

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Омский государственный технический университет"

На правах рукописи



ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТИХОХОДНЫХ
СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты
Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Андреева Елена Григорьевна

Омск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ, СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТИХОХОДНЫХ СМПМ В СОСТАВЕ ВЭТК ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	31
1.1. Обзор конструкций и классификация тихоходных СМПМ в составе установок генерации электроэнергии и электропривода. Анализ методов и способов повышения энергоэффективности тихоходных СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса.	31
1.2. Структурные схемы ВЭТК на основе тихоходных СМПМ генерирования электроэнергии и электропривода возвратно-поступательного движения потребителей малой мощности.	43
1.3. Особенности рабочего процесса тихоходных синхронных генераторов и функциональные схемы ВЭТК ВЭУ.	50
1.4. Особенности рабочего процесса и функциональные схемы ВЭТК ЛМЭП на основе СДПМ возвратно-поступательного действия для испытаний реологических характеристик эластомеров.....	60
1.5. Особенности рабочего процесса и функциональные схемы ВЭТК ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора.	67
1.6. Постановка задачи исследования.	73
1.7. Выводы.	75

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ НА ЗАДАННУЮ НАГРУЗКУ.....77

2.1. Выявление возможностей и практических путей обеспечения современных требований к параметрам тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов на основе анализа критериев оптимальности. 77

2.2. Математическая формулировка и решение задачи оптимизации параметров тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в генераторном и двигательном режимах работы в едином электротехническом комплексе. 86

2.3. Определение связи между энергетическими показателями работы электротехнических комплексов и конструктивными параметрами тихоходных СМПМ, устанавливаемых решением задачи оптимизации. 126

2.4. Выводы 138

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПО КРИТЕРИЮ ОДИНАКОВОЙ ОБЪЕМНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ..... 140

3.1. Решение осесимметричной краевой задачи для стационарного магнитного поля СМПМ в цилиндрической системе координат..... 140

3.2. Решение трехмерной краевой задачи для стационарного магнитного поля в прямоугольной системе координат..... 151

3.3. Методика идентификации параметров высококоэрцитивных постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности. 163

3.4. Выводы	167
ГЛАВА 4. ТИХОХОДНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ В СОСТАВЕ ВЕТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	169
4.1. Синхронные генераторы модульного типа: конструкция, моделирование и экспериментальное исследование эксплуатационных и аварийных режимов.....	169
4.2. Синхронные генераторы с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ветроэнергетических установок: конструкция, моделирование и экспериментальное исследование.	183
4.3. Выводы	197
ГЛАВА 5. ТИХОХОДНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ПРИВОДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.	199
5.1. Математическое представление опытного образца эластомера и исследование его релаксационных характеристик при заданной деформации.....	199
5.2. Обоснование базовой конструкции, моделирование и экспериментальное исследование линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров.	218
5.3. Обоснование базовой конструкции, моделирование и экспериментальное исследование тихоходного длинноходового СДПМ в составе привода поршневых компрессорных ступеней для сжатия холодильных агентов и криогенных газов.....	249
5.4. Выводы.	264
ГЛАВА 6. АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. ..	265
6.1. Принцип управления тихоходными СГПМ модульного типа на основе нейронной сети.....	265

6.2 Решение задачи оптимального управления ЛМЭП тихоходного длинноходового линейного одноступенчатого поршневого компрессора. ..	272
6.3. Принцип реализации системы управления линейного магнитоэлектрического привода для испытания реологических характеристик опытных образцов эластомеров.	281
6.4. Выводы.	285
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	287
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	291
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	318

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ, СОКРАЩЕНИЙ

Условные обозначения

C_A – постоянная Арнольда;

C – постоянная машины;

μ – относительная магнитная проницаемость материала;

J – плотность тока;

\bar{A} – векторный потенциал магнитного поля;

$\bar{\Psi}$ – функция магнитного потока;

\bar{B} – вектор магнитной индукции;

B_δ – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре;

