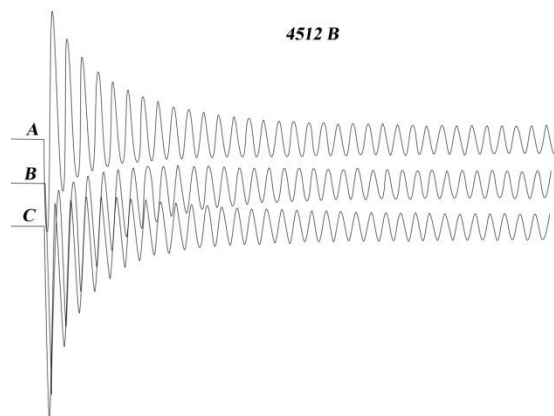


Рис. 2. Осциллограмма симметричного ВКЗ синхронного турбодвигателя серии СТД-800-2, $U_n = 6$ кВ, полученная в процессе стендовых испытаний по программе приёмочных испытаний при напряжении испытания 4512 В

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСКОРЕННОГО АДРЕСНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ УДАРНОГО ТОКА В ОПЫТАХ ВКЗ С УЧЁТОМ ЗАШУМЛЁННОСТИ ПП СМ БОЛЕЕ 100 КВТ

Аналитическое представление ударного тока, через равенство опытных измеренных вершин в дискретном виде к его математической записи с использованием электромагнитных ПВ с начальными значениями экспоненциально затухающих симметричного и асимметричного токов якоря, в теории ПП мощных СМ описывается известным уравнением [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned}
 i(\Delta T) = i_c(\Delta T) + i_{ac}(\Delta T) = & (I'_{0\text{эф}} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{\tau'_{\text{эф}}}} + \\
 & + I''_{0\text{эф}} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{\tau''_{\text{эф}}}} + I_{\infty} + I_{ac\text{эф}} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{\tau_{ac\text{эф}}}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Первая сумма слагаемых (1) после первого равенства представляет собой сумму симметричного и асимметричного токов якоря СМ получаемая с использованием опытных данных по [2]. А после второго равенства, симметричный ток (содержащий переходную, сверхпереходную составляющие с установившимся током якоря) вместе с асимметричным рассчитываются с использованием параметров их идентификации предложенным ускоренным способом, который обеспечивает одинаковый результат с первой суммой для узла ΔT переходного процесса, но с учётом начального сдвига во

времени первой вершины на ΔT (изложенных по теории ПП от 0 до 0,01 секунд) [12]. Таким образом, переходный процесс после замыкания в опыте трёх фаз в фазе А сдвигается с учётом начального сдвига наибольшей положительной вершины на 0,006 с (далее до конца дискретизируется с учетом этого сдвига). Следующая вершина сдвигается на 0,016 с от начала ПП, последующая вершина сдвигается на 0,026 с и так далее сдвигаются остальные вершины до установившегося значения тока якоря, затухая по экспоненциальному закону.

Это является главнейшим отличительным признаком предложенной дискретизации аналогового ПП в опытах ВКЗ с 0,01 секунды (с учётом начального сдвига ПП) с обязательным использованием всех вершин ПП в узлах дискретизации, в отличие от действующих стандартов на испытания СМ более 100 кВт.

III. ПРЕДЛОЖЕННЫЙ СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СМ

Во-первых, следует отметить, что в основе предложенного подхода сохранена методология определения ударного тока, заложенная в обработку результатов испытаний традиционным ГАМ, так как он в сущности не противоречит теории переходных процессов СМ и, несмотря на свою громоздкость и неточность (присущую вообще графоаналитическим методам), лишь искусственно отражает переходный процесс, при этом установившееся значение (I_{∞}) берется не из осциллограммы ПП, а по затухающему симметричному току при разделении ПП на симметричные и ассиметричные токи статора аналитическим способом.

Во-вторых, необходимо отметить появление в наше время мощных персональных ЭВМ с достаточно основательным математическим обеспечением и новой элементной базы современной электроники, позволяющие одновременно весьма оперативно перерабатывать огромные объёмы любой информации, чего не было во времена разработки графоаналитических методов.

В-третьих, нельзя не учитывать существование различных случайных факторов, влияющих на протекание самих процессов в машине и на процесс обработки, которые практически даже при желании не могли быть учтены графоаналитическими методами из-за отсутствия их способности к варьированию и учёту случайных факторов. В результате ГАМ не обеспечивают определение точных параметров СМ (так как они из-

за воздействия случайных факторов являются изменяющимися в определённых диапазонах) и дают неточную копию идентифицированных переходных процессов.

А. Процедуры предложенного способа

Предложенный способ идентификации переходных процессов включает следующие процедуры [13]:

1. Представление переходного процесса в конкретном опыте дискретно заданной функцией.

2. Аналитический способ дискретного выделения огибающих вершин переходного процесса и разделение полного тока якоря на симметричную и асимметричную составляющие тока.

3. Обоснование границы для эффективной идентификации параметров переходных составляющих тока статора, т.к. при этом ПП перерождается в одну переходную составляющую симметричного тока статора.

4. Идентификация сверхпереходной составляющей и ассиметричной составляющей осуществляется с использованием по одной эффективной точечной выборки.

5. Предусмотрена оценка погрешности приближения модели идентифицированного симметричного тока к его опытным данным для принятия окончательного решения по результатам идентификации.

6. По результатам апробации предложенного адресного пофазного способа оценки ударных токов, которые являются векторами синусоидального затухающего ПП, позволяет выявлять их электромагнитное воздействие на конструктивную надежность лобовых частей конкретных фаз обмоток статора. Кроме всего результирующий ударный ток все фаз точнее получается геометрическим сложением в осях символическим методом, т.к. в объеме цилиндра обмотки статора сдвинуты в пространстве на 120° друг от друга. Поскольку в нашем способе первые вершины в узлах ΔT при одновременном замыкании всех фаз обмоток статора согласно теории ПП СМ более 100 кВт изменяются в диапазоне от 0 до 0,01 секунда, поэтому чаще всего в него попадают вершины фаз А и С. Первая вершина фазы В всегда отрицательная и если она отстает на минимальном времени от начала замыкания всех фаз на отрезке 0,01 секунда, то в такой ситуации положительная вершина фазы В может оказаться близко к вершинам фазы А и С, образуя скопление трех вершин на малых временных

отрезках друг от друга. В результате этого суммарный ударный ток может достигать больших величин и после первого электромагнитного удара со стороны суммарного тока периодически с частотой 0,02 секунды, он будет повторяться до установившегося переходного процесса. Понятно, что может произойти с конструктивными элементами крепления лобовых частей обмоток статора. При этом будет ясной, какие лобовые части конкретных фаз будут находиться в более тяжелых условиях или менее тяжелых от воздействия суммарного поля ударного тока.

7. Предварительные результаты исследования предложенным способом оценки ударного тока по результатам заводских стендовых испытаний синхронных турбомашин более 100 кВт в опытах ВКЗ вселяет надежду на оценку ударных токов с определением электромагнитных постоянных времени составляющих полного тока статора точечным инженерным способом с получением интервальных оценок для попадания в них конечных результатов.

В. Обсуждение результатов

Предложенный способ оценки ударных токов для синхронных турбомашин более 100 кВт полностью исключают трудоемкость идентификации параметров переходной составляющей симметричного тока статора для любых длительных ПП в опытах ВКЗ, благодаря ядру ЭТВ.

Появляется возможность определения параметров СМ из одного опыта вместе с ударным током, по сравнению со стандартами, которые предполагают проведение разных опытов. Это даст существенную экономию электроэнергии на предприятиях.

Исследование предложенного способа целесообразно продолжать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин.- 4-е изд., сокр. и перераб. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. — 408 с.
2. ГОСТ 10169-77 - Введ. 01.01.1978 - М., 1984. - 85 с. - Машины электрические трёхфазные синхронные. Методы испытаний.
3. Энергетика будущего.Международный проект И'1 ЭР/под ред. акад. Е. П. Велихова; Федер. Агенство по атомной энергии. - М.:УТС-Центр,2005.
4. Глебов И. А. Современное состояние и пути дальнейшего развития электромашиностроения // На рубеже веков: итоги и перспективы: тез. всерос. элскротехн. конгресса с междунар. участием. ВЗЛК-99. - Т.1. - 320 с.

5. Судаков А. И., Чабанов Е. А. Вероятностно-статистические методы исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин: учеб. пособие. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехи, ун-та, 2017.-295 с.
6. Судаков А. И., Чабанов Е. А. Новые подходы к исследованию и идентификации переходных процессов синхронных машин: монография. -Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехи, ун-та, 2018. - 277 с.
7. Судаков А.И., Чабанов Е. А. Надёжность электрических машин: учеб. пособие. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. - 332 с.
8. Судаков А. И. Экспресс-анализ результатов автоматизированных испытаний синхронных электрических машин: автореф. дис. ..канд. техн. наук. - Свердловск, 1991. - 20 с.
9. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616237 «Исследование и идентификация переходных процессов синхронных машин минимизацией среднеквадратичной погрешности приближения модели к опыту», зарегистрирована 08 июня 2016 г.
10. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616254 «Предварительная обработка исходных данных переходных процессов синхронных машин», зарегистрирована 08 июня 2016 г.
11. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616255 «Статистические исследования влияния опытных данных переходных процессов синхронных машин на случайный признак», зарегистрирована 08 июня 2016 г.
12. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. - Л., Энергия, 1974. - 840 с.
13. Судаков А.И., Каменских И.А. Идентификация переходной составляющей в зашумлённых переходных процессах синхронных машин //Электротехника.— 2018. — №11. — С. 36-41.

Гулиенко А.И.

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

ПОЯВЛЕНИЕ ЛОЖНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ПРИ ЧИСЛЕННОМ ИНТЕГРИРОВАНИИ УРАВНЕНИЙ САУ

Аннотация: На примере дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядка типовых звеньев в том числе и консервативного звена, устанавливается причина появления при численном интегрировании уравнений ложных результатов расчёта в виде расходящихся и колебательных переходных процессов. Для их исключения выводятся соотношения выбора шага интегрирования при использовании методов Эйлера.

