

На правах рукописи



Муравьев Артем Артурович

УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ, ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Липецк – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мещеряков Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:

Тутаев Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроника и наноэлектроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

Цветков Павел Евгеньевич, канд. техн. наук., мастер УТЭЦ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Защита диссертации состоится «30» октября 2018 года в 17<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.stu.lipetsk.ru](http://www.stu.lipetsk.ru) при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан «24» августа 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В.И. Бойчевский

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Устойчивая тенденция развития систем генерирования электроэнергии базируется на повышении энергоэффективности электрических систем, достигаемой за счет разработки систем резервного и автономного электроснабжения, что определяет необходимость продолжения работ по совершенствованию систем генерирования электроэнергии и алгоритмов управления генераторными установками. Среди известных систем, вырабатывающих электроэнергию, важное место занимают системы генерирования электроэнергии при переменной частоте вращения вала. Область использования таких систем в настоящее время расширяется и охватывает электроагрегаты (судовые, стационарные, передвижные), управляемые электромеханические системы (транспортные машины, малые ГЭС и ветроэнергетические установки, нагрузочные устройства).

Одной из важных задач является обеспечение потребителей постоянной частотой питающего напряжения при переменной частоте вращения вала источника механической энергии. Применение машины двойного питания (МДП) в таких системах имеет большие перспективы. Конкурентоспособное место в системах генерирования электроэнергии МДП занимает благодаря хорошим регулировочным возможностям.

Анализ существующих систем генерирования электроэнергии показывает, что применение МДП с различными типами преобразователей частоты изучено недостаточно. Малоизученными остаются алгоритмы работы преобразователей частоты, которые являются источниками питания МДП. Недостаточно изучены вопросы, связанные с влиянием нагрузки на энергетические показатели МДП, генерирующей электроэнергию при условии переменной скорости вращения вала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».

Объект и предмет исследования. Объектом являются системы генерирования электроэнергии, реализованные на базе асинхронной машины с фазным ротором, работающей в режиме двойного питания при переменной частоте вращения вала, имеющие релейно-гистерезисные системы формирования токов в обмотках машины. Предметом являются процессы, происходящие в машине двойного питания, работающей в генераторном режиме, при формировании мгновен-

ных значений тока в обмотках ротора, обеспечивающих заданное значение амплитуды и частоты гармонического напряжения на выходах обмотки статора при переменной частоте вращения вала машины.

Цель работы – развитие систем генерирования электроэнергии на базе машины двойного питания с повышением энергоэффективности за счет применения новых схемных решений и совершенствования алгоритмов управления, обеспечивающих регулирование мгновенных значений тока ротора.

Идея работы заключается в разработке электромеханической системы с возможностью рекуперации электроэнергии на базе асинхронной машины с фазным ротором с подключенным к обмотке ротора силовым преобразователем, обеспечивающим выработку электроэнергии с низким коэффициентом нелинейных искажений при изменении частоты вращения вала вниз от номинальной.

Задачи диссертационной работы:

- определение зоны эффективной выработки электроэнергии в диапазоне скорости вращения вала генератора от нуля до номинальной;
- разработка алгоритма управления преобразователем частоты с пониженным числом коммутаций силовых ключей;
- разработка системы автоматического управления МДП, обеспечивающей постоянную частоту и амплитуду выходного напряжения;
- разработка системы управления с векторной коррекцией фазы тока ротора, позволяющей перевести генераторную установку на базе МДП в режим источника реактивной мощности;
- разработка системы торможения высокоинерционных механизмов, оснащенных электроприводом переменного тока на базе асинхронной машины с фазным ротором с обеспечением рекуперации энергии в питающую сеть;
- разработка системы частотного пуска и питания АД в установившемся режиме от электроэнергетической генераторной установки на базе МДП.

Научные результаты, выносимые на защиту:

- способ управления МДП, обеспечивающий генерацию электроэнергии заданного качества, с релейным формированием синусоидального тока в обмотке ротора;
- алгоритм управления автономным инвертором, обеспечивающим синусоидальную форму первой гармонической составляющей с ограничением высших гармонических составляющих тока на выходе;
- система управления автономным генератором, обеспечивающая стабилизацию частоты и амплитуды выходного напряжения;

– система управления генератором и результаты исследований его работы параллельно с сетью;

– имитационная модель и результаты компьютерного моделирования разработанной системы управления МДП, работающей в генераторном режиме;

– результаты экспериментальных исследований МДП, работающей в генераторном режиме.

#### Научная новизна работы:

– разработан новый способ управления машиной двойного питания, работающей в генераторном режиме с выработкой электроэнергии, отличающийся принципом формирования тока возбуждения в обмотке ротора с использованием релейно-гистерезисного регулирования мгновенных значений тока возбуждения с учетом изменения частоты вращения вала, получены зависимости между регулируемыми и выходными переменными машины двойного питания;

– определена рациональная структура и параметры системы рекуперации энергии в сеть, выполненной на базе машины двойного питания, отличающаяся наличием системы регулирования, вырабатывающей управляющие воздействия, позволяющие генераторной установке работать в зоне эффективной выработки электроэнергии;

– разработан метод коррекции положения вектора тока ротора машины двойного питания, обеспечивающий повышение КПД генераторной установки, отличающийся учетом взаимного положения векторов токов статора и ротора и напряжения на выводах обмоток ротора, позволяющий регулировать соотношение между активной и реактивной составляющими вырабатываемой электроэнергии.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается выполненными сравнениями данных, полученных при компьютерном моделировании, с экспериментальными данными, а также определяется отсутствием противоречий с положениями теории электрических машин, электропривода и теории автоматического управления.

#### Теоретическая значимость работы:

– разработан алгоритм релейного управления нелинейным объектом с машиной двойного питания и вентильными преобразователями, позволяющий формировать выходные напряжения с допустимыми отклонениями;

– предложена система управления, обеспечивающая постоянство амплитуды и частоты выходного напряжения генератора при изменении скорости вращения вала генератора.

### Практическая значимость работы:

– обеспечено снижение потерь на ключевых элементах инвертора и увеличение срока его эксплуатации за счет использования нового алгоритма управления ключевыми элементами инвертора;

– повышение энергоэффективности установки за счет инвертирования энергии в питающую сеть или передачи ее автономным потребителям с обеспечением заданного качества вырабатываемой электроэнергии.