α' – коэффициент полюсного перекрытия;

ℓ' – расчетная длина сердечника;

A – линейная токовая нагрузка;

k_f – коэффициент формы;

γ – удельная электропроводность;

δ – величина воздушного зазора;

u^* – относительное напряжение при нагрузке;

k_u – коэффициент использования;

\dot{E}_0 – ЭДС от основного магнитного потока индуктора;

$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы в прямоугольной системе координат;

ε – относительная деформация;

σ – механическое напряжение;

$E(t)$ – динамический модуль упругости опытного образца эластомера;

x – ход индуктора;

x_m – половина хода перемещения индуктора;

P_r^* – относительные потери в СМППМ;

$P_{\text{мех}}$ – среднее значение механической мощности;

$S_{\text{обм.акт}}$ – площадь поперечного сечения активной части витков обмотки;

$m_{\text{обм.акт}}$ – масса активной части обмотки тихоходного СДППМ;

Q_B – внешняя сила;

L – индуктивность обмотки якоря;

R – активное сопротивление обмотки якоря;

Q_d – добротность обмотки якоря;

W_a – суммарное число активных витков обмотки якоря, сцепляющихся магнитным потоком постоянных магнитов.

Индексы

d – проекция s на оси d ;

q – проекция s на оси q ;

r, z, θ – проекция на оси в цилиндрической системе координат;

m – амплитудное значение;

НОМ – номинальное значение;

уд.мах – удельный максимум.

Сокращения

ЭМП – электромеханический преобразователь;

ВЭТК – высокотехнологичный электротехнический комплекс;

ЛМЭП – линейный магнитоэлектрический привод;

ЛМЭД – линейный магнитоэлектрический двигатель;

ВЭУ – ветроэнергетическая установка;

ПК – поршневой компрессор;

МГП – массогабаритные показатели;

СМПМ – синхронная магнитоэлектрическая машина с постоянными магнитами;

СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами;

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами;

ПМ – постоянный магнит;

ЭМ – электромагнит;

МКЭ – метод конечных элементов;

КЭ – конечный элемент;

ПВР – последовательная верхняя релаксация;

ПО – программное обеспечение;

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений;

УУ – устройство управления;

ЭДУ – электродвигательное устройство;

ПР – преобразователь;

ЭС – электрическая сеть;

ВУС – вязкоупругая система;

КС – компрессорная ступень;

РМ – рабочая машина.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Прогресс в области создания магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов (РЗМ), внедрение новых изделий и устройств на их основе, расширение ассортимента выпускаемой продукции и снижение их стоимости определяют тенденции развития высокотехнологичных электротехнических комплексов (ВЭТК), в составе которых используются синхронные магнитоэлектрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами (СМПМ). Отсутствие затрат на возбуждение магнитного потока, а также постоянно возрастающие требования к росту максимальной удельной энергии постоянных магнитов (ПМ) при общем многообразии решаемых задач делают использование СМПМ в качестве электромеханических преобразователей энергии в составе ВЭТК экономически привлекательными. Вместе с тем, наличие в электротехнических комплексах механизмов передачи и преобразования движения создает труднопреодолимый барьер на пути повышения их энергоэффективности и надежности. Исключение механического звена преобразования движения в электротехническом комплексе является предметом решения сложной научно-технической проблемы проектирования и создания электрических машин, включая тихоходные СМПМ в составе автономных ветроэнергетических установках (ВЭУ) малой и средней мощности, линейных магнитоэлектрических приводов (ЛМЭП) поршневых компрессоров и насосов, амортизаторов и демпферов, установках генерирования электроэнергии и электроприводов специального назначения.

Актуальность темы исследований заключается в разработке научных основ оптимального проектирования тихоходных конструкций СМПМ, оптимизации их конструктивных параметров, определение условий достижения максимума КПД электромеханического преобразования энергии

(электромагнитного усилия), получение высоких значений удельной выходной мощности СМПМ, снижение массогабаритных показателей (МГП).

