

На правах рукописи



Чернышев Алексей Дмитриевич

**АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ
ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА
С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Летательные аппараты».

Научный руководитель – доктор технических наук, проф., профессор кафедры «Летательные аппараты» **Воронин Сергей Григорьевич**.

Официальные оппоненты:

Петрушин Александр Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону;

Русаков Анатолий Михайлович, канд. техн. наук, снс, внс кафедры «Электротехнические комплексы, автономные объекты и электрический транспорт» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Защита состоится 26 ноября 2021 в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/chernyshev-aleksey-dmitrievich>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351)-297-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.298.05

доктор технических наук, профессор

М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В мировой практике как научного, так и промышленного сообщества можно увидеть устойчивую тенденцию к созданию и модернизации транспортных средств (ТС) на электромеханической трансмиссии (ЭМТ), в том числе специальных ТС с комбинированной энергетической установкой, например, промышленных и универсальных тракторов

Ключевым элементом ЭМТ является тяговый генератор (ТГ), который вместе с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) образует автономную энергетическую установку (АЭУ). К АЭУ предъявляют жесткие требования, которые расширяются и ужесточаются. В составе АЭУ наряду с классическими машинами применяются вентильные индукторные генераторы (ВИГ), что обусловлено их достоинствами: высокий КПД в широком изменении нагрузок и скоростей вращения ротора, пассивный ротор, обмотки в виде концентрических катушек, управляемое электромагнитное возбуждение, конструктивная простота, технологичность производства, низкая себестоимость электрической машины. Вместе с тем такие машины имеют ряд недостатков, сдерживающих их применение: необходимость асимметричного полумостового преобразователя, достаточно сложной системы управления с множеством датчиков, увеличенное число проводов для подключения электрической машины, не синусоидальные законы изменения токов и напряжений, существенные пульсации электромагнитного момента, высокий уровень шума и вибрации.

Большой вклад в развитие теории и практики вентильного индукторного привода внесли отечественные и зарубежные ученые: Ильинский Н.Ф., Бычков М.Г., Кузнецов В.А., Фисенко В.Г., Гречко М.В., Туан Н.М., Коломийцев Л.Ф., Голландцев Ю.А., Miller T., Lawrenson P и др. Однако большинство рассматривает только двигательный режим, и лишь некоторые рассматривают режимы рекуперативного торможения вентильной индукторной машины и генераторный режим работы. Так же большинство авторов не описывает возможности использования каких-либо физических или электрических особенностей работы электрической машины с целью упрощения конструкции всей системы.

В работе рассмотрено схемно-конструктивное решение, позволяющее отказаться от использования специального инвертора и сложной системы управления с необходимостью отслеживания формы фазных токов в зависимости от положения ротора путем использования для возбуждения обмоток такой особенности электрической машины, как трапецеидальная форма фазной ЭДС с крутыми фронтами, позволяющая формировать импульсы тока возбуждения в естественном режиме и значительно упростить систему управления.

Актуальность темы диссертационного исследования обоснована новизной технического решения и отсутствием исследований

предложенной АЭУ: данное решение открывает АЭУ включающую новую конструкцию электрической машины с оригинальными схемотехническими решениями, касающимися электронной аппаратуры управления, вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением (ВИГ КВ), для которой отсутствуют математические и компьютерные модели, исследования касающиеся электромагнитных процессов протекающих в системе в различных режимах работы, алгоритмы управления, методика создания таких устройств и методика определения параметров основных компонентов.

Объектом исследования является АЭУ на базе ВИГ новой конструкции с оригинальными схемотехническими решениями, касающимися электронной аппаратуры управления.

По вышеизложенным причинам **целью диссертационного исследования** является анализ электромагнитных процессов новой АЭУ в различных режимах работы, разработка алгоритма управления и инженерной методики проектирования новых электротехнических систем.

Для достижения цели были решены следующие основные **задачи**:

1. Предложена новая конструкция и принципиальная электрическая схема АЭУ и проведен патентно-литературный обзор электрических машин, применяемых в АЭУ в составе ЭМТ ТС с целью определения наиболее широко применяемых технических решений, их основных достоинств и недостатков, и сравнения их с рассматриваемой АЭУ.

2. Разработано математическое описание электромагнитных процессов, протекающих в новой системе, на основе которого была создана аналитическая математическая модель, учитывающая способ возбуждения якорных обмоток, и предложена инженерная методика проектирования.

3. Осуществлен синтез компьютерной модели на базе конечно-элементного метода для исследования работоспособности и качества функционирования системы в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях, используя которую был разработан алгоритм управления выходным напряжением.

4. Спроектирован и изготовлен образец ВИГ новой конструкции для проведения экспериментальных исследований в составе АЭУ на испытательном стенде с целью проверки принятых технических решений, математической модели, компьютерной и алгоритма управления.

Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические **методы исследования**.

В качестве теоретических методов исследования использовались такие математические аппараты, как линейная алгебра, теория графов, дискретное исчисление, дифференциальное исчисление, полевой анализ, основные положения теории электрических цепей, теории электромеханического преобразования энергии, теории электропривода, теории полупроводниковой преобразовательной техники, цифрового

управления, метод конечных элементов, методы математического моделирования систем на ЭВМ.

В качестве методов экспериментального исследования использовались наблюдение и измерение, которые проводились на образце, установленном на испытательном стенде, при обработке результатов использовалась аппроксимация линейной комбинацией функций, корреляция и некоторые другие положения математической статистики.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Дана теория и определены возможности нового подкласса ВИГ, как основы АЭУ с улучшенными технико-эксплуатационными показателями.

2. Впервые разработано математическое описание ВИГ КВ в составе АЭУ с учетом способа возбуждения якорных обмоток.

3. Впервые разработана компьютерная модель ВИГ КВ с использованием метода конечных элементов в программно-вычислительном комплексе ANSYS.

4. Дана инженерная методика проектирования новой АЭУ на основе ВИГ КВ, включающая рекомендации по проектированию электрической машины и выражения для предварительного определения мощности и параметров цепи возбуждения.

5. Предложен алгоритм управления вентильным индукторным генератором с новой принципиальной схемой в составе АЭУ с использованием тиристоров для регулирования тока возбуждения путем изменения соотношения между периодами напряжениями прикладываемым к тиристорам и периодами пропуска тока ими.

Практическая значимость работы состоит в создании АЭУ на основе новой принципиальной схемы и конструкции ВИГ, которые позволяют производить автоматическое возбуждение фазных обмоток за счет трапецеидальной формы ЭДС на них. Практическое использование ВИГ КВ позволяет значительно упростить систему управления, уменьшить габариты и снизить стоимость в сравнении АЭУ с «классическим» ВИГ.