Реализация результатов работы. Результаты исследований, полученные при выполнении работы, внедрены в учебный процесс направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), на ООО «ИнтерЭкоТехнологии» г. Липецк, на ПАО «НИПТИЭМ» г. Владимир.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Методология и методы диссертационного исследования. В диссертационной работе поставленные задачи решались с использованием теории автоматического управления, электропривода и электрических машин, а также с применением методов компьютерного моделирования и проведением экспериментальных исследований. Решение уравнений при компьютерном моделировании математических моделей осуществлялось численными методами в программной оболочке MatLAB/Simulink.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты представлялись и обсуждались на Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012» (Иваново 2012); на областном профильном семинаре «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук (Липецк 2013); на Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и автоматика» (Липецк 2014); на VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2014» (Саранск 2014); на международ-

ной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург 2015), на финальном мероприятии по отбору работ по программе У.М.Н.И.К. фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Липецк 2016); на международной XII научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (Липецк 2017), на семнадцатой международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург 2018).

Публикации. Тема диссертации освещена в 12 печатных работах, в том числе 2 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 9 в материалах научных конференций и других изданиях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 116 наименований, и 7 приложений. Общий объем работы – 159 страниц. Основная часть изложена на 136 страницах текста, содержит 116 рисунков, 77 формул, 8 таблиц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, указан объект исследований, сформулированы цель и идея работы, показано соответствие работы тематике специальности, определена научная новизна работы, представлены основные защищаемые положения, а также результаты апробации и реализации работы.

**В первой главе** проведен анализ систем генерирования электроэнергии при переменной скорости вращения вала. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих систем. Проведенный анализ показал, что использование в системах генерирования электроэнергии машины двойного питания (МДП) экономически целесообразно в виду снижения требуемой мощности преобразователя частоты, установленного в цепи ротора, по сравнению с другими электроэнергетическими системами. Отмечена особенность работы МДП в режиме генератора при скорости ниже синхронной. Рассмотрен вопрос применения МДП в нагрузочных устройствах. Определены желаемые характеристики системы генерирования на базе МДП для испытательных стендов. Приведен анализ энергетических характеристик преобразователей частоты, устанавливаемых в роторную цепь асинхронной машины, с точки зрения коммутаций силовых ключей. Отмечена зависимость потерь энергии от количества коммутаций элементов преобразователя.

В заключении отмечается необходимость совершенствования алгоритмов управления преобразователем частоты в цепи ротора МДП, применяемой в системах генерирования электроэнергии.

**Во второй главе** проведено исследование машины двойного питания, генерирующей электроэнергию при переменной скорости вращения. Для математического описания асинхронной машины с фазным ротором (АДФР) была выбрана неподвижная система координат  $\alpha$ - $\beta$  с ориентацией оси  $\alpha$  по оси фазы А. С учетом допущений уравнения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1\alpha} = r_1 \cdot i_{1\alpha} + L_{1s} \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \frac{di'_{2\alpha}}{dt} \right); \\ u_{1\beta} = r_1 \cdot i_{1\beta} + L_{1s} \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{1\beta}}{dt} + \frac{di'_{2\beta}}{dt} \right); \\ u'_{2\alpha} = r'_2 \cdot i'_{2\alpha} + L'_{2s} \frac{di'_{2\alpha}}{dt} + L_m \left( \frac{di'_{2\alpha}}{dt} + \frac{di_{1\alpha}}{dt} \right) + \omega p_n L'_{2s} i'_{2\beta} + \omega p_n L_m (i_{1\beta} + i'_{2\beta}); \\ u'_{2\beta} = r'_2 \cdot i'_{2\beta} + L'_{2s} \frac{di'_{2\beta}}{dt} + L_m \left( \frac{di'_{2\beta}}{dt} + \frac{di_{1\beta}}{dt} \right) - \omega p_n L'_{2s} i'_{2\alpha} - \omega p_n L_m (i_{1\alpha} + i'_{2\alpha}); \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m (i_{1\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}); \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $r_1$  – активное сопротивление статора;  $r'_2$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $L_{s1}$  – индуктивность рассеяния статора;  $L'_{s2}$  – приведенная индуктивность рассеяния ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $u_{1\alpha}$  – напряжение статора по оси  $\alpha$ ;  $u_{1\beta}$  – напряжение статора по оси  $x$ ;  $u'_{2\alpha}$  – приведенное напряжение ротора по оси  $\alpha$ ;  $u'_{2\beta}$  – приведенное напряжение ротора по оси  $\beta$ ;  $i_{1\alpha}$  – ток статора по оси  $\alpha$ ;  $i_{1\beta}$  – ток статора по оси  $\beta$ ;  $i'_{2\alpha}$  – приведенный ток ротора по оси  $\alpha$ ;  $i'_{2\beta}$  – приведенный ток ротора по оси  $\beta$ ;  $p_n$  – число пар полюсов;  $M$  – электромагнитный момент,  $M_c$  – момент статический,  $J$  – момент инерции;  $\omega$  – частота вращения ротора.

Математическая модель исследована с помощью метода компьютерного моделирования в программной оболочке MatLAB/Simulink. При выполнении исследования частоту напряжения ротора изменяли по формуле:

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_p \cdot p, \quad (2)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314$  рад/с,  $p$  – число пар полюсов.

В результате построена зависимость между амплитудой напряжения ротора и скоростью вращения вала (рисунок 1, а).

Исследование величины напряжения ротора при изменении скорости вращения вала при неизменном токе ротора показало широкий диапазон изменения напряжения, что привело к необходимости построения баланса активной мощности (рисунок 1, б).



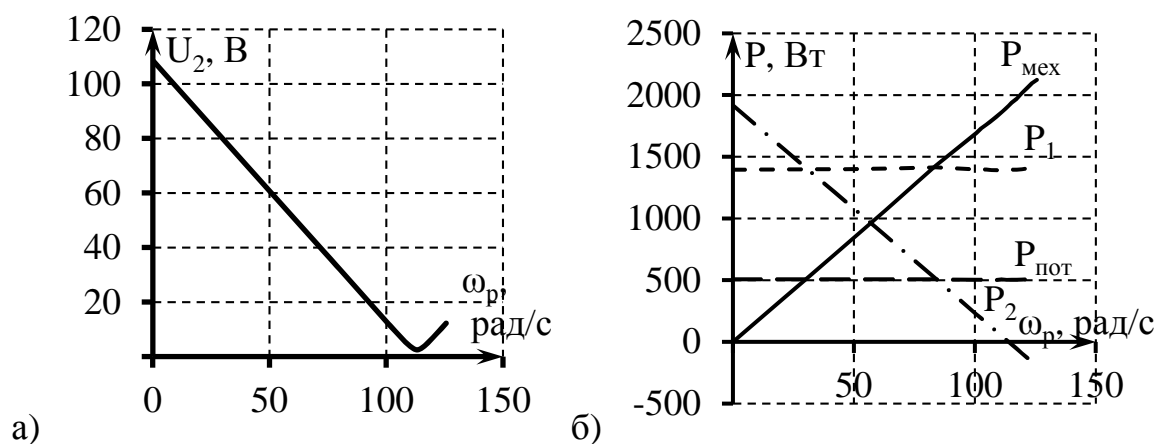


Рисунок 1 – Зависимость: а – между требуемым напряжением ротора и скоростью вала; б – мощности от скорости вращения вала