Ключевые слова: численное интегрирование, шаг интегрирования, метод Эйлера.

I. ВВЕДЕНИЕ

Метод численного интегрирования дифференциальных уравнений часто используется для исследования динамических характеристик систем автоматического управления (САУ). Однако его эффективность во многом зависит от рационального решения вопросов по выбору алгоритма и шага интегрирования, обеспечению точности и устойчивости численного решения, снижению времени расчета.

Проблема устойчивости при численном интегрировании известна и обычно проявляется в виде расходящихся переходных процессов, возникающих из-за дополнительной связи коэффициентов уравнений с шагом интегрирования [1] – [3]. Для типовых звеньев САУ (апериодического и колебательного) определены условия обеспечения достоверности численного решения при использовании явного и полуявного методов Эйлера.

II. УРАВНЕНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА

Апериодическое звено САУ описывается дифференциальным уравнением 1-го порядка, которое имеет вид:

$$T \frac{dX(t)}{dt} + X(t) = U(t) \quad (1)$$

где: $X(t)$ – выходная величина, $U(t)$ – входная величина, T – постоянная времени, t – время.

Численное решение уравнения (1) - изменение параметра X во времени с шагом интегрирования h , проводится путём расчёта значения $X(t)$ на следующем шаге $X(t+h)$ как результат на текущем шаге плюс произведение шага h на величину производной $PX(t)$:

$$X(t+h) = X(t) + h PX(t)$$

Величина производной прямо определяется из уравнения (1) (метод Эйлера) или же она представляет собой «взвешенную» производную, вычисленную на нескольких промежуточных подшагах (метод Рунге-Кутты и др.), или вычисленную по значениям производных на других шагах интегрирования (метод Адамса) и др.

Для метода Эйлера производная вычисляется один раз на каждом шаге интегрирования, что обеспечивает снижение времени расчёта, а уравнение (1) имеет вид:

$$X(t+h) = X(t) + h [U(t) - X(t)] / T \quad (2)$$

Анализ свойств процесса численного интегрирования выполнен, как и в работе [1], с использованием частотных методов исследования САУ. Перейдём из временной области t в частотную w используя преобразование Лапласа ($s = jw$). На рис.1 приведена схема численного интегрирования уравнения (2), которое в операторной форме имеет вид:

$$(e^{hs} - 1 + h / T) X(s) = U(s) h / T \quad (3)$$

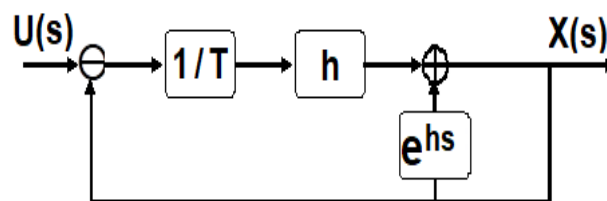


Рис.1. Схема процесса интегрирования методом Эйлера

Структурная схема численного интегрирования на рис.1, с точки зрения теории САУ, соответствует системе с контуром отрицательной и положительной обратной связи, в котором имеется запаздывающее звено e^{hs} с шагом интегрирования [4]. Наличие положительной обратной связи и коэффициента со знаком минус в

характеристическом уравнении системы (в (3) выражение $e^{hs} - 1 + h/T$) свидетельствуют о том, что система может быть неустойчивой.

Согласно критерию устойчивости Михайлова, условия на границе устойчивости САУ определяются путём подстановки $s = j\omega$ в характеристическое уравнение и приравнивания нулю его мнимой части и действительной [4]. Учитывая, что $e^{hs} = \cos h\omega + j \sin h\omega$, получим:

$$\begin{aligned} \sin h\omega &= 0 && \text{- мнимая часть,} \\ \cos h\omega - 1 + h / T &= 0 && \text{- действительная} \end{aligned}$$

Равенство нулю мнимой части обеспечивается при $h\omega = \pi$ ($\pi = 3.14\dots$), откуда период колебаний на границе устойчивости равен двум шагам интегрирования, а их частота (называемой шаговая) - обратной величине удвоенного шага - $f_{\text{шаг}} = 0.5 / h$. Подставляя $h\omega = \pi$ в выражение действительной части и учитывая, что $\cos \pi = -1$, условие для границы устойчивости численного интегрирования уравнения (1) имеет вид $T / h = 0.5$ или $T = 0.5 h$.

Анализ этого условия показывает, что устойчивость интегрирования зависит как от шага h , так и величины постоянной времени T . Для уравнения (1) с $T = 0.05$ сек на рис.2 приведены расчётные переходные процессы изменения $X(t)$ с шагом - 0.01, 0.017, 0.05, 0.1 сек (соответственно $T/h = 5, 3, 1, 0.5$) при возмущении $U(t) = 1$ скачком. С увеличением шага изменяется характер переходного процесса и он из апериодического ($h = 0.01$ и 0.017) сначала превращается в ложный ступенчатый ($h = 0.05$), а затем - в ложный колебательный ($h = 0.1$).

Аналитическое решение уравнения (1) - $X(t) = (1 - e^{-t/T})$ приведено процессом с $h=0$.

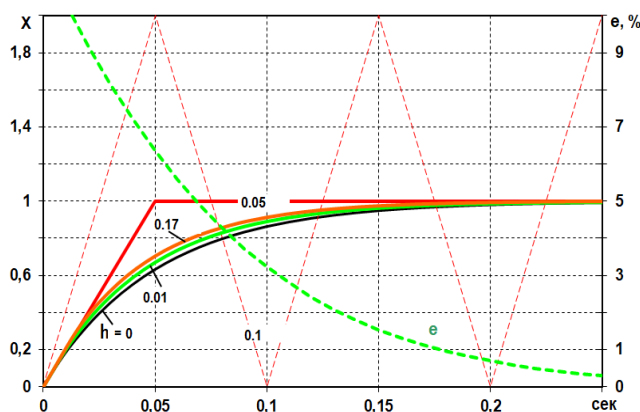


Рис.2. Вид переходных процессов при численном интегрировании уравнения 1-го порядка

На рис.2 показано пунктиром изменение величины погрешности «e» численного решения уравнения (1) при $T/h = 5$. Она рассчитана как разность точного значения ($h = 0$) и значения $X(t)$ при интегрировании. Интегральная оценка погрешности - отношение суммы значений в заданном интервале на их число, составляет 3.1% для $T/h = 5$ и 4.9% - $T/h = 3$.

Максимальная величина погрешности реализуется в начале переходного процесса и стремится к нулю с течением времени. Снижение её величины может быть достигнуто путём использования взвешенных данных для двух последовательных шагов - текущего и предыдущего «i-1». При этом величина взвешенной производной берётся равной сумме двух составляющих, первая из которых равна производной, рассчитанной на текущем шаге расчёта «i», умноженной на коэффициент взвешивания $K_{вз}$, а вторая - производной на предыдущем шаге, умноженной на $(1 - K_{вз})$:

$$(dX/dt)_i = K_{вз}(dX/dt)_i + (1 - K_{вз})(dX/dt)_{i-1}$$

Переходные процессы изменения $X(t)$ во времени для уравнения (1) с $T = 0.05$, $T/h = 5$ при $K_{вз} = 1.0, 0.9, 0.7$ приведены на рис. 3 (соответственно X_1, X_2 и X_3). Процессы X_2 и X_3 сначала протекают ниже точного решения X_0 , а затем выше его. Величина погрешности численного решения, рассчитанная как отклонение от точного решения, без взвешенной производной (процесс e1) имеет положительные значения, а с производной (e2, e3) – знакопеременное.

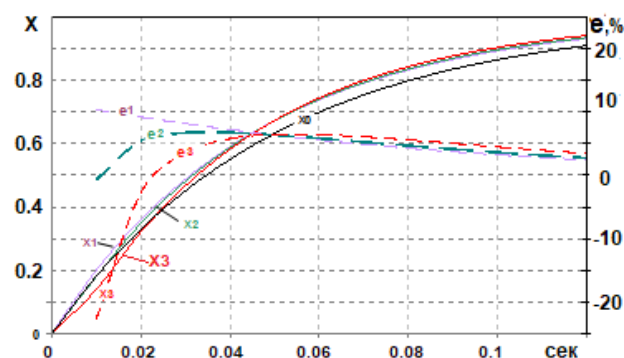


Рис.3. Переходные процессы при интегрировании модифицированным методом Эйлера
 X_0 – точное решение, X_1 – $K_{пр} = 1$, X_2 – 0.9, X_3 – 0.7

Интегральная оценка погрешности $e_{\text{сред}}$ - отношение суммы значений на заданном интервале на их число, показывает, что она снижается с уменьшением $K_{\text{вз}}$, но из-за наличия данных со знаком минус она не даёт объективной оценки. Более корректно использовать значения погрешности по модулю, при этом её минимальное интегральное значение реализуется при $K_{\text{вз}} = 0.9$ (табл. 1).

Таблица 1

Влияние коэффициента взвешивания производных на погрешность

$K_{\text{вз}}$	1.0	0.95	0.90	0.85	0.80	0.70	0.60	0.50
$e_{\text{сред}}$	3.10	2.86	2.63	2.39	2.15	1.67	1.18	0.68
$ e_{\text{сред}} $	3.10	2.86	2.68	2.87	3.05	3.63	4.34	5.06

Данные табл. 1 показывают, что при изменении коэффициента взвешивания $K_{\text{вз}}$ величина интегральной погрешности по модулю значений изменяется незначительно. При этом увеличивается объём вычислений и такое усложнение метода расчёта можно считать нецелесообразным. Следует заметить, что при интегрировании с $K_{\text{вз}} = 0.5$ реализуется модифицированный метод Эйлера 2-го порядка с большим значением погрешности – 5%.