Реализация основных результатов диссертационной работы выполнена в производственной и научно-исследовательской деятельности ООО НПП «Резонанс» при создании АЭУ для перспективных электромеханических трансмиссий ТС повышенной безопасности и экономичности, в частности при разработке электромеханических трансмиссий сельскохозяйственного трактора тягового класса 3 и бульдозера тягового класса 10.

Внедрение подтверждено соответствующими актами.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Новая конструкция и принципиальная электрическая схема ВИГ, включающая электрическую машину и электронную аппаратуру управления.

2. Математическая модель ВИГ с новым принципом возбуждения фазных обмоток, учитывающая его работу в составе АЭУ.

3. Методика определения основных параметров компонентов цепи возбуждения ВИГ с новой принципиальной электрической схемой и предварительного определения мощности АЭУ.

4. Динамическая компьютерная модель ВИГ новой конструкции на основе конечно-элементной модели, учитывающая совместную работу электрической машины, электрических и электронных компонентов системы, выполненная в программно-вычислительном комплексе ANSYS.

5. Алгоритм управления ВИГ с новой принципиальной схемой с использованием тиристоров для регулирования тока возбуждения путем изменения количества соотношения периодов тока, пропускаемых ими и напряжения, прикладываемого к ним.

6. Результаты математического моделирования, компьютерного моделирования и экспериментальных исследований образца вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью постановки задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных математических и численных методов, экспериментальным подтверждением теоретических выводов при достаточном для инженерной практики совпадением результатов теории, компьютерного моделирования и физического эксперимента. Основные положения диссертации обсуждены на научно-технических конференциях различного уровня, опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, получили одобрение специалистов в данной области и были внедрены в производство.

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась на расширенном совещании конструкторского бюро электропривода ООО НПП «Резонанс» и на расширенном заседании кафедры «Летательные аппараты» Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и конкурсах инновационной деятельности: международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2017 г.; Всероссийском конкурсе инновационной деятельности «Всероссийский инновационный конкурс», Новосибирск, 2017 г.; Всероссийском конкурсе инновационной деятельности «Умник», Челябинск, 2017 г.; Второй научно-практической конференции «Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники», ОАО «ВНИИТрансмаш», Санкт-Петербург, 2018 г.; X Научной конференции аспирантов и докторантов, ЮУрГУ, Челябинск, 2018 г.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 13 печатных трудах, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных

журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 4 статьи в изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Scopus, 2 патента на изобретение Российской Федерации.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи исследования, разработке методов исследований, в формулировании и доказательстве научных положений. В научных трудах, в том числе написанных в соавторстве, автору принадлежат основные идеи, и проработка вопросов по новым конструктивным и схемотехническим решениям АЭУ, разработка математических моделей, анализ полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 159 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, в том числе 105 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы диссертационной работы, определен объект исследования, сформулирована цель и указаны решенные задачи необходимые для ее достижения, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследованы вопросы создания ЭМТ для ТС и самих АЭУ. Структурирован и представлен обзор известных типов электромеханических преобразователей в составе АЭУ. Указаны достоинства и недостатки самих электромеханических преобразователей и АЭУ на их основе, а также области применения описанных АЭУ. Основываясь на проведенном патентно-литературном обзоре показана необходимость разработки новых АЭУ в которых будет использован новый подход проектирования с синергетическим объединением электрической машины и электрического преобразователя. Предложена новая АЭУ, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

АЭУ на базе ВИГ КВ в соответствии с рисунком 1 включает в себя в общем виде: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ВИГ – вентильный индукторный генератор; КВ – цепь конденсаторного возбуждения, в виде дополнительных обмоток и конденсаторов; ПУ – пусковое устройство первоначального возбуждения; СУ – система управления возбуждением, в данном случае представленная в виде тиристоров и их драйверов; СВ – силовой выпрямитель; С – выходной конденсатор СВ; ИВ – измерительный выпрямитель; ДТ – датчик выходного тока; МК – микроконтроллер для автономного управления АЭУ. При вращении вала ВИГ с помощью ДВС осуществляется его возбуждением с помощью ПУ. Для этого МК управляющим сигналом открывает электронный ключ ПУ и конденсатор, заряженный от внешнего источника напряжения, разряжается через якорные обмотки ВИГ осуществляя первоначальное возбуждение.

Электронный ключ после разряда конденсатора закрывается. В это время МК удерживает в открытом состоянии тиристоры СУ путем подачи управляющих сигналов на драйверы. В якорных обмотках генерируется ток, который индуцирует ЭДС в дополнительных обмотках осуществляющее заряд конденсаторов КВ, а в результате их разряда, в автономном режиме за счет изменения ЭДС дополнительных обмоток при вращении ротора, осуществляется возбуждение якорных обмоток. По достижению напряжения, измеренного с помощью ИВ, заданного значения, МК начинает осуществлять регулирование напряжения на обмотках ВИГ, путем изменения количества импульсов тока возбуждения формируемых в заданный период времени. В результате осуществляется регулирование выходного напряжения в соответствии с требованиями энергопотребителей. Сигнал ДТ служит в качестве обратной связи по выходному току.

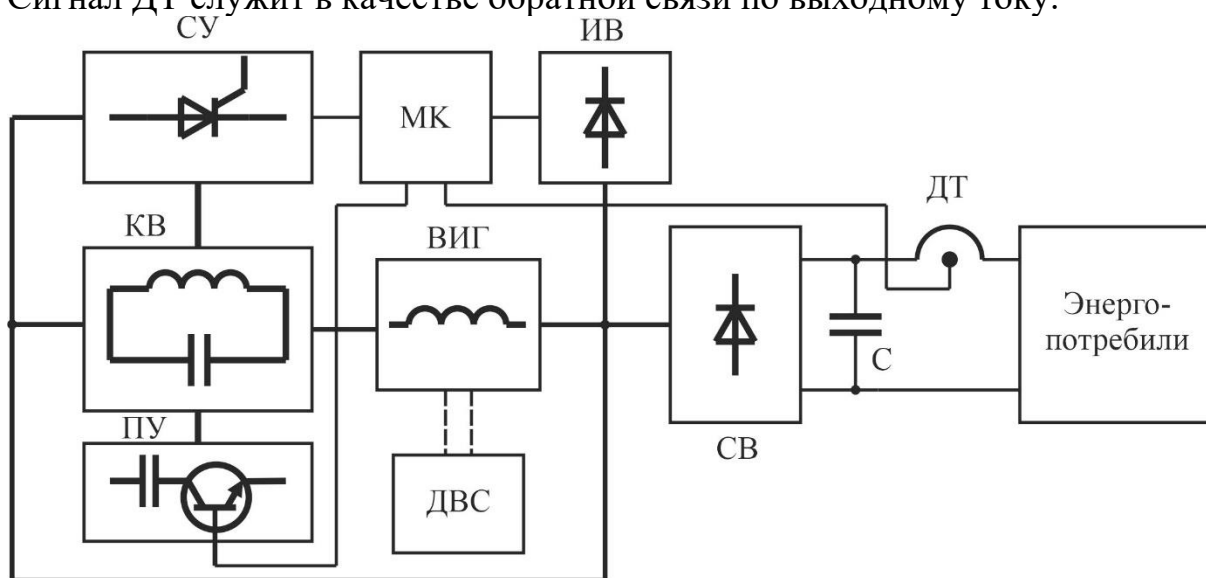


Рисунок 1. Структурная схема АЭУ на основе ВИГ КВ

На рисунке 2 представлены сечение электрической машины и электрическая схема ВИГ КВ, где а, б, с – фазы генератора включающие совмещенные обмотки якоря и возбуждения; VD1-VD3 – шунтирующие диоды; VT1-VT3 – тиристоры в цепи возбуждения; C1-C3 – конденсаторы возбуждения; VD4-VD9 – диоды силового выпрямителя; C4 – сглаживающий конденсатор силового выпрямителя.