Мощности рассчитывались по следующим формулам:

$$\begin{cases} P_1 + P_{\text{пот}} = P_{\text{мех}} + P_2; \\ P_{\text{пот}} = 3I_1^2 R_1 + 3(I'_2)^2 R'_2; \\ P_{\text{мех}} = M\omega_p; \\ P_1 = 3U_{1\phi} I_1; \\ P_2 = 3U_{2\phi} I'_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_1$  – ток статора,  $I'_2$  – приведенный ток ротора,  $R_1$  – сопротивление статора,  $R'_2$  – приведенное сопротивление ротора,  $M$  – момент на валу,  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение статора,  $U_{2\phi}$  – фазное напряжение ротора.

Исследовано влияние нагрузки в цепи статора на баланс мощностей. В результате были построены кривые равенства мощностей статора, ротора и механической мощности и отмечены зоны энергетических режимов (рисунок 2, а). Проведено исследование КПД системы. Оно показало снижение КПД при уменьшении скорости и при уменьшении момента, поэтому для наглядного представления их совместного влияния был построен трехосевой объемный график  $\eta=f(\omega, M)$  (рисунок 2, б).

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{P_1 - P_2}{P_{\text{мех}}} \quad (4)$$

На рисунке 2, а зона I является наиболее оптимальной с точки зрения энергоэффективности. В этой зоне механическая энергия полностью покрывает потребление энергии по цепи статора и частично компенсирует потери.

Работа установки в зонах III, IV нецелесообразна с точки зрения энергоэффективности, т.к. потребляемая мощность по цепи ротора превышает мощность отдаваемую. В этих зонах установку рекомендуется использовать только в кратковременном режиме при условии обязательного поддержания момента.

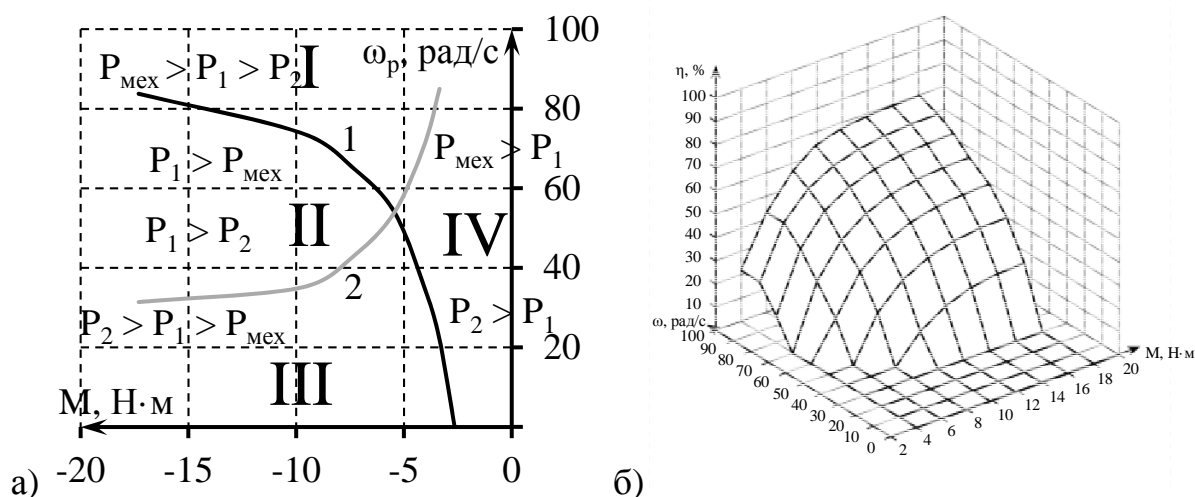


Рисунок 2 – Характеристики энергоэффективности: а – зоны энергетических режимов; б – КПД системы

Для построения системы управления были получены и построены механические характеристики разомкнутой системы (рисунок 3, а). Зависимость амплитуды напряжения ротора от частоты при условии постоянства напряжения на статоре приведена на рисунок 3, б.

Установлено, что при неизменном моменте и нагрузке при изменении частоты вращения амплитуда и частота должны изменяться по линейной зависимости, что допускает использование скалярной системы управления.

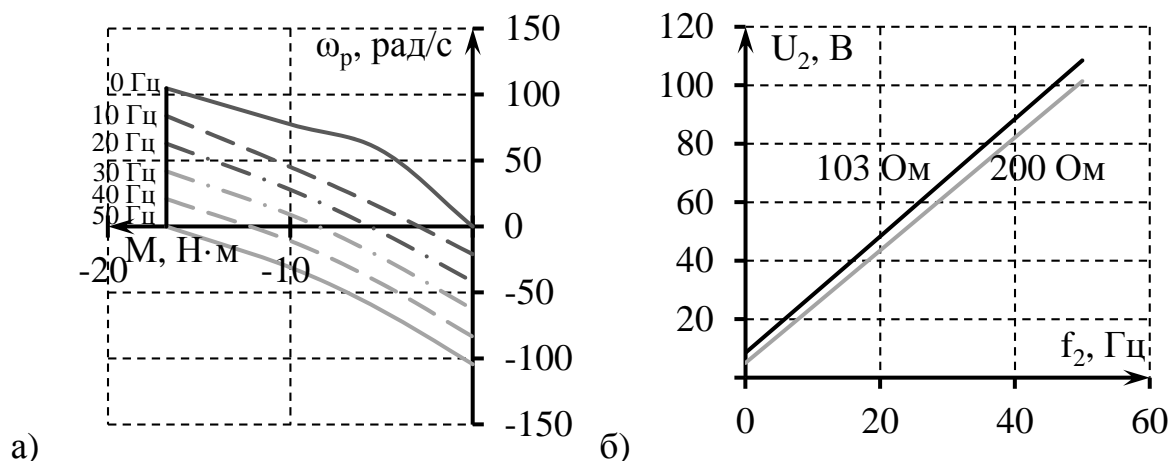


Рисунок 3 – Зависимости между переменными разомкнутой системы: а – механические характеристики; б – закон управления