Тихоходная СМПМ является сложным объектом, состоящим из электрической, электромагнитной, механической и тепловой подсистем. Причем особенность тепловой подсистемы заключается в том, что она имеет свою компоненту в каждой из перечисленных подсистем. Математические модели отдельных подсистем СМПМ объединяются в полную математическую модель и связываются между собой нелинейными алгебраическими уравнениями, начальными и граничными условиями. Выбор лучшего варианта решения конструктивной схемы тихоходных СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса на предварительной стадии проектирования является первоочередной задачей, которая решается с применением эвристических методов поиска и зависит от накопленного опыта разработчиков-исследователей. На этом этапе определяются конструктивные параметры и обмоточные данные СМПМ, удовлетворяющие используемым критериям оптимальности. На стадии поверочных расчетов уточняются их конструктивные и энергетические показатели работы с использованием методов конечно-элементного анализа магнитного поля.

Характерной особенностью тихоходных СМПМ вращательного действия работающих в генераторном режиме являются низкая скорость вращения подвижной части машины (от 40 до 200 об/мин) и большое количество пар полюсов (от 10 и выше). Для СМПМ возвратно-поступательного действия работающих в двигательном режиме частота тока в обмотке якоря изменяется в диапазоне от 0.5 до 3 Гц. Примерами использования тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов являются ветроэнергетические установки, линейные приводы длинноходовых поршневых компрессоров и насосов.

Несмотря на возрастающую потребность различных отраслей промышленности в производстве тихоходных СМПМ, существующие

методики проектирования в основном ориентированы на быстроходные электрические машины, устанавливаемые на передвижных электрических станциях, на авиационном и автомобильном транспорте и других объектах. В авиастроении, например, быстроходная СМПМ подключаются к высокоскоростному газотурбинному двигателю, а в составе ВЭУ присоединение вала синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) к ветроколесу происходит через механическое устройство – мультипликатор, повышающее скорость вращения вала [19, 65, 170].

Отсутствие передаточных и преобразовательных механизмов в составе ВЭТК при низких скоростях движения подвижных частей связано с ограничением выходной мощности электрических машин, что ведет к увеличению их массы и габаритов. В связи с этим работы по созданию методологических основ проектирования тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, поиску оптимальных конструкций магнитных систем, разработке методов математического моделирования и исследования рабочих процессов и законов управления являются актуальными.

Общая задача разработки тихоходных СМПМ в составе ВЭТК требует новых подходов к решению традиционно сложных для электрических машин вращательного и возвратно-поступательного движения задач, какими являются анализ магнитных систем, распределение магнитного поля в рабочем объеме, оптимизация конструкций и исследование оптимальных режимов энергопреобразования.

Большой вклад в развитие теории, разработку методов и алгоритмов проектирования СМПМ внесли отечественные и зарубежные ученые Аркадьев В.К., Арнольд Э., Афанасьев А. А., Буль Б.К., Бут Д.А., Вольдек А.И., Демирчян К.С., Иванов-Смоленский А.В., Исмагилов Ф.Р., Ковалев Ю.З., Копылов И.П., Курбатов П.А., Львович А.Ю., Любчик М.А. Москалев В.В., Нейман В.Ю., Овчинников И.Е., Олейников А.М., Ряшенцев Н.П., Тамм И.Е.,

Тозони О.В., Хайруллин И.Х., Хитерер М. Я., Шимони К., Юринов В. М., Юферов Ф.М., R. Frank, J. Ribeiro, M. Walther и другие.

Особенность задач по проектированию и разработке тихоходных СМПМ состоит в том, что электромагнитные процессы, протекающие в магнитной системе синхронной машины, описываются уравнениями Максвелла. Эти уравнения рассматриваются в виде дифференциальных уравнений в частных производных относительно векторного потенциала магнитного поля, векторов напряженности и индукции электрического и магнитного полей. Уравнения Максвелла дополняются начальными и краевыми условиями на внешней границе расчетной области и условиями сопряжения на её внутренних границах. При этом решение поставленной краевой задачи может проводиться аналитическими или численными методами. Для большинства конструкций тихоходных СМПМ характерна сложная конфигурация элементов магнитной системы, обеспечение жестких требований технического задания к массогабаритным показателям машины и ее системе управления.