Для понимания механизма неустойчивости численного решения порядок уравнения (3) снизим путём замены e^{hs} приближённым выражением: $e^{hs} \approx [1+hs/2+(hs)^2/12] / [1-hs/2+(hs)^2/12]$ (ряд Падэ 2-го порядка). В результате вместо уравнения исходного апериодического звена $(Ts + 1) X(s) = U(s)$ получим уравнение колебательного звена, для которого величина декремента колебаний зависит от шага интегрирования h и постоянной времени T :

$$[h^2/12 s^2 + (T - h/2) s + 1] = U(s)$$

Процесс численного интегрирования приводит к деградации свойств уравнения (1) и автоколебательный процесс, приведенный на рис. 2, реализуется при нарушении условия устойчивости.

Характер переходных процессов при интегрировании апериодического звена и данные табл. 1 об интегральной погрешности, позволяют считать, что если постоянная времени T более чем в 5 раз больше шага интегрирования, то погрешность численного решения на переходных режимах составляет около 3%, а установившихся – стремится

к нулю. Проверку величины постоянной времени для интегрирования следует проводить по следующему выражению:

$$T > 5h \quad (4)$$

III. УРАВНЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ЗВЕНА

Колебательное звено САУ описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$(T_2 \frac{d^2}{dt^2} + T_1 \frac{d}{dt} + 1) X(t) = U(t), \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) вводится переменная в виде скорости $V(t)$ выходной величины $X(t)$ и образуются два дифференциальных уравнения 1-го порядка для $V(t)$ и $X(t)$:

$$T_2 \frac{dV}{dt} + T_1 V(t) + X(t) = U(t); \quad \frac{dX}{dt} = V(t) \quad (6)$$

Интегрирование системы уравнений (6) может проводиться с использованием:

- метода Эйлера, когда сначала определяются значения производной для скорости $V(t)$ и для выходной величины $X(t)$, а затем – их новые значения $V(t+h)$ и $X(t+h)$;

- полуявного метода Эйлера, называемого также симплектическим методом Эйлера [5], когда сначала определяется производная для скорости $V(t)$, затем новое её значение $V(t+h)$, которое является производной для величины $X(t)$, а затем её значение $X(t+h)$.

При полуявном методе Эйлера в правую часть уравнения $X(t)$ поступает сигнал производной скорости $V(t)$, который, как известно, увеличивает запас устойчивости [4].

Интегрирование методом Эйлера. В операторной форме система уравнений (6) имеет вид:

$$[(T_2(e^{hs} - 1) + hT_1) (e^{hs} - 1) + h^2] X(s) = h^2 U(s),$$

выражение характеристического уравнения –

$$[T_2 (e^{hs} - 1) + h T_1] (e^{hs} - 1) + h^2 = 0, \quad (7)$$

а мнимой части и действительной:

$$[2T_2 (\cos hw - 1) + h T_1] \sin hw = 0,$$

$$h^2 - T_2 \sin^2 hw + (\cosh w - 1)[T_2 (\cosh w - 1) + h T_1] = 0$$

Из выражения мнимой части следует, что неустойчивость интегрирования может реализоваться:

- на шаговой частоте с периодом $2h$, определяемой из выражения $\sin hw = 0$,

- на другой, более низкой частоте, определяемой из выражения $[2T_2 (\cos hw - 1) + h T_1] = 0$.

Возможность таких колебаний показана на примере численного решения уравнения (5) с $T_2 = 0.000063$ ($f_c = 20$ Гц) при $T_1 = 0.05$ (рис. 4А) и $T_1 = 0.005$ (рис. 4В). При шаге $0.001, 0.002$ процесс устойчивый, а при $h = 0.0026$ с $T_1 = 0.05$ – расходящийся с шаговой частотой 192 Гц, а при $h = 0.005$ с $T_1 = 0.005$ – с колебаниями на собственной частоте 20 Гц.

Расходящиеся и автоколебательные процессы на рис. 4 являются ложными, т.к. они обусловлены не свойствами уравнения (5), а величиной шага интегрирования.

Взаимосвязь шага с T_2 и T_1 определяется из уравнения $h^2 - 2h T_1 + 4T_2 = 0$, получаемого при подстановке $hw = \pi$ в выражение действительной части уравнения (7). При $T_1 = 0$ нет положительного значения шага и численного решения уравнения (5).

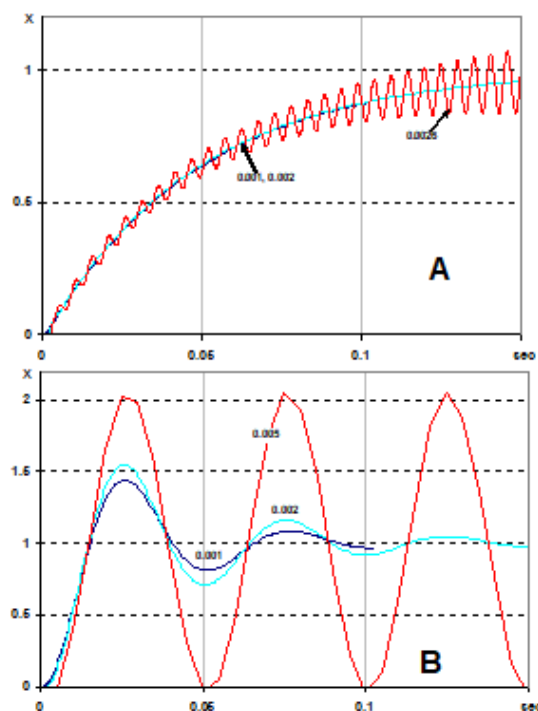


Рис. 4. Переходные процессы с «ложными» колебаниями на шаговой и на собственной частоте

Колебания с шаговой частотой, как правило, расходящиеся и их легко трактовать как ложные, а с другой частотой - распознаются путём проведения дополнительных расчётов, например, с более мелким шагом.

Интегрирование полуявным методом Эйлера.

Ложных колебаний нет при использовании полуявного метода Эйлера, рекомендуемого обычно для расчёта консервативных систем, в том числе и электромеханических [6]. На рис. 5 приведены сравнительные результаты расчёта переходных процессов с шагом 0.001 (сплошные линии) и 0.005 (пунктирные) уравнения (5) с $T_2 = 0.000063$ ($f_c = 20$ Гц): полуявным методом Эйлера (чёрный цвет) и явным (красный). Процессы рис.5А - $T_1 = 0.005$, а рис.5В - $T_1 = 0$ (консервативное звено).

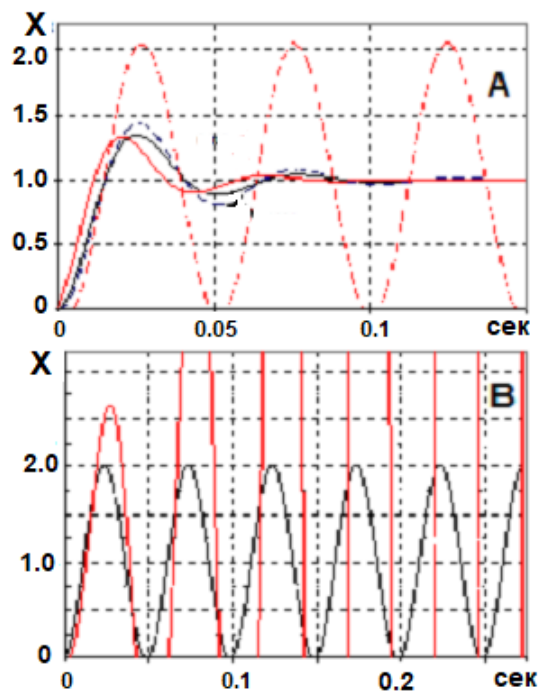


Рис. 5. Переходные процессы при интегрировании явным и полуявным методами Эйлера

Полуявный метод Эйлера при $h = 0.005$ привёл к исключению ложных колебаний (рис.5А) и расходящихся (рис.5В), т.е. он обеспечил достоверность проведения расчётов. Соответствующее полуявному методу Эйлера характеристического уравнения имеет вид:

$$[T_2 (e^{hs} - 1) + h T_1] (e^{hs} - 1) + h^2 e^{hs} = 0, \quad (8)$$

а выражения для мнимой части и действительной:

$$[2T_2 (\cos hw - 1) + h T_1 + h^2] \sin hw = 0$$

$$h^2 \cos hw - T_2 \sin^2 hw + (\cos hw - 1)[T_2 (\cos hw - 1) + h T_1] = 0$$

Из мнимой части следует, что частота шаговых колебаний определяется из уравнения $\sin hw = 0$, решение которого $hw = \pi$, а условия их реализации - из действительной после подстановки в него $hw = \pi$. В результате получаем квадратное уравнение $h^2 + 2hT_1 - 4T_2 = 0$, откуда:

$$h = [-T_1 + \sqrt{T_1^2 + 4T_2}] \text{ при } T_2 > 0 \quad (9)$$

Уравнение (9) отражает взаимосвязь шага интегрирования с коэффициентами T_2 и T_1 уравнения (5) для реализации шаговых колебаний. При $T_1 = 0$ имеется конечного значения шага и интегрирование возможно, что и демонстрирует процесс на рис. 5В справа. Колебания с другой частотой определяется из уравнения $[2T_2(\cos hw - 1) + h T_1 + h^2] = 0$ выражения мнимой части уравнения (8).

Из соотношения (4) для апериодического звена следует, что погрешность численного решения зависит от количества шагов на характерном динамическом параметре уравнения – постоянной времени. Для колебательного звена таким параметром является период колебаний для собственной частоты (5), который представим числом шагов m .

Целесообразное значение m определим из условия приемлемой погрешности описания синусоиды. В таблице 2 показаны синусоида (чёрный цвет) и её кусочно-линейный вид при $m = 5, 10, 20$ (соответственно цвет красный, фиолетовый и зелёный), а также погрешность расчёта ϵ , рассчитанная как максимальная разность приближённых и точных значений.