АЭУ в основе которой лежит ВИГ КВ обладает преимуществами «классического» ВИГ с коммутатором, а также автоматической коммутацией и возбуждением обмоток, простой системой управления, позволяющей в широком диапазоне регулировать выходное напряжение, меньшей стоимостью электронного блока и повышенной пожаробезопасностью. Такие АЭУ обладают недостатками, связанными с повышенными токовыми нагрузками обмоток электрической машины, отсутствием возможности работы в режиме двигателя и необходимостью устройства первоначального возбуждения.

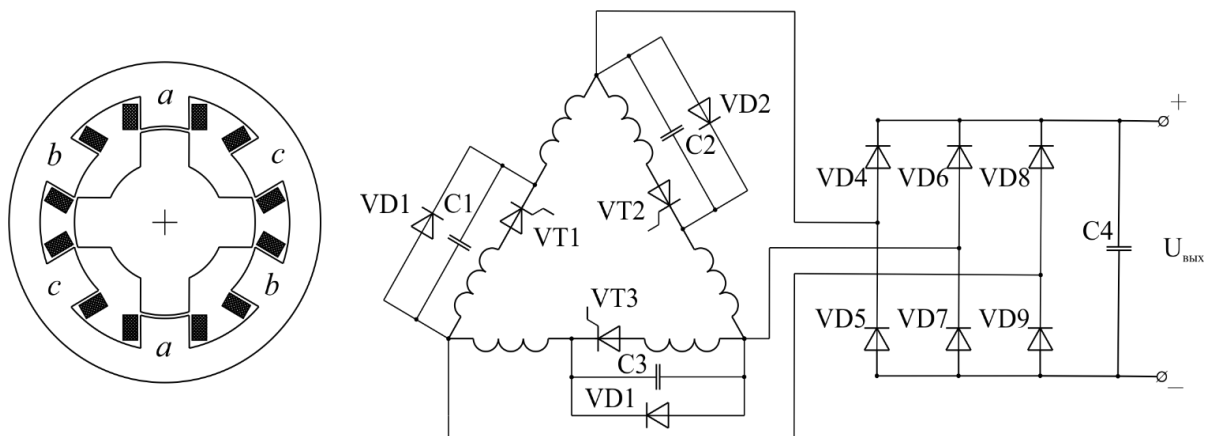


Рисунок 2. Сечение и электрическая схема ВИГ КВ

Как вывод были указаны преимущества, а также недостатки использования новой АЭУ на основе ВИГ КВ.

Вторая глава «Вентильный индукторный генератор с конденсаторным возбуждением» посвящена теоретическому описанию принципа работы, электромагнитных процессов, процессов коммутации и возбуждения обмоток ВИГ КВ на примере трехфазной АЭУ. В главе описан процесс возбуждения якорных обмоток с помощью цепи конденсаторного возбуждения и генерация электрической энергии в 4 такта, которые представляют собой цикл работы АЭУ. Выведено дифференциальное уравнение для описания процесса первоначального возбуждения якорных обмоток. Которое затем было использовано при выведении выражений для определения основных параметров электрической цепи пускового устройства. Создана математическая модель на основе систем дифференциальных уравнений, описывающих электрическую схему, представленную на рисунке 2. Для упрощения электрическая схема была разделена на несколько схем, соответствующих тактам работы системы и состоянию электрических вентилях. На эквивалентных схемах: L_A, L_B, L_C и I_a, I_b, I_c – индуктивности якорных и дополнительных обмоток; r и r_d – активные сопротивления якорных и дополнительных обмоток; $r_{диф1} - r_{диф3}$ – эквивалентные сопротивления тиристоров; $r_{диф4} - r_{диф6}$ – эквивалентные сопротивления шунтирующих диодов; $r_{ref1} - r_{ref6}$ – эквивалентные сопротивления диодов силового выпрямителя, $C_1 - C_3$ – конденсаторы возбуждения; C_0 – конденсатор начального возбуждения, U_0 – напряжение на конденсаторе первоначального возбуждения.

Первым тактом является возбуждение ВИГ КВ с помощью от конденсатора пускового устройства C_0 . Эквивалентная схема, иллюстрирующая процесс возбуждения якорных обмоток, представлена на рисунке 3, описывается выражением (1).

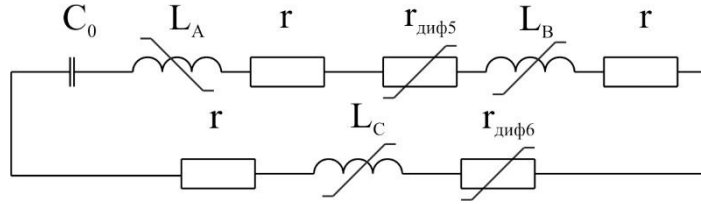


Рисунок 3. Эквивалентная электрическая схема начального возбуждения

$$I_0 = \frac{2U_0}{L_\Sigma \sqrt{\frac{C_0 r_\Sigma^2 - 4L_\Sigma}{C_0 L_\Sigma^2}}} \sinh\left(t \sqrt{\frac{C_0 r_\Sigma^2 - 4L_\Sigma}{2C_0 L_\Sigma^2}}\right) e^{-\frac{r_\Sigma}{2L_\Sigma} t}; \quad (1)$$

$$L_\Sigma = 3L_0 + 6M_0;$$

$$r_\Sigma = 3r + r_{\text{диф}5} + r_{\text{диф}6}$$

где I_0 – ток, протекающий в цепи; L_0 и M_0 – постоянная составляющая собственной индуктивности и взаимной индуктивности якорных обмоток.

Второй такт (первый рабочий такт) математической модели начинается, когда зубцы статора и ротора для фазы А приходят в согласованное положение и соответствует переходу генерации от фазы С к фазе А, представлен на эквивалентной схеме на рисунке 4. Первый рабочий такт системы описывается в соответствии с системами дифференциальных уравнений (2) и (3).