Была построена скалярная система управления током ротора с коррекцией угла между током ротора и током намагничивания. Такая система позволяет регулировать амплитудное значение тока ротора, которое влияет на ток статора и момент. Регулирование частоты тока ротора позволяет регулировать частоту на выходе генератора. Регулирование угла тока ротора относительно тока намагничивания позволяет изменять потребление реактивной мощности по цепи ротора,

следовательно, будет изменяться потребление реактивной мощности и по цепи статора, и при уменьшении потребления избыточная реактивная мощность конденсаторов, которые установлены в цепь статора для возбуждения машины, может отдаваться в сеть.

**Третья глава** посвящена разработке способа управления МДП, базирующегося на алгоритме релейного управления преобразователем частоты в цепи ротора с уменьшенным количеством коммутаций ключей для снижения динамических потерь в преобразователе.

Схема установки с релейной системой управления представлена на рисунке 4, на котором используются следующие обозначения: 1 – МДП; 2 – источник механической энергии; 3 – ПЧ; 4 – инвертор; 5 – выпрямитель; 6 – нагрузка; 7, 25 – блок релейных регуляторов; 8, 22 – формирователь задания на ток; 9 – блок ограничения; 10 – регулятор скорости; 11, 14, 24 – сумматор; 12 – задание на напряжение; 13 – датчики напряжения; 15 – задание на частоту; 16 – коэффициент ОС; 17 – датчик скорости; 18 – дополнительный коммутатор; 19 – диод; 20 – реактор; 21 – блок определения участка сигнала задания на ток; 23 – блок ОС, 26 – блок с таблицей переключений. Релейный алгоритм работы силовых элементов преобразователя обеспечивает близкие к синусоидальным токи на выходе инвертора. Но для достижения удовлетворительного качества мгновенных значений тока необходимо коммутировать ключи инвертора с высокой частотой, что приводит к большим динамическим потерям. Снижение количества коммутаций позволяет снизить потери и повысить КПД инвертора. Для снижения количества коммутаций были предложены три алгоритма. Алгоритмы работы ключей основываются на делении сигнала задания синусоидального тока инвертора на участки (рисунок 5, а). Ключ, установленный между неуправляемым выпрямителем и инвертором, позволяет регулировать величину отдаваемой выпрямителем энергии, и тем самым в алгоритме работы ключей инвертора на определенных участках можно зафиксировать состояния двух ключей инвертора. На рисунке 5, б представлена схема силовой части инвертора. Исследуемая модель приведена на рисунке 6. Результаты показали, что первый алгоритм сократил количество коммутаций ключей инвертора на треть. Во втором предложенном алгоритме на каждом участке сигнала задания на ток фиксированное состояние определялось для четырех ключей инвертора, что сократило количество коммутаций относительно исходного варианта.

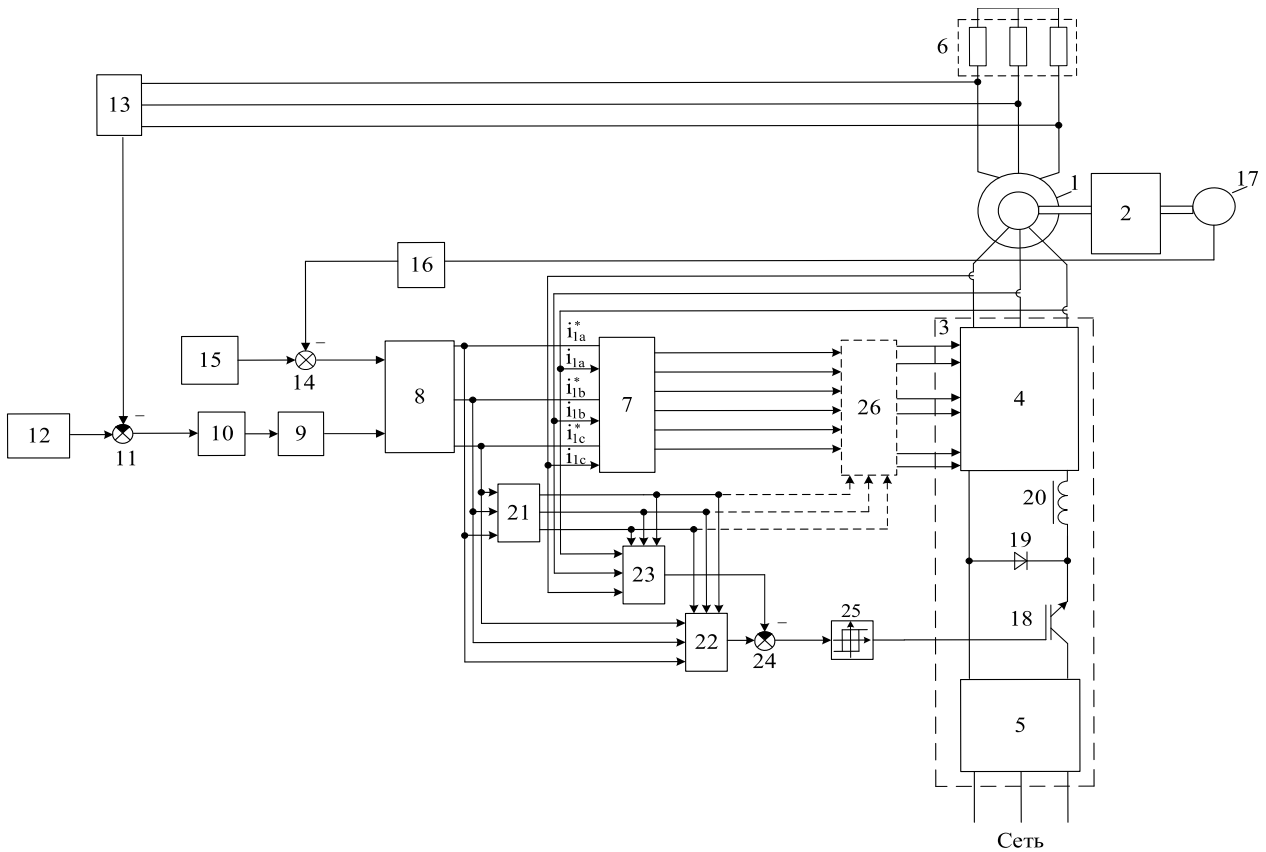


Рисунок 4 – Схема установки с релейной системой управления

В таблице 1 приведены состояния ключей для всех участков задания на ток. Второй алгоритм имел недостаток – увеличение коэффициента нелинейных искажений. Максимальное отклонение тока от синусоиды происходило при переходе с участка на участок. Для уменьшения коэффициента нелинейных искажений предложен третий алгоритм работы, который совмещает достоинства первого и второго. За основной принят второй алгоритм, но при приближении к точке G для снижения отклонения от заданной синусоиды происходит переключение на первый алгоритм.