Погрешность численного решения уравнения колебательного звена 3 % достаточна для расчётов у границы устойчивости интегрирования и можно принять $m = 4\pi$. Тогда величина коэффициента T_2 уравнения (5) определяется из соотношения $T_2 = (0.5m h / \pi)^2$, откуда:

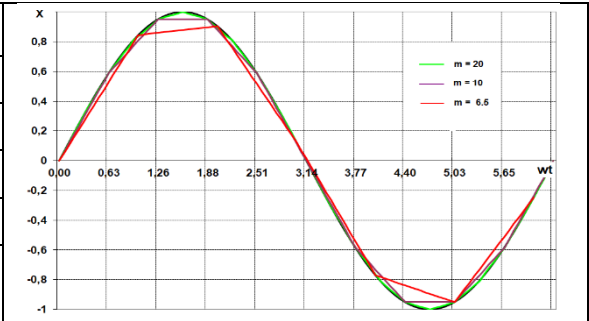
$$T_2 > 4 h^2 \quad (10)$$

Условие (10) применимо и для интегрирования (5) методом Эйлера, но при этом требуется дополнительная проверка выполнения условия (4) для коэффициента $T1$.

Таблица 2

Погрешность описания синусоиды
при разном количестве шагов на периоде колебаний

Число шагов m	Погрешность ε , %
20	1.2
13	3.14
10	4.89
6.5	12.3
5	19.2



На рис.6 приведены переходные процессы расчёта уравнения 2.1 с параметрами $T2=0.000063$, $T1=0.005$ с использованием полуявного метода Эйлера с шагом 0.001, 0.005 и 0.0116, для которых соответствуют следующие значения m – 50, 10 и 4.29.

При шаге 0.001 и 0.005 ($m = 50$ и 10) процессы отличаются незначительно - одинаковая величина заброса, незначительное опережение процесса с шагом 0.005 по отношению к 0.001. При $h = 0.0116$ ($m = 4.29$) условие устойчивости (9) ещё выполняется ($0.0116 < 0.0159$), но имеют место сходящиеся колебания с частотой 43 Гц, которая вдвое выше по отношению к собственной 20 Гц. Дальнейшее увеличение шага при $m = 2$ приводит к шаговым колебаниям.

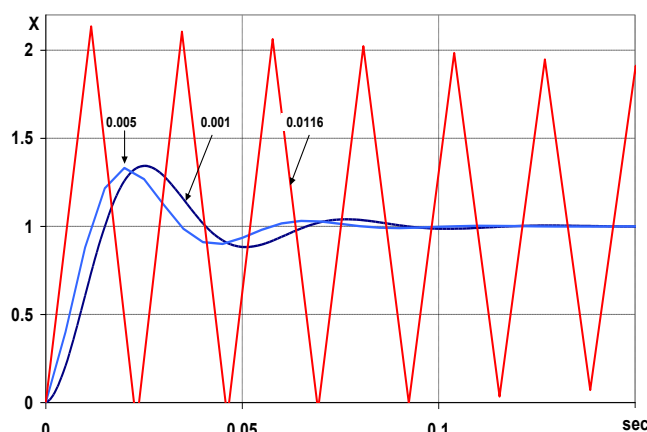


Рис.6. Влияние шага интегрирования на характер процессов при полуявном методе Эйлера

Для понимания причины возникновения неустойчивости численного решения уравнения (5) понизим порядок характеристического уравнения (8) путём замены e^{hs} рядом Падэ первого порядка $e^{hs} \approx (1 + hs/2) / (1 - hs/2)$. После замены получим:

$$(T2 - 0.5 T1 h - 0.25 h^2) s^2 + T1 s + 1 = 0$$

Анализ коэффициентов этого уравнения показывает, что имеет место влияние шага интегрирования на деградацию свойств колебательного звена в виде уменьшения величины коэффициента $T2$ членами $0.5T1h$ и $0.25h^2$.

Это приводит к увеличению собственной частоты колебаний и, следовательно, уменьшению декремента колебаний [4] и шаговым колебаниям.

IV. ВЫБОР ШАГА ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Выполнение условий устойчивости (4) и (10) для интегрирования дифференциальных уравнений апериодического и колебательного звеньев САУ можно реализовать путём:

- подбора величины шага интегрирования при постоянном значении коэффициентов уравнений, что приведёт к увеличению времени счёта,
- или же при заданном шаге изменить в допустимых пределах величину коэффициента(ов) уравнений до значения, требуемого для обеспечения устойчивости и приемлемой погрешности численного решения.

Последний способ получил название интегрирование с ограничением частотного спектра решения [1]. При этом в диапазоне от нуля до частоты, существенной для исследований, расчёт проводится с обеспечением приемлемого качества переходных процессов, а вне его - допускается искажение высокочастотных составляющих решения.

Для интегрирования с постоянным шагом:

- постоянная времени уравнения апериодического звена должна быть не менее 5-ти шагов интегрирования,
- коэффициент уравнения колебательного звена, характеризующий собственную частоту, не менее 4-х шагов интегрирования в квадрате, и должен использоваться полуявный метод Эйлера, когда сначала рассчитывается производная скорости выходной величины, затем величина скорости, далее производная выходной величины и её значение.

При выполнении этих условий обеспечивается интегрирование без ложных результатов с величиной погрешности в переходном процессе около 3%.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При расчёте динамических процессов в системах автоматического управления путём численного интегрирования системы дифференциальных уравнений возможна реализация ложных колебательных процессов с частотой шаговой или другой, более низкой. Причиной их появления являются возникающие при интегрировании уравнений дополнительные связи их коэффициентов с шагом интегрирования, которые способствуют реализации неустойчивости решения.

2. Приведены соотношения связи коэффициентов уравнений с шагом интегрирования, обеспечивающие достоверность численного решения при интегрировании уравнения апериодического звена методом Эйлера; а колебательного, в том числе и консервативного, - полуявным методом Эйлера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калнин В.М. Частотные методы в теории численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. ЦИАМ, 1975, 81 с. (Труды ЦИАМ; № 630)
2. Нэй А.В. Особенности моделирования регуляторов ГТД на цифровых вычислительных машинах // Авиационные двигатели, №1 (14), 2022, с. 43-53.
3. Гулиенко А.И. Численное решение систем нелинейных дифференциальных уравнений для САУ. В кн. «Научный вклад в создание авиационных двигателей». Кн.1, М.: Машиностроение, 2000, с.454-455
4. Основы автоматического регулирования. Теория. Под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машгиз, 1954, 1117 с.
5. Википедия. Полуявный метод Эйлера. [en.wikipedia.org/wiki / Semiimplicit_Euler_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Semiimplicit_Euler_method).
6. Niiranen, Jouko. Fast and accurate symmetric Euler algorithm for electromechanical simulations. Proceedings of the Electrimacs'99, Sept.14-16, 1999 Lisbon, Portugal, Vol.1,p.71-78.

Али Юсеф, Столяров Е.О., Лашкевич М.М.,

Подзорова В.С., Кулик Е.С., Анучин А.С.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

УПРАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ В ТРЕХФАЗНОМ СИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С РАСЩЕПЛЁННЫМИ ОБМОТКАМИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-19-00696).

Аннотация: Развитие самолетов с электрическими и гибридными электрическими трансмиссиями требует повышения надежности системы электропривода. Одним из перспективных решений является использование машин с расщеплёнными обмотками и многофазных двигателей, способных реализовывать заданный момент в случае частичных отказов. В данной статье рассматривается трехфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами и расщеплёнными обмотками, работающий при обрыве одной фазы. Применение управления с прогнозированием решает проблему оптимального регулирования тока, поскольку целевая функция может минимизировать омические потери, а также обеспечивать требуемый момент для винта. Представлена структура системы управления для случая отказа одной из фаз, и результаты моделирования показывают, что способ управления с прогнозированием может эффективно использоваться в таких применениях.

Ключевые слова: управление прогнозированием, отказоустойчивое управление, обрыв фазы, синхронный двигатель с постоянными магнитами, двигатель с расщеплёнными обмотками.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие самолетов с электрическими и гибридными электрическими трансмиссиями требует повышения надежности системы электропривода. Одним из перспективных решений является использование машин с расщеплёнными обмотками и многофазных двигателей, способных производить заданный момент в случае частичных отказов [1], [2]. В отличие от обычных трехфазных двигателей, соединенных звездой, они все равно могут создавать вращающийся поток статора, даже в случае отказа в одной из фаз.

В электрических машинах могут возникнуть различные типы неисправностей, такие как обрыв фазы, потеря управления силовым транзистором, межфазное короткое

замыкание и межвитковое короткое замыкание [3]. Последнее можно обнаружить анализируя гармонический состав тока и напряжения, и его можно только обнаружить, но не устранить [4]-[6]. От межфазного короткого замыкания обычно защищаются предохранителями. В противном случае может возникнуть возгорание в двигателе, поскольку те из них, что используются в пропульсивных системах, обычно представляют собой синхронные двигатели с постоянными магнитами поверхностного монтажа (СДПМПМ), имеющие чрезвычайно высокий ток короткого замыкания [7]. Таким образом, система управления может скомпенсировать только обрыв фазы и потерю управления, чтобы избежать полной остановки тягового привода.

Было проведено много исследований, рассматривающих многофазные двигатели и их свойства в случае частичных отказов. Методы управления многофазными машинами аналогичны методам управления обычными трехфазными машинами, но имеют некоторые модификации, учитывая появление тока нулевой последовательности и эффекты многофазной конфигурации обмоток [8], и позволяют реализовать систему векторного управления (СВУ) [9], прямое управление моментом (ПУМ) [10] или управление с прогнозированием (УП) [1], [11]. Обрыв фазы должен быть обнаружен быстро, чтобы избежать размыкания системы управления и потенциального срабатывания максимально-токовой защиты [12].

Управление двигателем при обрыве фазы может осуществляться с помощью обычной системы векторного управления, которая должна быть модифицирована для работы с меньшим числом фаз с учетом асимметричной конфигурации неисправного двигателя. Однако такой подход работает только в случае неисправности в одной фазе. Если случается обрыв ещё одной фазы, то количество комбинаций оставшихся в работе обмоток увеличивается, и не так легко разработать алгоритм управления для всех возможных комбинаций.

Алгоритм системы векторного управления для 7-фазного асинхронного двигателя был разработан в [13]. Решение представлено для отказа в любых двух фазах. Однако оно подразумевает использование синусоидальных токов, которые не являются оптимальными с точки зрения омических потерь для СДПМПМ, как было показано в [14]. Управление с прогнозированием обеспечивает большую гибкость в работе при двух и более неисправностях [15]-[17]. Тем самым было предложено использовать данный подход, так как он легко адаптируется к определенным неисправностям,

возникающим в электроприводе.