Третий такт (второй рабочий такт) математической модели начинается с рассогласованного положения зубцов статора и ротора для фазы С, и длится до достижения согласованного положения зубцов статора и ротора фазы В, соответствует генерации только фазой А и представлен эквивалентной электрической схемой на рисунке 5. Третий такт работы системы описывается дифференциальными уравнениями (4).

Другие такты описываются аналогичными системами дифференциальных уравнений со сдвигом фазы. Общее решение находится путем припасовывания каждого отдельного решения систем дифференциальных уравнений к предыдущему, начальными условиями для нового такта является результат решения на предыдущем такте.

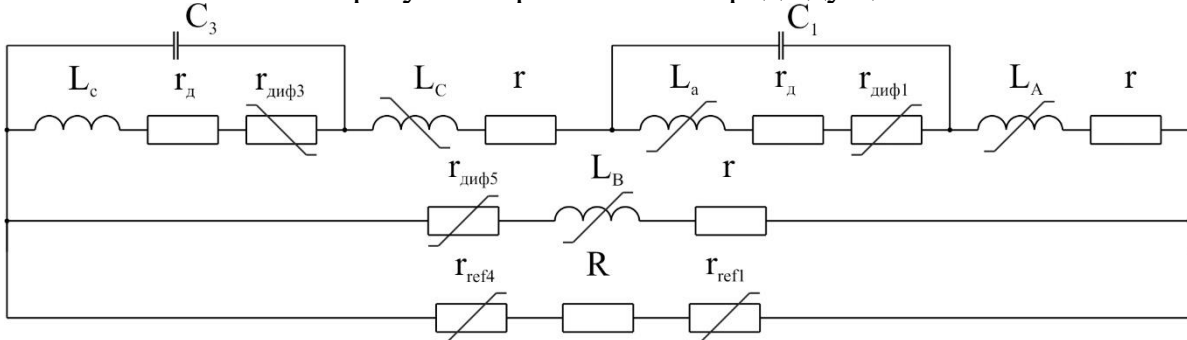


Рисунок 4. Эквивалентная электрическая схемы первого рабочего такта

$$\left\{ \begin{array}{l}
U_{C3_11} + (r_{\text{диф}3} + r_{\text{д}})i_{c_11} + \frac{d\psi_{c_11}}{dt} = 0; \\
\frac{d\psi_{c_11}}{dt} + (r_{\text{диф}3} + r_{\text{д}})i_{c_11} + \frac{d\psi_{a_11}}{dt} + (r_{\text{диф}1} + r_{\text{д}})i_{a_11} + \frac{d\psi_{c_11}}{dt} + \\
+rI_{C_11} + \frac{d\psi_{A_11}}{dt} + rI_{A_11} + \frac{d\psi_{B_11}}{dt} + (r_{\text{диф}5} + r)I_{B_11} = 0 \\
\frac{d\psi_{c_11}}{dt} + (r_{\text{диф}3} + r_{\text{д}})i_{c_11} + \frac{d\psi_{a_11}}{dt} + (r_{\text{диф}1} + r_{\text{д}})i_{a_11} + \frac{d\psi_{c_11}}{dt} + \\
+rI_{C_11} + \frac{d\psi_{A_11}}{dt} + rI_{A_11} + (R + r_{\text{ref}1} + r_{\text{ref}4})I_{R_11} = 0 \\
C \frac{U_{C3_11}}{dt} - i_{c_11} + I_{C_11} = 0 \\
I_{A_11} - I_{B_11} - I_{R_11} = 0 \\
I_{A_11} = I_{C_11}
\end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
U_{C1_12} + (r_{\text{диф}1} + r_{\text{д}})i_{a_12} + \frac{d\psi_{a_12}}{dt} = 0 \\
\frac{d\psi_{c_12}}{dt} + (r_{\text{диф}3} + r_{\text{д}})i_{c_12} + \frac{d\psi_{a_12}}{dt} + (r_{\text{диф}1} + r_{\text{д}})i_{a_12} + \frac{d\psi_{c_12}}{dt} + \\
+rI_{C_12} + \frac{d\psi_{A_12}}{dt} + rI_{A_12} + \frac{d\psi_{B_12}}{dt} + (r_{\text{диф}5} + r)I_{B_12} = 0 \\
\frac{d\psi_{c_12}}{dt} + (r_{\text{диф}3} + r_{\text{д}})i_{c_12} + \frac{d\psi_{a_12}}{dt} + (r_{\text{диф}1} + r_{\text{д}})i_{a_12} \frac{d\psi_{c_12}}{dt} + \\
+rI_{C_12} + \frac{d\psi_{A_12}}{dt} + rI_{A_12} + (R + r_{\text{ref}1} + r_{\text{ref}4})I_{R_12} = 0 \\
C \frac{dU_{C1_12}}{dt} - i_{a_12} + I_{A_12} = 0 \\
I_{A_12} - I_{B_12} - I_{R_12} = 0 \\
I_{A_12} = I_{C_12}
\end{array} \right. \quad (3)$$

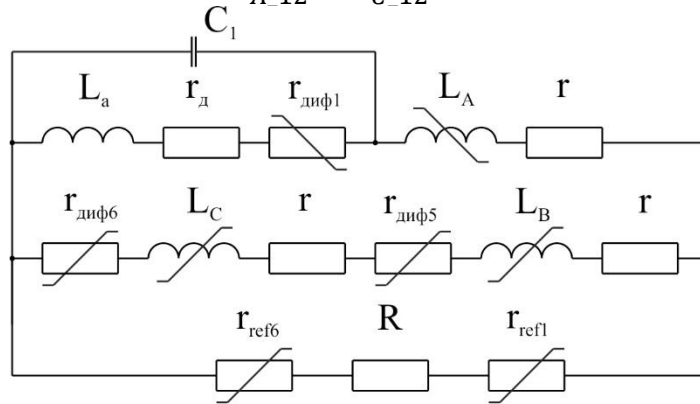


Рисунок 5. Эквивалентная электрическая схемы второго рабочего такта

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{C1,2} + (r_{\text{диф1}} + r_{\text{д}})i_{a_2} + \frac{d\psi_{a_2}}{dt} = 0 \\ \frac{d\psi_{a_2}}{dt} + (r_{\text{диф1}} + r_{\text{д}})i_{a_2} + \frac{d\psi_{A_2}}{dt} + rI_{A_2} + \frac{d\psi_{B_2}}{dt} + \\ + (r_{\text{диф5}} + r)I_{B_2} + \frac{d\psi_{C_2}}{dt} + (r + r_{\text{диф6}})I_{C_2} = 0 \\ \frac{d\psi_{a_2}}{dt} + (r_{\text{диф1}} + r_{\text{д}})i_{a_2} + \frac{d\psi_{A_2}}{dt} + rI_{A_2} + (R + r_{\text{ref1}} + r_{\text{ref6}})I_{R_2} = 0 \\ C \frac{dU_{C1,2}}{dt} - i_{a_2} + I_{A_2} = 0 \\ I_{A_2} - I_{B_2} - I_{R_2} = 0 \\ I_{B_2} = I_{C_2} \end{array} \right. \quad (4)$$

Выражения (2 – 4) показывают, что ток протекает по якорным обмоткам всегда. Поэтому в процессе работы часть якорных обмоток создает тормозной момент и вырабатывает электрическую энергию, а часть создает двигательный момент потребляя энергию. Это обстоятельство не значительно влияет на КПД машины, но негативно сказывается на тепловом режиме. В конце главы приведены выражения для определения вращательного момента, мощности и КПД.