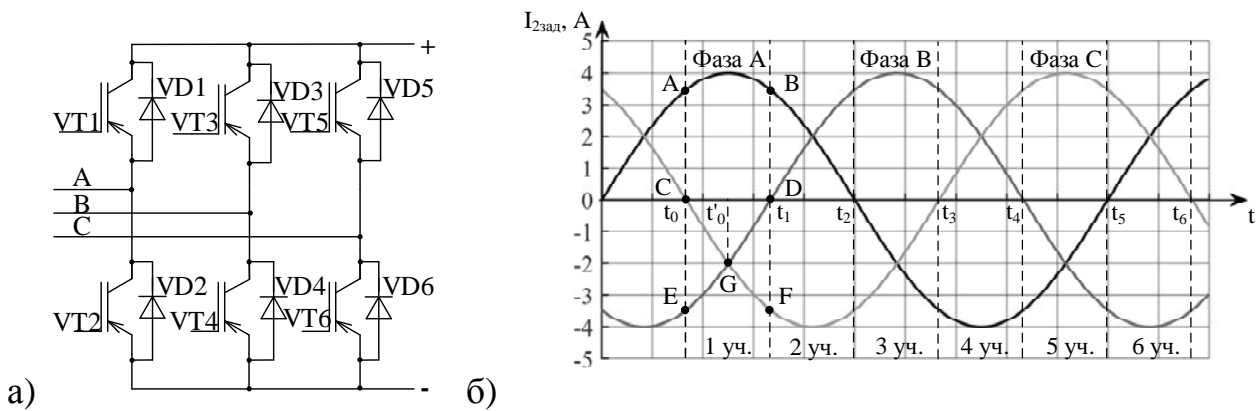


Рисунок 5 – Схема и зоны работы ключей мостового инвертора: а – схема соединения ключевых элементов; б – сигналы задания выходного тока

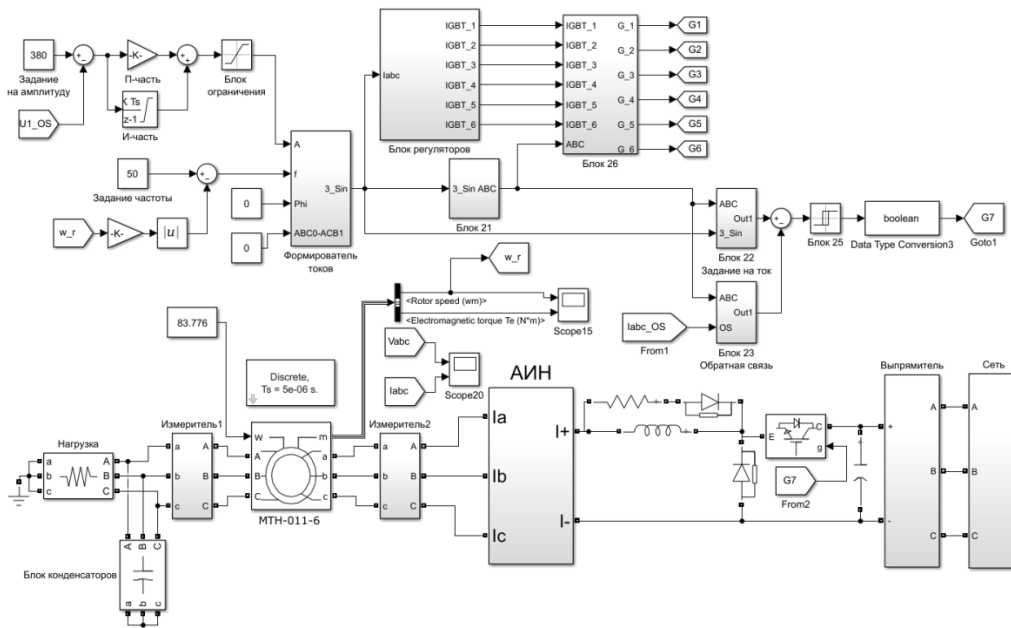


Рисунок 6 – Общий вид модели системы в программе Matlab/Simulink

Время работы первого алгоритма составляет 10% от периода синусоиды задания. Временная диаграмма коммутаций ключей инвертора для третьего алгоритма приведена на рисунке 7, а. График выходного тока преобразователя представлен на рисунке 7, б.

Таблица 1 – Второй алгоритм работы ключей инвертора

	1 уч.		2 уч.		3 уч.		4 уч.		5 уч.		6 уч.	
Ключ VT1	1 (VT7)		1	P	P	0	0 (VT7)	0	P	P	1	
Ключ VT2	0 (VT7)		0	P	P	1	1 (VT7)	1	P	P	0	
Ключ VT3	0	P	P	1	1 (VT7)	1	P	P	0	0 (VT7)		
Ключ VT4	1	P	P	0	0 (VT7)	0	P	P	1	1 (VT7)		
Ключ VT5	P	0	0 (VT7)	0	P	P	1	1 (VT7)	1	P		
Ключ VT6	P	1	1 (VT7)	1	P	P	0	0 (VT7)	0	P		

Результаты исследования несинусоидальности токов и напряжений на выходе инвертора и генератора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение алгоритмов

Алгоритм	I <sub>2</sub>		U <sub>1</sub>		I <sub>1</sub>		K <sub>Σ</sub> за 0,1 с.
	Амп., А	КНИ, %	Амп., В	КНИ, %	Амп., А	КНИ, %	
Эталонный	3,972	3,55	316,1	0,06	6,459	2,03	7400
Первый	3,985	3,67	317	0,36	6,478	2,03	3700
Второй	4,015	4,37	319,5	1,14	6,529	2,69	1600
Третий	4,017	3,67	319,7	0,72	6,532	2,17	2200

В столбцах указано амплитудное значение параметра и значение коэффициента нелинейных искажений в процентах. В последнем столбце указано суммарное количество коммутаций всех ключей за 0,1 секунды.