Управление с прогнозированием работает с определенным числом возможных для реализации состояний инвертора. Если произошел отказ в одной из фаз, то не все состояния инвертора возможно реализовать. Таким образом, рассматриваемое количество состояний уменьшается, при этом стратегия управления и целевая функция остаются прежними.

В данной статье представлено решение для трехфазного двигателя с расщеплёнными обмотками при обрыве фазы в одной фазе. Стратегия управления с прогнозирующей моделью была разработана и протестирована с использованием моделирования.

II. УПРАВЛЕНИЕ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ПРИ ОБРЫВЕ ОДНОЙ ФАЗЫ

A. Конфигурация рассматриваемого тягового электропривода

Электрические двигатели с расщеплёнными обмотками обладают дополнительной степенью свободы с точки зрения управления и надежности. Даже если одна из фаз оборвана, они все равно могут реализовывать требуемый момент путем регулирования тока в других фазах. Конечно, величина тока в них будет увеличена для реализации того же момента, но для самолета (мультикоптера) предпочтительнее поддерживать работу привода, пусть даже со сниженной мощностью. Конфигурация привода, рассматриваемая в данной работе, представлена на рис. 1.

Фаза *a* оборвана. Существует два типа обрыва фазы. Первый — это физическое разъединение фазы двигателя от тягового инвертора. Второй — это потеря управления одним силовым ключом в тяговом инверторе. В последнем случае невозможно создать отрицательную или положительную волну тока. Второй тип представляет собой частный случай первого, когда проводимость еще возможна для тока определённой полярности. Таким образом, в данной статье будет рассмотрен только первый случай.

B. Алгоритм управления в случае обрыва фазы

Алгоритм управления работает следующим образом. Токи фаз используются для вычисления токов в ортогональной неподвижной системе координат согласно уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} i_{\alpha}[k] &= -\frac{1}{3}i_b[k] - \frac{1}{3}i_c[k]; \\ i_{\beta}[k] &= \frac{1}{\sqrt{3}}i_b[k] - \frac{1}{\sqrt{3}}i_c[k]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Двигатели имеют постоянные магниты, установленные на поверхности. Поэтому у них практически идентичные индуктивности по продольной и поперечной осям. Тогда потокосцепления в неподвижной системе координат могут быть оценены как:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\alpha}[k] &= \psi_{PM} \cos \theta[k] + Li_{\alpha}[k]; \\ \psi_{\beta}[k] &= \psi_{PM} \sin \theta[k] + Li_{\beta}[k], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ψ_{PM} — потокосцепление от постоянных магнитов, θ — электрическое угловое положение ротора, а L — индуктивность статора.

Зная потокосцепления в ортогональной стационарной системе координат, эквивалентные значения в трехфазной системе координат abc можно выразить с учетом того, что фаза a отключена.

$$\left. \begin{aligned} \psi_b[k] &= -\psi_{\alpha}[k] + \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{\beta}[k]; \\ \psi_c[k] &= -\psi_{\alpha}[k] - \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{\beta}[k]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Каждый мост тягового инвертора может создавать три напряжения на своем выходе: $-V_{DC}$, 0 и $+V_{DC}$. Таким образом, общее количество возможных вариантов для прогноза составляет девять. Девять оценок потокосцеплений $\hat{\psi}_b$ и $\hat{\psi}_c$ могут быть получены с помощью:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\psi}_b[k+1] &= \psi_b[k] + (v_b[k+1] - Ri_b[k]) \cdot h; \\ \hat{\psi}_c[k+1] &= \psi_c[k] + (v_c[k+1] - Ri_c[k]) \cdot h, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где R — сопротивление обмотки статора, h — размер шага интегрирования.

Эти потокосцепления могут быть преобразованы в ортогональную неподвижную систему координат с помощью:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\psi}_{\alpha}[k+1] &= -\frac{1}{2}\hat{\psi}_b[k+1] - \frac{1}{2}\hat{\psi}_c[k+1]; \\ \hat{\psi}_{\beta}[k+1] &= \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{\psi}_b[k+1] - \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{\psi}_c[k+1]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Затем эти прогнозы потокосцеплений используются для выражения токов с использованием (2)

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_\alpha [k+1] &= \frac{\hat{\psi}_\alpha [k+1] - \psi_{PM} \cos \hat{\theta} [k+1]}{L}, \\ \hat{i}_\beta [k+1] &= \frac{\hat{\psi}_\beta [k+1] - \psi_{PM} \sin \hat{\theta} [k+1]}{L}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где прогнозирование электрического углового положения может быть сделано при известной электрической скорости ротора ω как

$$\hat{\theta} [k+1] = \theta [k+1] + \omega h. \quad (7)$$

Теперь прогноз момента представляет собой:

$$\hat{T} [k+1] = \hat{\psi}_\alpha [k+1] \hat{i}_\beta [k+1] - \hat{\psi}_\beta [k+1] \hat{i}_\alpha [k+1]. \quad (8)$$

Целевую функцию можно выбрать так, чтобы следовать заданному моменту с минимизацией омических потерь.

$$g = (T_{ref} - \hat{T} [k+1])^2 + 0.001 \cdot (\hat{i}_b^2 [k+1] + \hat{i}_c^2 [k+1]), \quad (9)$$

где токи фаз b и c вычисляются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_b [k+1] &= -\hat{i}_\alpha [k+1] + \frac{1}{\sqrt{3}} \hat{i}_\beta [k+1]; \\ \hat{i}_c [k+1] &= -\hat{i}_\alpha [k+1] - \frac{1}{\sqrt{3}} \hat{i}_\beta [k+1]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

A. Модель тягового привода

Модель привода была создана с использованием универсальной модели многофазной машины в MATLAB Simulink [18]. Инвертор выполнен на базе IGBT из библиотеки “Simscape/Electrical/Specialized Power Systems”. управление с прогнозирующей моделью реализовано с использованием блока MATLAB Function. Функциональная схема модели представлена на рис. 2.

Блок управления с прогнозированием рассчитывает девять прогнозов на каждом

шаге интегрирования и формирует управляющие сигналы для каждого силового ключа инвертора. Фаза *a* не управляется. Управление фазой *b* зависит от заданий напряжения для наилучшего значения целевой функции

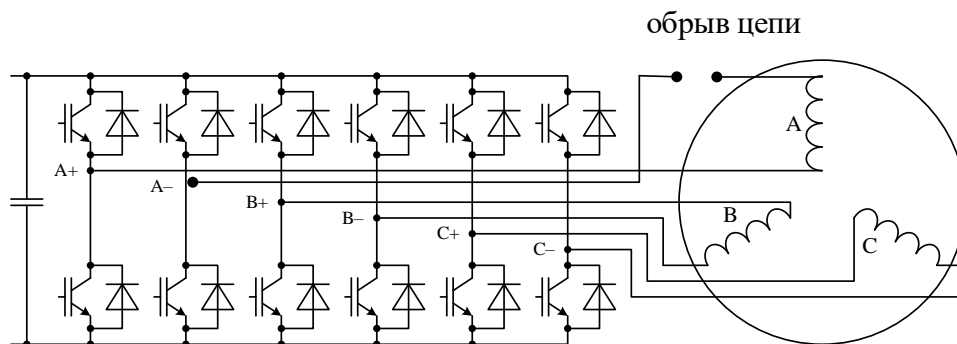


Рис. 1. Электропривод с двигателем с расщепленными обмотками

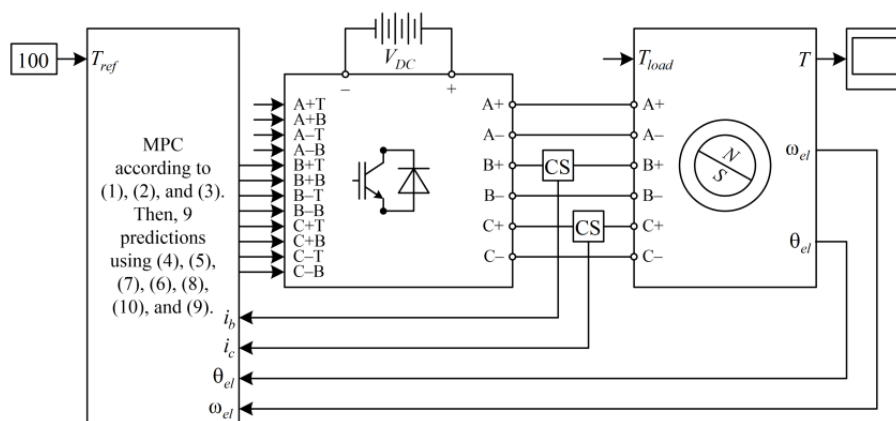


Рис. 2. Схема модели электропривода с модельным прогнозирующим управление и обрывом фазы

$$v_b = \begin{cases} -V_{DC} \Rightarrow \begin{cases} B+T=0 \\ B+B=1 \\ B-T=1 \\ B-B=0 \end{cases} \\ 0 \Rightarrow \begin{cases} B+T=0 \\ B+B=1 \\ B-T=0 \\ B-B=1 \end{cases} \\ V_{DC} \Rightarrow \begin{cases} B+T=1 \\ B+B=0 \\ B-T=0 \\ B-B=1 \end{cases} \end{cases}, \quad (11)$$

где буква “В” в первой позиции обозначает фазу *b*, “+” или “-” обозначает конец обмотки, а “Т” или “В” во второй позиции обозначает верхний или нижний силовой ключ. Аналогичное уравнение можно записать для фазы *c*.

Параметры модели представлены в таблице I. Предполагается, что двигатель вращается с постоянной скоростью при некотором заданном моменте. Поэтому, установлена некоторая начальная скорость, а инерцию принимаем бесконечной.