В третьей главе предложена инженерная методика проектирования, даны рекомендации касающиеся конструкции электрической машины. В том числе указана необходимость возможность компенсации влияния неравномерности воздушного зазора на индуктивность обмоток путем обеспечения максимального количества параллельных ветвей в цепях обмоток. Так же дана рекомендация по транспозиции проводников при намотке обмоток в несколько проводников. Транспозиция необходима из-за неравномерности индуктивностей в силу размеров пазов.

Впервые даны выражения для предварительного определения номинальной мощности АЭУ (5) и емкости конденсатора пускового устройства (6).

$$P = 0,356 \omega_r L_s \frac{\pi}{Z_1} \left(p k D_a^2 \pi J \left(\frac{Z_1 - 2\pi}{Z_1} \right) \right)^2, \quad (5)$$

где P – мощность, ω_r – скорость вращения ротора; L_s – длина активной части; Z_1 – количество зубцов статора; p – количество полюсов; k – коэффициент заполнения паза медью; D_a – внешний диаметр статора; J – плотность тока.

$$C = \frac{\Delta\theta B_s \delta}{\Delta U_C \omega_r Z_2 \mu_0 (w + w_d)}, \quad (6)$$

где $\Delta\theta = 2\pi/3$ – приращение угла во время коммутации; $B_s = 1,5$ Тл – значение магнитной индукции в зубце статора, соответствующее насыщению стали; $\Delta U_C = 0,1 U_n$ – приращение напряжение конденсатора во время его разряда; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость.

Осуществлен синтез компьютерной модели (рисунок 6) на основе динамически связанных электрической цепи и конечно-элементной модели электрической машины в программно-вычислительном комплексе ANSYS. Такой подход позволяет выполнять комплексный расчет АЭУ и максимально приблизить анализируемую модель к реальным условиям эксплуатации.

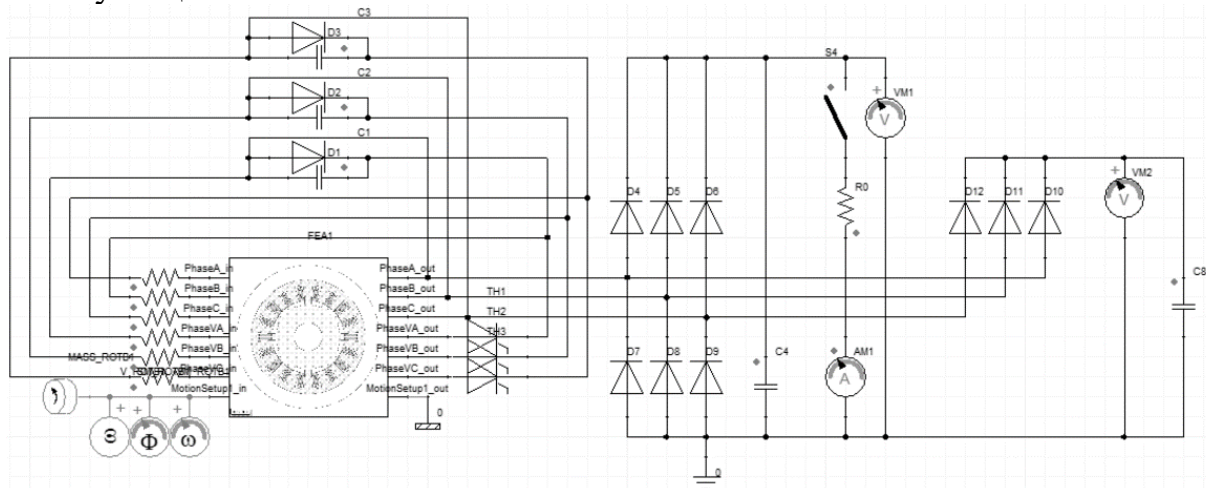


Рисунок 6. Модель ВИГ КВ выполненная в ANSYS Simplorer

Моделирование проводилось на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ». Большинство расчетов проводилось с помощью двумерной модели для минимизации затрачиваемых вычислительных ресурсов. На трехмерной модели проводились расчеты только для подтверждения данных полученных на двумерной модели.

Проведен ряд расчетов в режиме статичного магнитного поля с целью исследований распределения магнитного поля в магнитопроводе машины, определения зависимостей индуктивностей, потокосцепления и вращательного момента от положения ротора, и тока обмоток. Зависимости были сопоставлены со значениями, полученными аналитически, и показали высокую сходимость результатов.

Проведено моделирование нестационарных режимов работы АЭУ на модели представленной на рисунке 6, учитывающей совместную работу электрической машины, системы управления, пускового устройства и выходного выпрямителя на активно-емкостную нагрузку и активно-индуктивную нагрузку. В качестве результатов были получены характеристики АЭУ (выходное напряжение, ток, мощность, механическая мощность на валу, момент на валу электрической машины, КПД и т.д.), и электрические параметры ее компонентов (напряжения, токи полупроводниковых компонентов, обмоток, частоты, потери в них и т.д.).

Исследование системы с помощью компьютерной модели определило необходимость управления цепью возбуждения для снижения токовых нагрузок на электрическую машину, повышения КПД и возможности регулирования выходных координат АЭУ. С помощью компьютерной модели были проработаны четыре способа управления АЭУ: гистерезисный

регулятор и ШИМ регулятор тока возбуждения с помощью транзистора установленного последовательно с дополнительной обмоткой (рисунок 7 а), СИФУ и «тиристорный» регулятор тока возбуждения (рисунок 7 б).