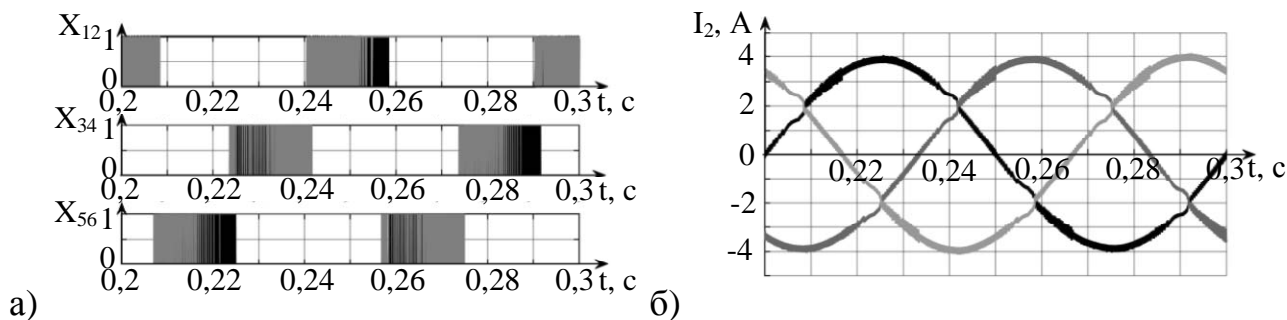


Рисунок 7 – Временные диаграммы: а – коммутации ключей инвертора при третьем алгоритме; б – выходного тока преобразователя

Таким образом, третий алгоритм имеет некоторые преимущества, например, работают только три ключа в режиме релейного коммутирования, а в эталонном - шесть ключей. Если учесть зоны переходных режимов, когда одна пара ключей сменяет другую, что составляет не более 10% от периода, то общее количество коммутаций ключей сокращается в 3,4 раза. При этом несинусоидальность выходного тока инвертора ухудшается менее чем на 1%.

Проведен анализ работы системы при различных внешних воздействиях. Исследован режим «сброс-наброс» нагрузки, и проведена оценка уровня перенапряжений и провалов напряжения. Изменения напряжений на выходе генератора оставались в допустимых пределах согласно ГОСТ 13109-97. Исследована работа на активно-индуктивную нагрузку. В результате компьютерного моделирования установлено, что система генерирования электроэнергии, реализованная на базе МДП, может быть использована для питания асинхронного двигателя при частотном пуске и в установившихся режимах (рисунок 8).

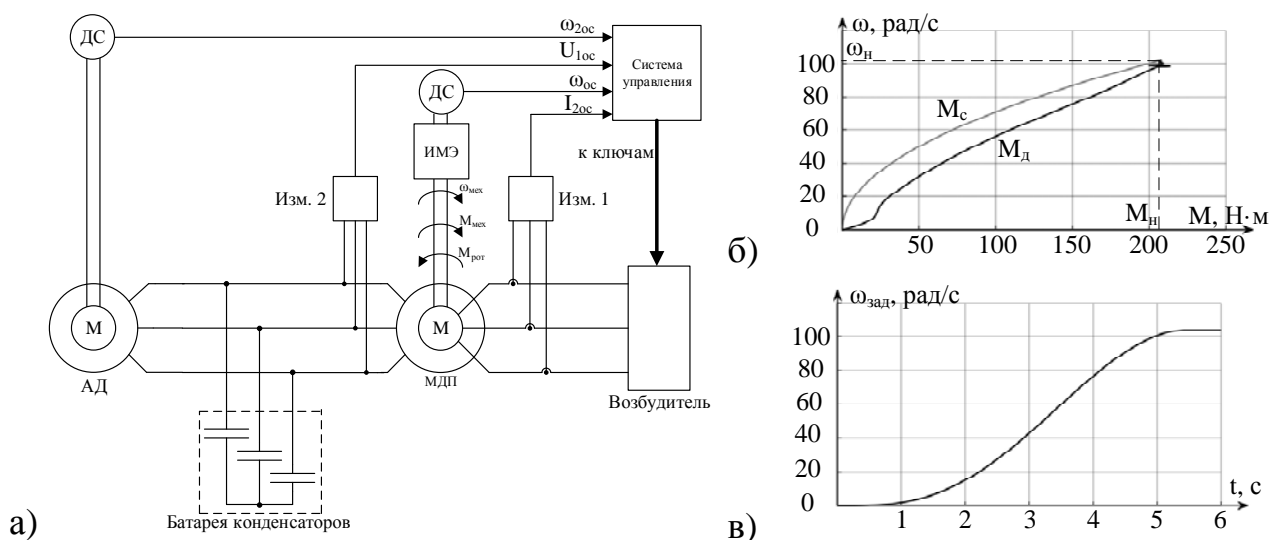


Рисунок 8 – Схема и графики пуска АД от МДП: а – функциональная схема; б – механическая характеристика; в – задание на скорость

Для повышения устойчивости систем формируется плавный сигнал задания. Для этого используется задатчик интенсивности с S-образной временной характеристикой (рисунок 8, в)

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, подтверждающим теоретические выкладки и адекватность компьютерной модели. Рассмотрена работа генераторной установки параллельно с сетью при поддержании постоянного момента нагрузки и в режиме источника реактивной мощности. Исследована возможность применения МДП в машине правки растяжением. Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 9, а. Внешний вид установки приведен на рисунке 9, б. Построена диаграмма баланса активной мощности по данным эксперимента и моделирования (рисунок 9, в). Отмечена удовлетворительная сходимость результатов. Подтверждена работоспособность релейного алгоритма при различных заданиях на амплитуду и частоту тока ротора. Определено, что эффективная работа генераторной установки обеспечивается в зоне вблизи синхронной частоты, а значит частота тока ротора меньше частоты тока статора.