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Значение	Единица измерения
Напряжение звена постоянного тока	540	В
Потокоцепление постоянных магнитов	0,2126	Вб
Сопротивление статора	0,01	Ом
Индуктивность статор	0,75	мГн
Индуктивность статора нулевой последовательности	0,075	мГн
Инерция ротора	∞	кг·м ²
Начальная скорость	400	рад/с
Размер шага интегрирования / период расчёта управления с прогнозированием	10	мкс

В. Работа с заданным моментом

Токи привода с управлением с прогнозированием и обрывом в одной фазе показаны на рис. 3. Форма тока не является синусоидальной, поскольку она оптимизирована с целью минимизации омических потерь. Аналитическое решение для этой формы тока было представлено в [14]. Ток фазы *a* не является точно нулевым, потому что обрыв фазы моделируется потерей управления, а не физическим разъединением фазы двигателя от инвертора.

Момент регулируется с некоторой небольшой ошибкой из-за воздействия пенализации в функции суммы квадратов протекающих токов. Это воздействие можно учесть коррекцией целевой функции; однако в большинстве случаев задание момента определяется пропорционально-интегральным регулятором скорости. Таким образом, ошибка в контуре момента компенсируется в контуре скорости.

IV. ВЫВОДЫ

Отказоустойчивое управление является обязательным для системы тягового электропривода самолетов, а двигатели с расщеплёнными обмотками обеспечивают более высокую надежность по сравнению с обычными, соединенными в звезду. Управление таким двигателем в случае частичных отказов может быть реализовано с

помощью системы векторного управления, модифицированной для отказа в конкретной фазе двигателя. Однако для многофазных машин количество комбинаций исправных фаз увеличивается, а вместе с ним и количество реализуемых алгоритмов управления. Поэтому управление с прогнозированием предпочтительнее, поскольку оно просто исключает возможные команды управления, которые больше не поддерживаются из-за аппаратных неисправностей.

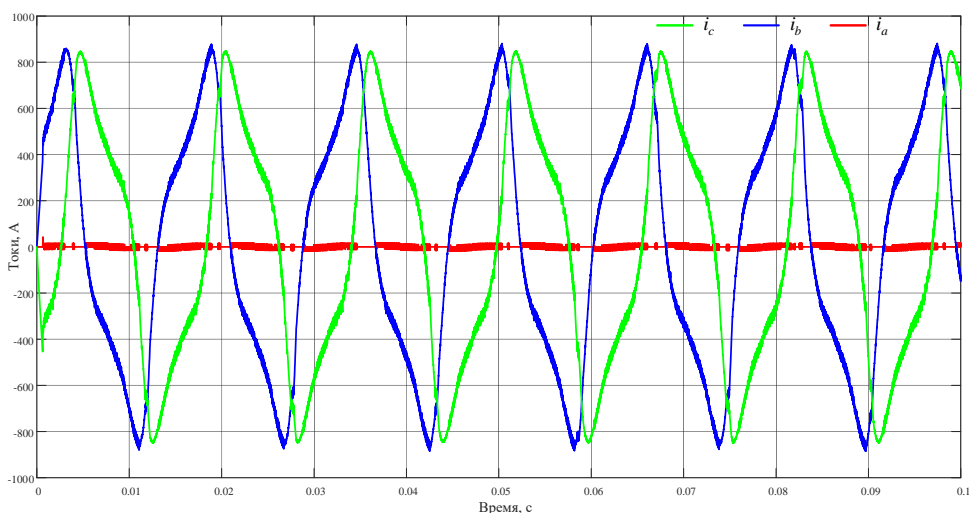


Рис. 3. Токи при работе с двумя исправными фаз

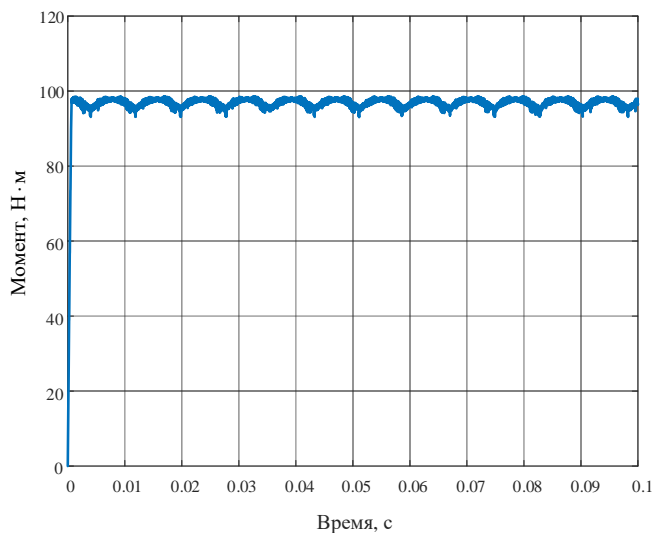


Рис. 4. Момент двигателя при двух исправных фазах.

Предложенная система управления с прогнозированием реализует регулирование тока с минимизацией омических потерь и небольшими пульсациями момента. Дальнейшие исследования будут посвящены анализу управления многофазным двигателем и реализации системы управления с прогнозированием с непрерывным управляющим воздействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Levi, "Multiphase electric machines for variable-speed applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, 2008.
2. J. Xu, B. Zhang, H. Fang, and H. Guo, "Guaranteeing the fault transient performance of aerospace multiphase permanent magnet motor system: An adaptive robust speed control approach," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 114–122, 2020.
3. Z. Yin, Y. Sui, L. Xing, P. Zheng, L. Cheng, and J. Liu, "Comparative investigations of inverter short-circuit fault and winding terminal short-circuit fault in open-end winding five-phase PM machine system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 7, pp. 1–5, 2021.
4. S. Tan, Y. Bai, X. Wang, and P. Liu, "The detection method of inter-turn short-circuit current of in-phase coil compensation axial permanent magnet synchronous fault-tolerant motor," in *2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE)*, 2022, pp. 41–46.
5. A. Kiselev, A. Kuznietsov, and R. Leidhold, "Model based online detection of inter-turn short circuit faults in PMSM drives under non-stationary conditions," in *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 2017, pp. 370–374.
6. F. L. T. Guefack, A. Kiselev, and A. Kuznietsov, "Improved detection of inter-turn short circuit faults in PMSM drives using principal component analysis," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2018, pp. 154–159.
7. A. A. Abdallah, V. Devanneaux, J. Faucher, B. Dagues, and A. Randria, "Modelling of surface-mounted permanent magnet synchronous machines with stator faults," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, 2004, vol. 3, pp. 3031–3036.
8. A. Akay and P. Lefley, "Research on torque ripple under healthy and open-circuit fault-tolerant conditions in a PM multiphase machine," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 349–359, 2020.
9. A. Tarlajanu, "Development of vector control structures for traction systems with six-phase asynchronous motors," in *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 2021, pp. 129–134.
10. J. R. G. Schofield, "Direct torque control-DTC [of induction motors]," in *IEE Colloquium on Vector Control and Direct Torque Control of Induction Motors*, 1995, p. 1.
11. L. Jarzebowicz, "Impact of low switching-to-fundamental frequency ratio on predictive current control of PMSM: A simulation study," in *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, 2018, pp. 1–5.
12. A. Dianov and A. Anuchin, "Phase loss detection using current signals: A review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114727–114740, 2021.

13. D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri, "Theoretical and experimental analysis of fault-tolerant control strategies for seven-phase induction motor drives," in *SPEEDAM 2010*, 2010, pp. 1628–1633.
14. M. Lashkevich, Y. Ali, E. Stolyarov, K. Fedorova, E. Kulik and A. Anuchin, "Current Regulation in Multiphase Open-end Winding Machines under Open Circuit Fault," *2023 22st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-6
15. R. S. Arashloo, M. Salehifar, J. L. R. Martinez, and V. Sala, "Fault-tolerant model predictive control of five-phase permanent magnet motors," in *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 2857–2862.
16. W. Huang, W. Hua, and Q. Fan, "Performance analysis and comparison of two fault-tolerant model predictive control methods for five-phase PMSM drives," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 311–320, 2021.
17. H. Wang, X. Zheng, X. Yuan, and X. Wu, "Enhanced natural fault-tolerant model predictive current control in nine-phase motor drives under open-phase faults," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 37, no. 4, pp. 2449–2460, 2022.
18. E. Stolyarov, A. Anuchin, Y. Ali, M. Lashkevich, D. Aliamkin, and A. Zharkov, "Universal Model of a Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motor," in *2022 IEEE 1st Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON)*, 2022, pp. 1-5.

Насибуллин Д.Д., Мужайлов В.Н., Еременко В.В.,

Хамзин Ф.С., Охотников М.В., Подгузов А.А.

ФГБОУ ВО «УУНиТ» Передовая инженерная школа «Моторы будущего»

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация: В данной статье приведены примеры применения бандажных оболочек из композиционных материалов в электрических машинах, исследование прочностных характеристик бандажных колец на углеродной основе с использованием бисмалеимидного связующего. На основе экспериментальных данных проведен сравнительный анализ результатов с уже имеющимися зарубежными аналогами.

Ключевые слова: Бандажная оболочка; электрическая машина; предел прочности; диаграмма растяжения; диаграмма нагружения; композиционные материалы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Бандажные оболочки роторов высокооборотных электрических машин (далее ЭМ) с постоянными магнитами являются наиболее ответственными узлами, так как повреждение бандажа может привести к разрушению всей электрической машины без возможности восстановления. Трендом в изготовлении такого важного узла ЭМ является использование композиционных материалов. Прежде всего это связано с тем, что композитные материалы обладают высокими прочностными характеристиками по сравнению с различными сплавами при значительной меньшей массе изделия. Бандажи, выполненные из композитных материалов, имеют меньший коэффициент температурного расширения, что облегчает нагрузку на вал во время работы ЭМ. В то же время толщина бандажной оболочки должна быть как можно меньше для обеспечения высоких энергетических характеристик ЭМ. С появлением бандажей из композиционных материалов на основе углеродного волокна стало возможным снижение их толщины за счет более высокой прочности по сравнению с металлами и меньшего коэффициента теплового расширения. Также преимуществом композитных конструкций по сравнению с конструкциями из традиционных материалов (металлических сплавов) является возможность целенаправленного управления

характеристиками проектируемой конструкции, с целью получения оптимальных прочностных и геометрических параметров образца. [2]

Основным недостатком изготовления таких изделий из композиционных материалов является сложность технологического процесса, а также наличие специализированного намоточного оборудования.