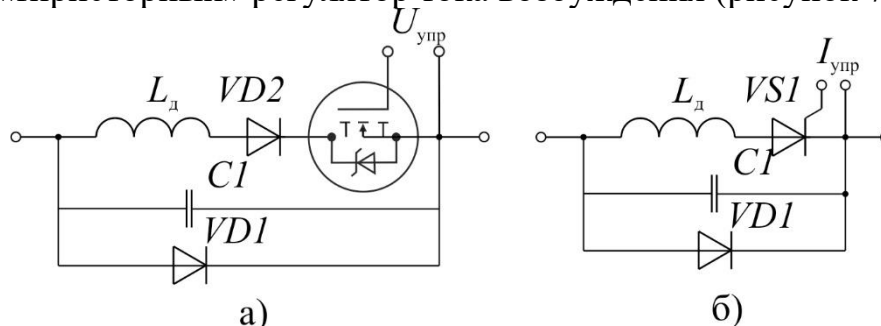


Рисунок 7. а – гистерезисный регулятор и ШИМ регулятор тока, б – регулятор на основе СИФУ и «тиристорный» регулятор

Проведенные исследования позволили разработать эффективный и простой способ управления выходными координатами ВИГ КВ с использованием тиристоров для регулирования тока возбуждения путем изменения количества периодов тока, пропускаемых ими за период времени, что представлено на рисунке 8. Первый график представляет ЭДС на дополнительной обмотке одной из фаз. Заштрихованными частями обозначено напряжение на конденсаторе возбуждения. Второй график изображает сигналы в системе управления тиристорами. Импульсы U_m являются модулирующим сигналом для U_m , модулируемых импульсов управления тиристорами. В результате модуляции будет изменяться в количестве импульсов тока возбуждения, формируемых конденсаторами за период времени T и соответственно среднее значение тока возбуждения.

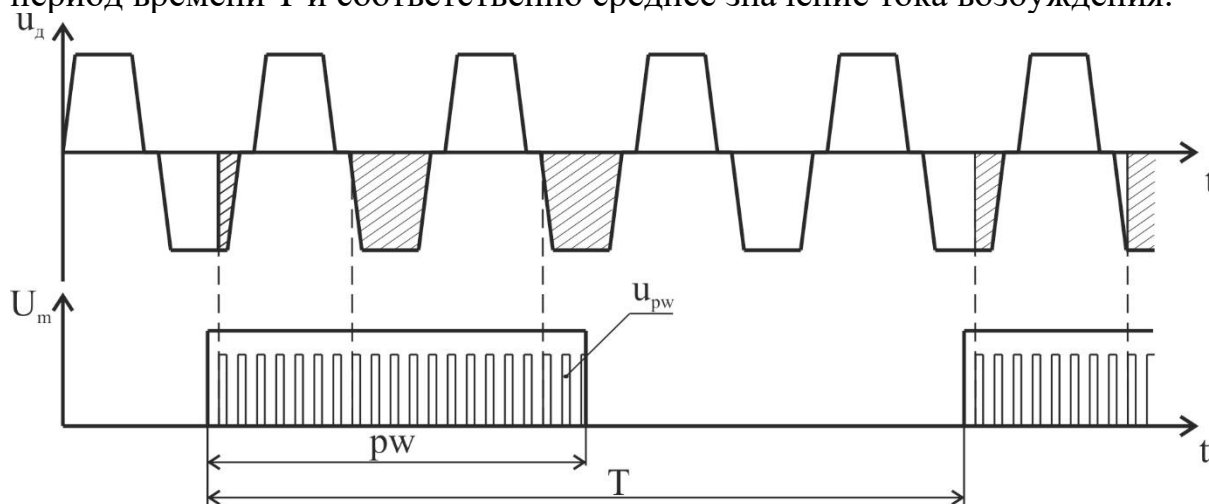


Рисунок 8. Иллюстрация алгоритма управления ВИГ КВ

В результате исследований были получены зависимости выходного напряжения, мощности и КПД от скорости вращения и тока нагрузки, зависимость тока возбуждения от тока нагрузки для номинального напряжения и скорости вращения (рисунки 9 – 12) и другие характеристики. Которые отражены в диссертационном исследовании и приложении к нему.