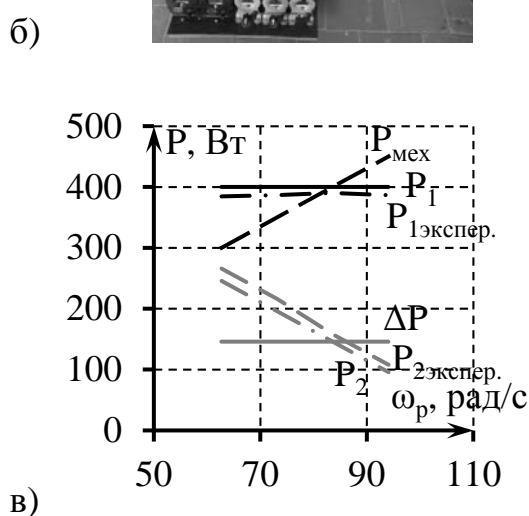
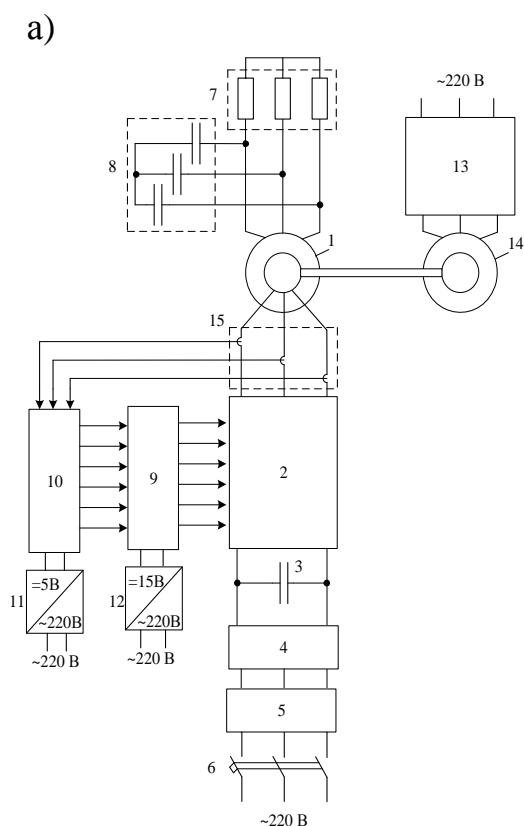


Рисунок 9 – Результаты экспериментальных исследований: а – функциональная схема установки; б – внешний вид; в – результаты экспериментов

Следовательно, для возбуждения машины по цепи ротора потребуется меньшее количество реактивной энергии, которую обеспечит конденсатор, установленный в преобразователе частоты роторной цепи. При возбуждении через цепь ротора излишки реактивной энергии конденсаторов будут отдаваться в сеть. Регулирование реактивной мощности в цепи ротора осуществляется путем векторной коррекции угла между током ротора и главным потокосцеплением. На рисунке 10, а представлен график изменения мощности, отдаваемой в сеть, при воздействии на угол дополнительного сдвига фазы тока ротора  $\psi$ . Многие технологические процессы, реализуемые механизмами, на которых установлены АДФР, протекают при неизменном моменте, поэтому был рассмотрен режим реализации постоянства тормозного момента. При торможении с максимально возможным КПД и постоянным моментом необходимо поддерживать постоянное значение амплитуды тока ротора и угла между токами статора и ротора. На рисунке 10, б приведен график зависимости КПД от тока ротора, на котором видно увеличение КПД при нагрузках, близких к номинальным.

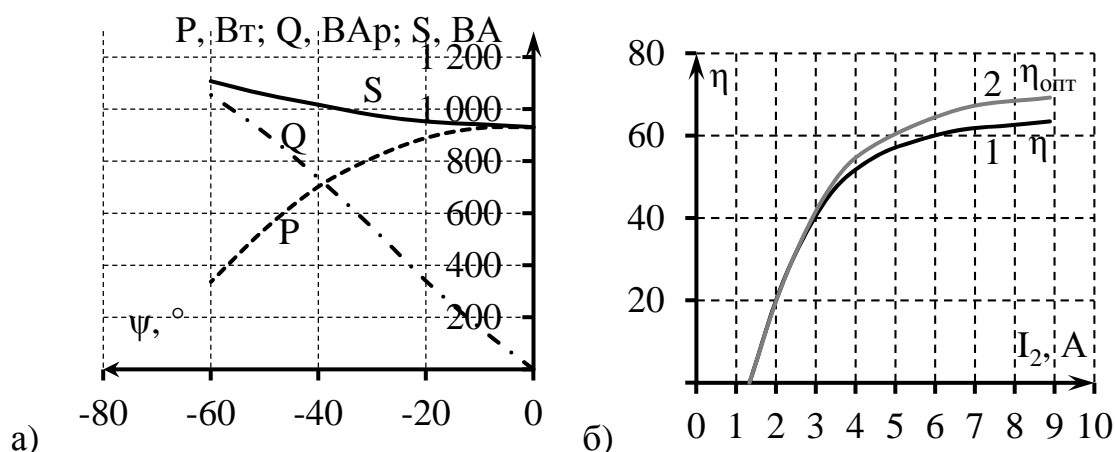


Рисунок 10 – Графики характеристик установки с векторной коррекцией: а – отдаваемая мощность при регулировании угла  $\psi$ ; б – КПД установки при оптимальном управлении

В электроприводах с частыми пусками и торможениям можно эффективно использовать рекуперацию энергии в сеть во время торможения. Разработанные алгоритмы могут применяться для двигательных режимов АДФР. Показана возможность запуска и торможения с разработанной системой, включенной в старторную цепь (рисунок 11, а). Запасенная кинетическая энергия во время пуска рекуперирована по цепи ротора в сеть. На рисунке 11, б, в приведены переходные процессы в системе. Проведено исследование и показано, что применение системы с рекуперацией энергии в сеть при торможении в высокоинерционных механизмах является экономически целесообразным.