Также при проектировании бандажей ЭМ стоит помнить о том, что материалы, используемые в изготовлении бандажных оболочек, обладают электропроводимостью, что негативно сказывается на электромагнитных свойствах ЭМ, а также будет являться причиной дополнительного выделения тепла во время работы. Поэтому следует использовать материалы с низкой электропроводимостью. Одним из методов решения данной проблемы может являться исполнение бандажа из нескольких колец (рис. 1), изолированных друг от друга. Недостатком данного решения является прежде всего сложность изготовления подобной конструкции. [7]

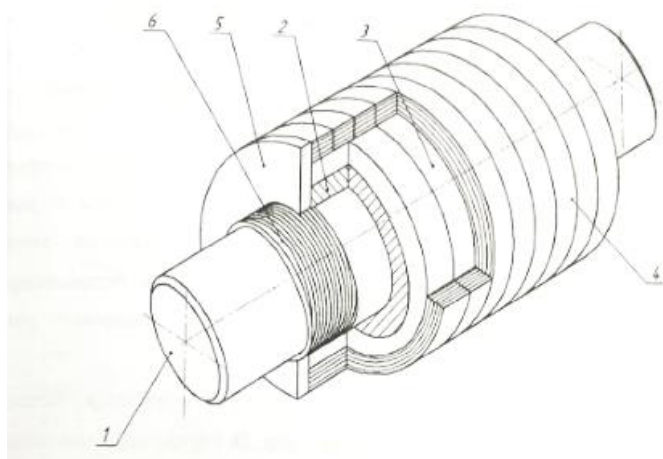


Рис. 5. Ротор с шихтованной бандажной оболочкой и ВПМ.

1 – вал; 2 - ярмо; 3 – постоянный магниты; 4 - бандаж;
5 - упор; 6 – резьба для пакета ротора.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

С целью определения прочностных характеристик были проведены испытания колец из композитов на углеродной основе с использованием бисмалеимидного связующего. Для этого изготовили 5 образцов с разным натягом с шагом 7 Н. При намотке на станке СН-8,0-1000 была задана программа, которая поддерживала следующие значения:

- скорость намотки;

- количество витков;
- направление вращения вала намотки;
- натяжение наматываемого материала;
- шаг раскладки.

В качестве армирующего материала использовалось углеродное волокно UMT530-12K EP фирмы UMATEX. Свойства данного волокна приведены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства используемого волокна

Свойства	Значение
Предел прочности при растяжении, ГПа	4
Модуль упругости при растяжении, ГПа	530
Предельная деформация, %	0,7
Линейная плотность, текс	680
Объемная плотность, г/см ³	1,93

В качестве полимерной матрицы использовалось бисмалеимидное связующее SB 332, характеристики которого приведены в таблице 2. Бисмалеимидное связующее SB 332 разработано для получения изделий из ПКМ методами вакуумной инфузии, RTM, намоткой. Связующее обеспечивает получение деталей ПКМ с уникально высокими механическими характеристиками при температурах до 230°C, механические характеристики сохраняются до 250°C, что позволяет кратковременно эксплуатировать детали до 250°C.

Таблица 2

Свойства используемого связующего

Свойства	Значение
Предел прочности при растяжении, ГПа	85
Модуль упругости при растяжении, ГПа	4,4
Удлинение при разрыве, %	3,5
Температура стеклования, текс	280
КЛТР, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	51

В процессе намотки получили 5 колец со средней толщиной 2 мм, внутренним диаметром 150 мм и длиной 10 мм с натягом 70, 77, 84, 91 и 98 Н при намотке соответственно.

Испытания проводились по ГОСТ 25.603–82 методом жестких полудисков. Данный метод является одним из самых простых способов определения предела прочности колец и признан во всем мире. При этом есть возможность проведения испытаний при высоких температурах. В данном случае испытания проводились при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

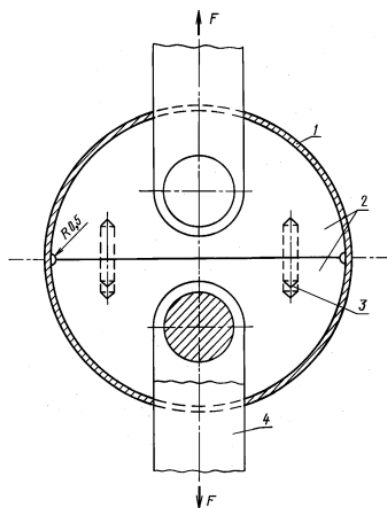


Рис. 6. Принципиальная схема испытаний колец.
1 – образец; 2 – полудиски; 3 – направляющая; 4 – тяга

В результате испытаний были получены следующие данные. На рисунке 3 изображена диаграмма нагружения первого образца, которая отражает зависимость между растягивающей образец силой F (кН) и удлинением (мм). Данный вид нагружения типичен для хрупких материалов.

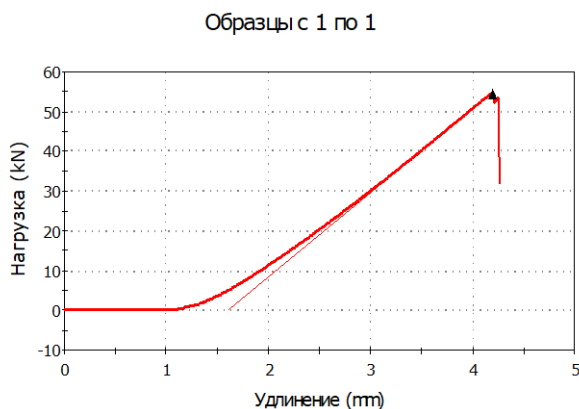


Рис. 7. Диаграмма нагружения.

На рисунке 4 отображена зависимость напряжения при растяжении от удлинения первого образца.

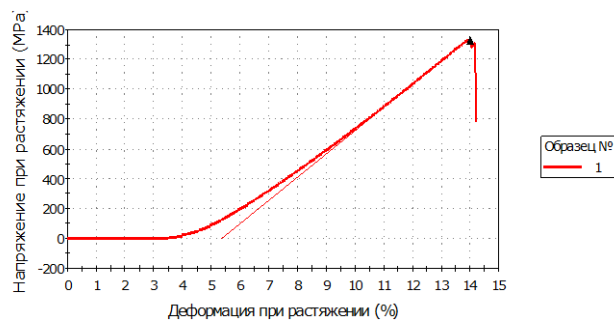


Рис. 8. Диаграмма растяжения

По результатам испытаний получили зависимость, которая описывает физико-механические характеристики образцов в зависимости натяга углеволокна при намотке.

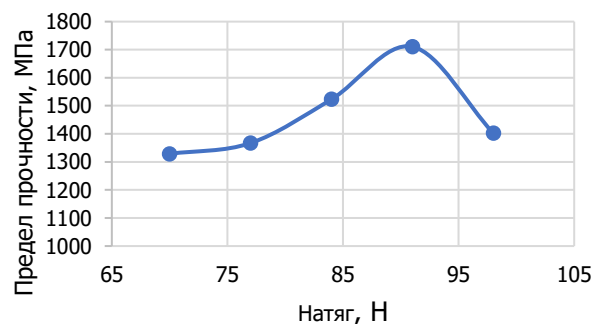


Рис. 9. Зависимость предела прочности от натяга при намотке.

Из данного рисунка мы видим, что с увеличением натяга при намотке повышается предел прочности изделия, что соответствует рекомендации о том, что для получения оптимального предела прочности кольца необходимо производить намотку с натягом в диапазоне от 5 до 15 % от предела прочности армирующей нити. Однако пятый образец с натягом 98 Н выбивается из общей зависимости, что является следствием наличия дефекта, связанного с недостатками технологического процесса намотки, в том числе:

- Во время намотки углеволокно пушилось, из-за чего наложение слоев друг на друга могло происходить неравномерно.
- Воздух в помещении имел взвешенные частицы пыли образующие межслоевые включения при контакте с углеволокном во время намотки, которые также снижают прочностные свойства образцов.
- Степень пропитки волокна.

Также был произведен рентгеноскопический контроль намотанных образцов (рисунок 7). По результатам компьютерной томографии удалось опознать дефект в образце. Данный метод позволяет определить такие дефекты, как расслоение, микротрещины, объемные включения, разрывы, нарушение связей между волокнами, расслоение, изменение плотности, а также повреждение нитей. Данный метод предназначен для обнаружения подповерхностных объемных дефектов и несплошностей, предоставляет количественный объемный анализ дефектов и несплошностей, определяемых другими методами неразрушающего контроля. Подходит для измерения геометрических характеристик изделия. [8]

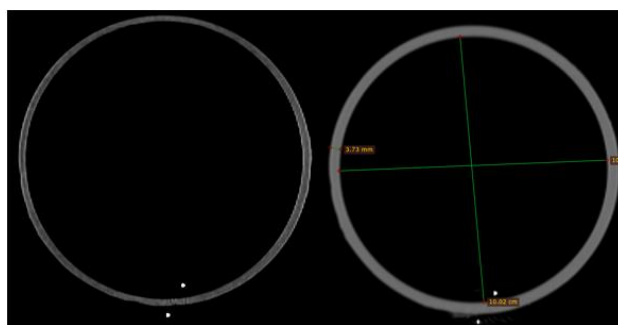


Рис. 10. Рентген снимок образца

На снимках видно, что намотанные кольца имеют неравномерную толщину, а также межслоевые включения и скачкообразные изменения плотности колец.

В образцах имеются локальные дефекты в виде расслоений, как межслоевые по толщине (от 0.5 мм до 70 мм по хорде), так и по ходу шага намотки (от 1 мм до 15 мм по хорде), локальные снижения плотности по всему объему кольца, а также наблюдается перепад плотности материала.