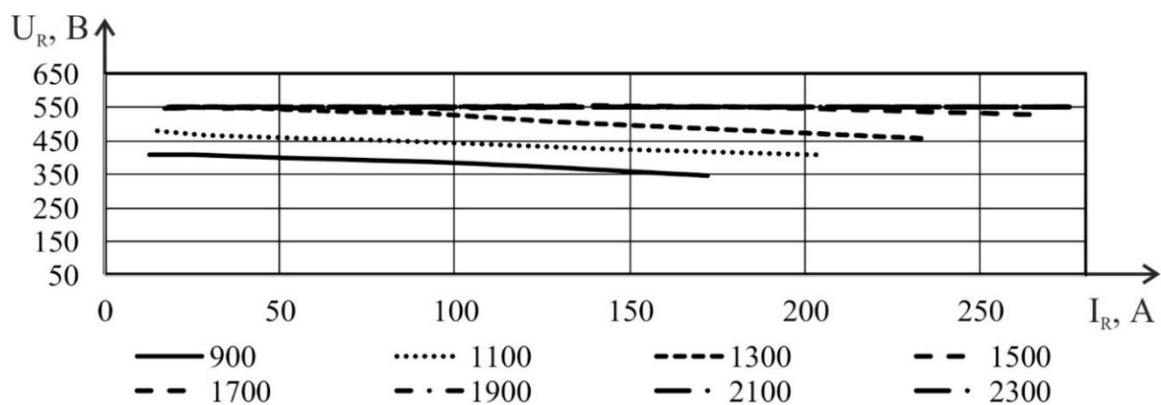


Рисунок 9. Внешние характеристики ВИГ КВ

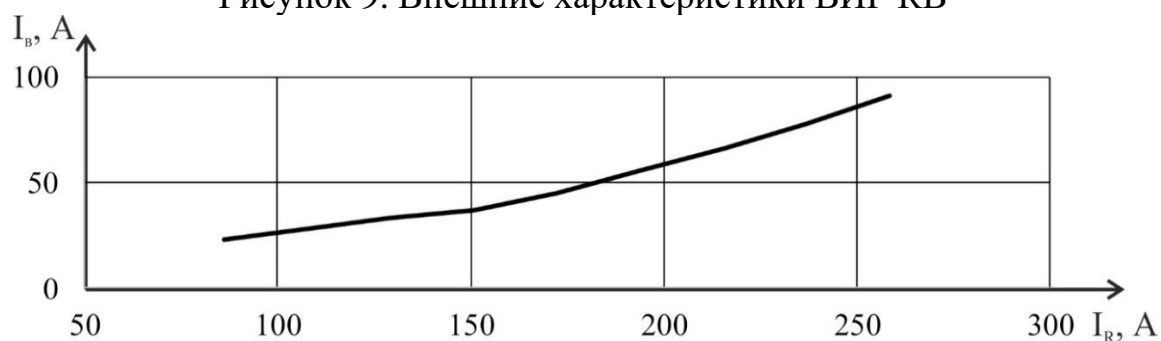


Рисунок 10. Регулировочная характеристика ВИГ КВ

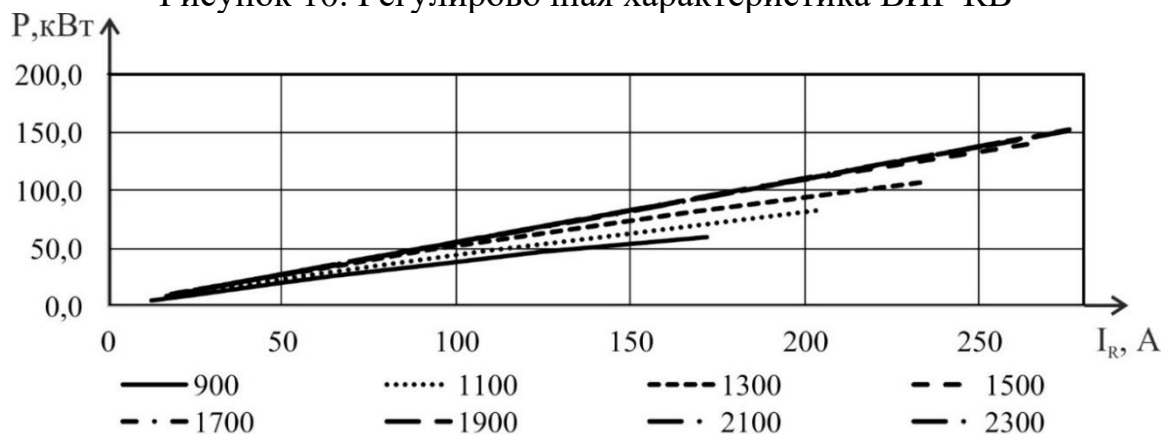


Рисунок 11. Зависимости мощности от тока нагрузки ВИГ КВ

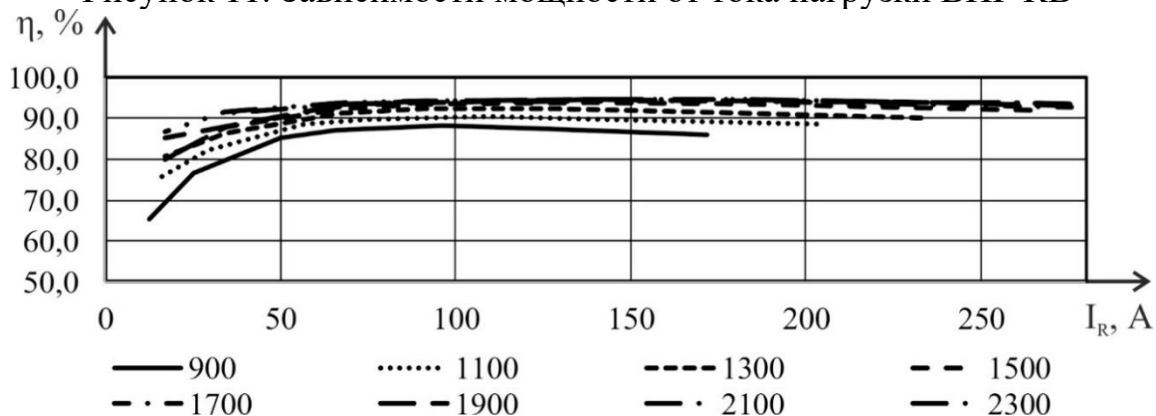


Рисунок 12. Зависимости КПД ВИГ КВ от тока нагрузки

В главе отражены результаты моделирования переходных режимов. Проведены опыты по сбросу и набросу нагрузки (от 10% до 75% от номинала), а также режим короткого замыкания. Значительным

преимуществом данной АЭУ является то что в случае короткого замыкания генерация электрической энергии (рисунок 13).

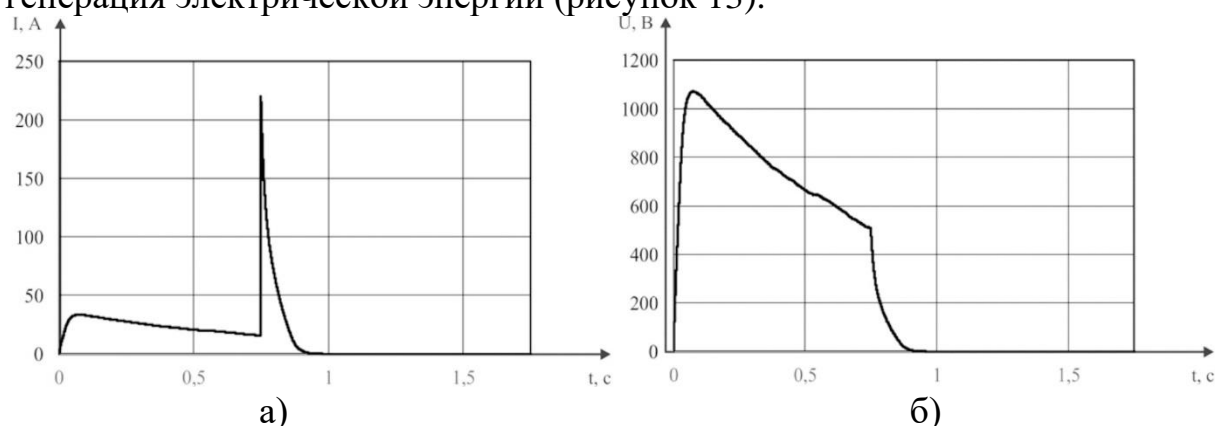


Рисунок 13. а) ток и б) напряжение на выходе АЭУ при коротком замыкании

По результатам можно сделать вывод, что удалось получить простую систему управления ВИГ КВ с точным регулированием выходного напряжения. Данный способ управления позволил исключить перевозбуждение генератора, снизить потери в обмотках, повысить КПД системы на 5-25% и получить стабильное значение напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки и скорости вращения.

В четвертой главе с использованием проведенных исследований был изготовлен образец ВИГ КВ, основные компоненты которого представлены на рисунке 14, на котором проведены экспериментальные исследования.

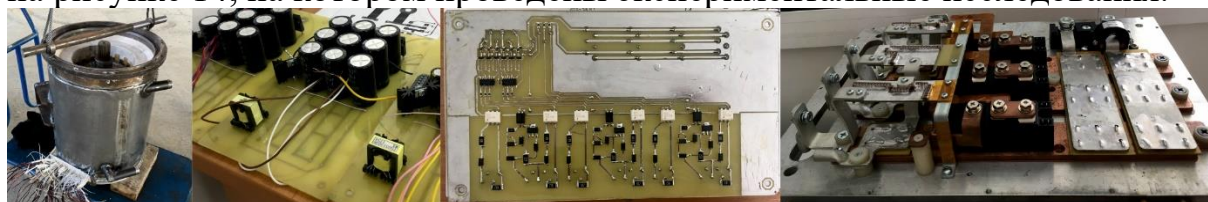


Рисунок 14. Экспериментальный образец ВИГ КВ: а) электрическая машина, б) пусковое устройство, в) драйвер, г) силовая электроника

Эксперименты, проведенные с электрической машиной, позволили получить зависимости индуктивностей фазных обмоток и статического момента от положения ротора. Данные зависимости в большой степени совпадают с результатами расчетов и моделирования. В количественном отношении результаты отличались менее чем на 10%.