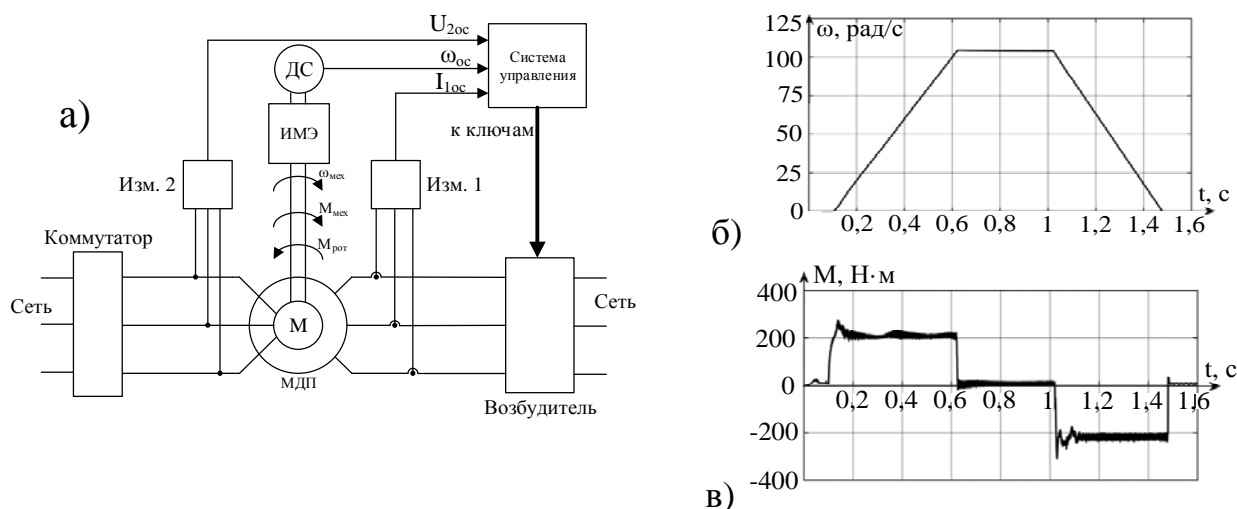


Рисунок 11 – Схема и графики работы системы электропривода с рекуперацией энергии: а – функциональная схема; б – график  $\omega(t)$ ; в – график  $M(t)$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в диссертационной работе исследований была решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке генераторной установки с асинхронной машиной, включенной по схеме машины двойного питания с подключением обмоток ротора к силовому преобразователю, управляемому алгоритмом, уменьшающим количество коммутаций силовых ключей. Генераторная установка обладает высокими энергетическими показателями и позволяет осуществлять отдачу в сеть энергии высокого качества и поддержание постоянного тормозного момента при переменной скорости вращения вала.

Основные результаты, полученные в диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Определены зоны эффективной выработки электроэнергии с КПД 60-70% генераторной установки на базе МДП малой мощности до 1,4 кВт в диапазоне скорости вращения вала генератора 75-100% от синхронной и нагрузках 75-100% от номинальной.

2. Разработанный алгоритм управления преобразователем частоты снижает количество коммутаций в 3,4 раза при повышении коэффициента нелинейных искажений на 9% относительно исходного значения, что позволяет снизить динамические потери в преобразователе и увеличить срок его службы.

3. Предложенная система управления МДП позволяет поддерживать на выходе генератора постоянную частоту 50 Гц и амплитуду выходного напряжения 380 В при переменной частоте вращения вала генератора от нуля до синхронной с предельными отклонениями по напряжению –  $\pm 10\%$ , по частоте –  $\pm 0,4$  Гц.

4. Генераторная установка на базе МДП с векторной коррекцией фазы тока ротора может быть использована в качестве источника реактивной мощности с отдачей до 70% в числовом эквиваленте от номинальной активной мощности.

5. Разработана система электропривода, реализующая торможение асинхронного двигателя, работающего в режиме МДП, для применения в высокоинерционных механизмах, обеспечивающая рекуперацию энергии в питающую сеть с поддержанием постоянного тормозного момента.

6. Разработана система частотного пуска и питания асинхронного двигателя в установившемся режиме от электроэнергетической генераторной установки на базе МДП, содержащей преобразователь частоты, установленный в цепи ротора, мощность которого в два раза меньше мощности преобразователя частоты, используемого в системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованные ВАК РФ:

1. Муравьев, А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания / Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 4. С. 45-49.

2. Муравьев, А.А. Электроэнергетическая установка на базе машины двойного питания с релейной системой управления возбуждением / Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 6. С. 26-32.

Публикации в других изданиях:

3. Muravyev, A.A. Induction Generator Based on Doubly-Fed Machine / Meshcheryakov V.N., Muravyev A.A., Boikov A.I. // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). Ekaterinburg. 2018. P. 1-5. DOI:10.1109/ACED.2018.8341719.

4. Муравьев, А.А. Частотный асинхронный электропривод с минимизацией потерь энергии / Мещеряков В.Н., Левин П.Н., Синюкова Т.В., Муравьев А.А. // АЭП-2012: труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново. 2012. С.152-154.

5. Муравьев, А.А. Определение диапазона скорости вращения ротора асинхронной машины ветрогенератора / Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. // «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук: материалы областного профильного семинара. Липецк: ЛГТУ, 2013. С. 189-191.

6. Муравьев, А.А. Асинхронный электропривод на базе автономного инвертора тока с релейным регулированием напряжения и широтно-импульсной

модуляцией / Муравьев А.А., Кретов С.С. // Автоматизированный электропривод и автоматика: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. Липецк: ЛГТУ, 2014. С.53-56.

7. Муравьев, А.А. Частотный асинхронный электропривод на базе автономного инвертора тока с релейным регулированием / Мещеряков В.Н., Башлыков А.М., Муравьев А.А. // АЭП-2014: труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С.66-70.

8. Муравьев, А.А. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода / Мещеряков В.Н., Муравьев А.А., Башлыков А.М., Мещерякова О.В. // Электроприводы переменного тока: труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург. 2015. С.175-178.

9. Муравьев, А.А. Генераторная установка на базе машины двойного питания / Мещеряков В. Н., Муравьев А.А. // «Информационные системы и технологии» ИСТ–2016: материалы XXII международной научно-технической конференции. Нижний Новгород, 2016. С. 209.

10. Муравьев, А.А. Системы управления асинхронной машиной с фазным ротором с вентильными преобразователями в цепи ротора / Муравьев А.А., Бойков А.И. // «Современные сложные системы управления» (HTCS'2017): материалы XII международной научно-практической конференции. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. С.159-163.

11. Муравьев, А.А. Система пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором / Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Муравьев А.А. // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. на- уч. трудов (выпуск 4) / под ред. С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. С.204-208.

12. Муравьев, А.А. Способ управления автономным асинхронным генератором: пат. 2606643 Рос. Федерация. № 2015135745 / Мещеряков В.Н., Муравьев А.А.; заявл. 21.08.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. 12 с.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: разработка и анализ системы генерирования электроэнергии на базе МДП [1, 3], разработка алгоритмов управления автономным инвертором [2, 8, 12], анализ и компьютерное моделирование асинхронных электроприводов с релейной системой управления [4, 6, 7, 10, 11], анализ и компьютерное моделирование систем на базе МДП [5, 9].