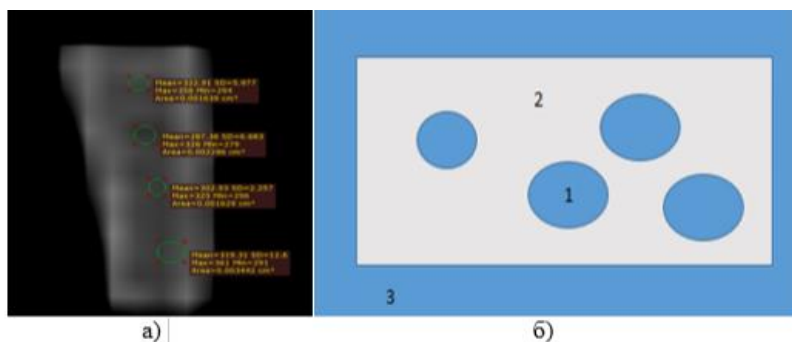


Рис. 11. Структурная схема расслоений:

а – рентген снимок; б – структурная схема расслоения.

- 1 – Зона локального снижения плотности;
- 2 – Внутренний слой;
- 3 – Наружный слой

На рисунке 9 можно наблюдать характер разрушений образцов при растяжении.

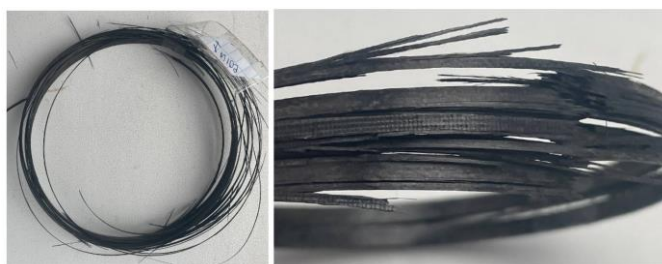


Рис. 12. Характер разрушения образцов.

По внешнему виду разрушенного образца также можно судить о качестве пропитки углеволокна. К примеру, на рисунке 9 межслоевые расслоения и отдельные сухие моноволокна свидетельствуют о недостаточной пропитке нити, в то время как на рисунке 10 продемонстрирована более качественная пропитка.



Рис. 13. Разрушенный образец

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В [7] приведены основные свойства композитных материалов зарубежного производства, используемых для изготовления бандажных оболочек ротора, которые отражены в таблице 3.

Сравнив значения из таблицы 3 и данные, полученные в результате экспериментов, приходим к выводу о том, что по таким характеристикам материала как предел прочности на разрыв, плотность и максимальная рабочая температура образца, кольца из композиционных материалов, намотанные ПИШ Моторы Будущего сравнимы, а по некоторым параметрам даже выше чем у зарубежных аналогов GFRP DW 210 и AFRP DW 152.

Свойства композиционных материалов компании CIRCOMP, применяемых в бандажных оболочках роторов высокооборотных ЭМ

	GFRP DW 210	AFRP DW 152	CFRP DW 231	CFRP DW 260
Предел прочности на разрыв, МПа	1440	1880	2420	2420
Плотность, кг/м³	2100	1330	1520	1520
Максимальная рабочая температура, °С	<110	<140	<140	>300
КТР*	7	0,2	0,2	0,2

* В направлении волокна

IV. ВЫВОД

В данной работе была получена зависимость предела прочности бандажного кольца из композиционного материала от натяга угленити при намотке. Согласно этой зависимости с увеличением натяга, до определенного момента увеличивается и предел прочности. Проведено сравнение полученных результатов с зарубежными аналогами. Планируются мероприятия по модернизации технологического процесса намотки, а также проведение численного моделирования для сравнения математического ожидания с реальными значениями прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев, Г.М. Зильбан Определение механических характеристик композиционных материалов, получаемых с помощью намотки: методические указания / Ю.С. Первушин – Уфа : УГАТУ, 2013. – 23с.
2. Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Саяхов И. Ф. Диагностика композитных материалов в электрических машинах //Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – №. 2 (43). – С. 65-69.
3. ГОСТ 25.603-82 с. 223.
4. Кулик В. И., Нилов А. С. Технология композитов на основе термореактивных полимерных связующих //СПб.: Балт. гос. техн. ун. – 2019. – Т. 2019. – С. 136.
5. Рудской А. И., Попович А. А., Григорьев А. В. Композиционные материалы и покрытия: учебное пособие для реализации программ высшего образования. – 2017.

6. Кусяков А. Ш. Моделирование композитных пластин и оболочек. – 2020.
7. Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е. Основы проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами //М.: Инновационное машиностроение. – 2016.
8. ГОСТ Р 56787—2015.
9. <https://itecma.ru/>.
10. <https://umatex.com/>.
11. Насибуллин Д.Д., Хамзин Ф.С., Еременко В.В. Исследование зависимости предела прочности от величины натяга при намотке бандажных колец высокооборотных электрических машин//Мавлютовские чтения. – 2023.

СОДЕРЖАНИЕ

Овчинников И.А., Попов И.В., Карелин В.С., Соколов П.В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	3
Гуревич О.С., Гулиенко А.И., Власов А.И., Опалев Ю.Г. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С 5-ТИ КРАТНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ ПО ТОКУ ДЛЯ ТОПЛИВНОГО НАСОСА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	24
Бавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Дернов М.Ю., Уразбахтин Р.Р., Галиев Р.Д. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ	36
Казаков Ю.Б., Кисилев М.А., Шумилов Е.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ МАГНИТОВ ИНДУКТОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ПОЛЕВЫХ МОДЕЛЯХ	45
Сафин А.Р., Петров Т.И., Басенко В.Р. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА¹	57
Пронин М.В., Митин Ф.В., Справцев Р.А. ЦИФРОВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ СИСТЕМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	65
Колупицкий К.А., Самохвалов Д.В. ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	76
Ямалов И.И., Шарафутдинов Ш.Н., Баскакова А.В., Ильясов Д.Р., Глумов Д.А. АДАПТИВНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ	88
Мустаев Э.И., Уразбахтин Р.Р., Дойников А.И. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	97
Жарков Е.О. МИНИМИЗАЦИЯ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ЧЕРЕЗ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ПАЗОВ И ПОЛЮСОВ	118

Кильметов Р.А., Хакимьянов А.Р. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ БЕСПИЛОТНОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОЙ АВИАЦИИ	127
Охотников М.В., Мужайлов В.Н., Насибуллин Д.Д., Блинов А.Я. ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ	136
Обух Ф.А., Терегулов Т.Р. УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЕМКОСТЬ¹	145
Юшкова О.А., Пронин Е.А., Саяхов И.Ф., Гарипов И.Р. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ СО СВЕРХВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ: ДОСТИЖЕНИЯ 2023 ГОДА¹	156
Терегулов Т.Р., Валеев А.Р. АЛЮМИНИЕВЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	166
Хазиев И.С., Григорьева Ю.В., Юсуфов Т.А. ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	176
Кобзов Д.В., Юсуфов Т.А. ПРОБЛЕМЫ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ	184
Ганджа Д.С. РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	192
Мухаметзянов М.М., Руднев А.А., Альмухаметов Д.М. О РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКООБОРОТИСТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ	210
Обуденов М.С., Шаяхметов Д.А., Левченко Л.И. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРЦЕПТОРАМИ САМОЛЕТА ТВРС-44	218
Михайлов А.Е., Михайлова А.Б., Красноперов Д.Г., Горюхин М.О., Еременко В.В. РАЗРАБОТКА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПОД АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ИНТЕГРИРОВАННОГО В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА МОЩНОСТИ	226

Михайлов А.Е., Михайлова А.Б., Красноперов Д.Г., Горюхин М.О., Еременко В.В. РАЗРАБОТКА АДДИТИВНОГО ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ	234
Гарипов И.Р. ТУРБОВАЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭЛЕКТРИФИРОВАННЫМ ТУРБОКОМПРЕССОРОМ	245
Ямалов И.И., Дмитриев Д. А. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ	258
Альмухаметов Д.М., Салихов Р.М., Руднев А.А., Мухаметзянов М.М. ИСПЫТАНИЯ ЗАРУБЕЖНОГО МАГНЕТО-ГЕНЕРАТОРА ROTAХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АНАЛОГОВ	270
Хабирова Я.Ф., Бабилова Н.Л. К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРОВ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	282
Хуснуллина А.Р. О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	291
Лач С.Ю. ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО	299
Пашали Д.Ю., Юшкова О.А., Калимуллин С.Р. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОАВТОБУСА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА	307
Юсуфов Т.А. СТУДЕНЧЕСКИЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ БЮРО. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ	317
Золотухина Е.Ю. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТАНЦИИ	325

Крылова И.А.	336
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ НАГРУЗКИ	
Судаков А.И., Зиятдинов И.Р.	345
ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА УДАРНОГО ТОКА ИЗ ОПЫТА ВКЗ ДЛЯ СИНХРОННЫХ МАШИН СВЫШЕ 100 КВТ	
Гулиенко А.И.	353
ПОЯВЛЕНИЕ ЛОЖНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ПРИ ЧИСЛЕННОМ ИНТЕГРИРОВАНИИ УРАВНЕНИЙ САУ	
Али Юсеф, Столяров Е.О., Лашкевич М.М., Подзорова В.С., Кулик Е.С., Анучин А.С.	365
УПРАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ В ТРЕХФАЗНОМ СИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С РАСЩЕПЛЁННЫМИ ОБМОТКАМИ	
Насибуллин Д.Д., Мужайлов В.Н., Еременко В.В., Хамзин Ф.С., Охотников М.В., Подгузов А.А.	375
АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОБОРОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	

Научное издание

Электротехнические комплексы и системы

[Том 2]:

**Материалы II Всероссийской конференции по электрическим машинам в
рамках Международной научно-практической конференции**

Публикуется в авторской редакции

Подписано в печать 25.12.2023 г. Формат 60×90 / 16

Печать: цифровая. Гарнитура: Times New Roman

Усл. печ. л. 22,60. Тираж 500. Заказ 1991

Отпечатано в редакционно-издательском отделе
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «АЭТЕРНА»

450076, г. Уфа, ул. Пушкина 120

<https://aeterna-ufa.ru>

info@aeterna-ufa.ru

+7 (347) 266 60 68