Исследования динамических характеристик АЭУ проводились на испытательном стенде. В качестве привода использовался асинхронный двигатель, а в качестве нагрузки выступали тормозные сопротивления различного номинала. В ходе экспериментов с помощью моментной муфты фиксировались значения скорости вращения вала, крутящего момента, с помощью цифрового осциллографа осуществлялись наблюдения за токами и напряжениями фазных обмоток и нагрузки. Исследования проводились для неуправляемого исполнения АЭУ, и с системами управления

представленными на рисунке 7. Были выявлены значительные недостатки в виде коммутационных выбросов напряжения для систем управления представленных на рисунке 7а. Результаты экспериментальных исследований были сопоставлены с результатами моделирования на основе аналитических выражений и моделирования, проведенного в программно-вычислительном комплексе ANSYS на базе конечно-элементной модели электрической машины и принципиальной электрической схемы (рисунок б). Представленные в диссертации данные показывают высокую сходимость. В среднем корреляция между компьютерной моделью и экспериментальными данными составляет $R=0,85$. В количественном отношении среднее отличие между вычислениями с помощью конечно-элементной модели и экспериментальными исследованиями менее 5%, а между вычислениями с помощью конечно-элементной модели и аналитической моделью менее 10%.

После испытаний блок электроники вентильного индукторного генератора был доработан для постоянной установки на генератор. В настоящее время АЭУ на основе ВИГ КВ с тиристорной системой управления током возбуждения установлена на сельскохозяйственный трактор тягового класса 3 в составе электромеханической трансмиссии повышенной экономичности и безопасности совместного производства ООО НПП «Резонанс» и ООО «Зауральский машиностроительный завод». АЭУ в составе электромеханической трансмиссии и сам трактор представлены на рисунке 15.



а)



б)

Рисунок 15 – а) генератор, установленный на раму сельскохозяйственного трактора; б) сельскохозяйственный трактор с электромеханической трансмиссией на выставке

Приложения к диссертационной работе. В Приложении А представлен листинг математической модели ВИГ КВ, основанной на выведенных аналитических выражениях, выполненной в программно-вычислительном комплексе SciLab. В приложения Б - Г содержат результаты исследования ВИГ КГ на компьютерной модели, выполненной в программном комплексе ANSYS. Приложение Д принципиальные электрические схемы отдельных блоков электроники АУЭ. Приложения Е

содержит патенты на изобретения Российской Федерации. Приложение Ж содержит акт о внедрении результатов работы на производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют отметить следующие результаты и сделать выводы:

1. Для исследования электромагнитных процессов в вентильном индукторном генераторе новой конструкции в составе АЭУ и решения вопросов проектирования таких генераторов выведены аналитические системы уравнений на базе которых была разработана математическая модель, положенная в основу инженерной методики проектирования.

2. На основе выведенных систем уравнений впервые была дана методика предварительного определения мощности и параметров компонентов цепи возбуждения новой электротехнической системы, включающей ВИГ КВ с рекомендациями по проектированию.

3. Впервые синтезирована динамическая математическая модель ВИГ КВ на основе конечно-элементной модели с использованием современных вычислительных средств, а именно программно-вычислительного комплекса ANSYS, которая учитывает совместную работу электрической машины, электрических и электронных компонентов системы. Компьютерная модель позволила подробнейшим образом исследовать электромагнитные процессы, протекающие в электрической машине и в электрической схеме системы в различных режимах работы.

4. Предложен и исследован эффективный и простой способ управления выходными координатами АЭУ на основе ВИГ с новой принципиальной схемой с использованием тиристоров для регулирования тока возбуждения путем изменения соотношения между периодами напряжениями прикладываемым к тиристорам и периодами пропуска тока ими. Который позволил исключить перевозбуждение генератора, снизить потери в обмотках, повысить КПД системы на 5-25% в зависимости от режима работы и получить стабильное значение напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки и скорости вращения.

5. Впервые был спроектирован и изготовлен образец АЭУ на основе ВИГ КВ и тиристорным управлением. На экспериментальном образце были проведены исследования на испытательном стенде, результаты которых были сопоставлены с результатами расчетов и моделирования и подтвердили адекватность разработанной инженерной методики, выведенных аналитических выражений и математических моделей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций:

1. Чернышев, А.Д. Анализ достоинств и недостатков автомобильных трансмиссий / А.Д. Чернышев // Грузовик. – 2017. – № 11. – С. 8–14.

2. Чернышев, А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства / А.Д. Чернышев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2018. – №1(18). – С. 5–16.

3. Воронин С.Г. Математическое описание вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением / С.Г. Воронин, А.Д. Чернышев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – № 1 (20). – С. 105–115.

4. Воронин С.Г. Модель вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением / С.Г. Воронин, А.Д. Чернышев // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1 (46). – С. 4–12.

Издания входящие в систему цитирования Scopus:

5. Radionova, L.V. Mathematical description of AFE rectifier closed loop system / L.V. Radionova, A.D. Chernyshev // Procedia Engineering. – 2015. – № 129. – С. 16–21.

6. Radionova, L.V. Mathematical model of the vehicle in MATLAB Simulink / L.V. Radionova, A.D. Chernyshev // Procedia Engineering. – 2015. – № 129. – С. 825–831.

7. Chernyshev, A.D. Comparative analysis of different electrical motor types as a traction drive part in electrical transmission / A.D. Chernyshev, T.A. Lisovskaya, R.A. Lisivskiy // in Proc. 2017 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2017. – 2017.

8. Kulmukhametova, A.S. Development control for an individual-wheel-drive vehicle / A.S. Kulmukhametova, A.D. Chernyshev // in Proc. 2016 2nd International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2016. – 2016.

Другие научные публикации:

9. Чернышев, А.Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии / А.Д. Чернышев // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – № 3. – С. 47–54.

10. Радионов, А.А. Математическая модель движения автомобиля / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Инновационный транспорт. – 2015. – № 4 (18). – С. 69–73.

11. Радионов, А.А. Формирование технических требований к трансмиссии автомобиля / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 85–89.

12. Коровин В.А., Чернышев А.Д. Индукторная электрическая машина // Патент Российской Федерации № 2662233. 2018.

13. Коровин В.А., Чернышев А.Д. Индукторный генератор с совмещенными обмотками возбуждения и статора // Патент Российской Федерации № 2702615. 2019.

Чернышев Алексей Дмитриевич

АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ
ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА
С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать _____ Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ.л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.