Отличительными особенностями конструкций магнитной системы СМПМ являются: наличие разомкнутого магнитопровода и постоянных магнитов; число катушек, обтекаемых током; рассеяние и выпучивание магнитного потока, обусловленное значительными воздушными зазорами; изменяющийся во времени ход индуктора или скорость вращения подвижной части. В связи с этим решение краевой задачи для области моделирования со сложной геометрией и разнородными физическими свойствами требует использования численных методов [162, 169].

Решение краевой задачи по расчету поля не является самоцелью, она входит составной частью в решение комплексной задачи исследования динамических процессов СМПМ, включая вопросы оптимизации геометрии магнитной системы, удовлетворяющей выбранному критерию оптимальности, и поиска оптимальных режимов энергопреобразования. Применительно к электрическому приводу возвратно-поступательного движения эта

комплексная задача имеет существенные отличия от традиционного привода вращательного движения. Эти отличия вызваны органическим слиянием в одно целое электромеханического преобразователя энергии и рабочей машины, что делает этот тип привода специальным по назначению, а работы по его созданию и проектированию, жестко подчиненными требованиям нагрузки. В то же время работа по созданию ВЭТК с тихоходными СГПМ в составе ветроэнергетической установки, также при отсутствии передаточного и преобразовательного механизма, требует учета скорости вращения вала генератора при решении задачи расчета оптимальной конструкции магнитной системы, а также принципов переключения схем обмотки СГПМ.

В данной работе задача создания и оптимального проектирования тихоходных СМПМ в составе ВЭТК является отражением специфических особенностей рабочего процесса при оптимизации конструкции их магнитных систем, поиска оптимальных законов управления, определением пусковых и эксплуатационных характеристик.

Цель диссертационной работы – создание и совершенствование тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин вращательного и возвратно-поступательного движения в составе электротехнических комплексов на основе разработки и реализации методов их проектирования.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **основные научные задачи**:

1. Разработать методы, подходы и алгоритмы оптимального проектирования энергоэффективных тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК генерирования электрической энергии и электропривода на основе анализа процессов энергопреобразования тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса с учетом особенностей рабочего процесса и внешних воздействующих факторов.

2. Выбрать критерии оптимальности, построить целевую функцию, используемую для решения задачи оптимизации конструкции тихоходных

СМППМ, и установить в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы тихоходных СМППМ, обеспечивающих максимально возможный КПД электромеханического преобразователя при минимуме массы используемых активных материалов.

3. Построить 2D и 3D математические модели тихоходных СМППМ на основе уравнений магнитного поля с использованием рекуррентных соотношений для определения функции магнитного потока и векторного магнитного потенциала в узлах регулярной триангуляционной сети полученных на основе метода конечных элементов.

4. Разработать новые конструктивные схемы тихоходных СМППМ в составе ВЭТК и исследовать влияние конструктивных параметров на энергетические показатели работы в нормальном и аварийном режимах с учетом особенностей рабочего процесса.

5. Разработать алгоритмы и программы оптимизации новых конструкций тихоходных СМППМ в составе ВЭТК, удовлетворяющих выбранному критерию оптимальности (максимуму КПД, максимуму тягового усилия) в соответствии с техническим заданием на проектирование.

6. Выполнить исследование пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМППМ в составе ВЭУ с системой управления, основанной на применении алгоритмов нечеткой логики, а также ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора и аппаратно-программного измерительного комплекса для испытания вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

7. Разработать рекомендации по оптимальному проектированию энергоэффективных тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и линейного электропривода.

Область исследования – развитие научных основ проектирования и создания энергоэффективных тихоходных СМППМ в электротехнических

комплексах генерирования электроэнергии и электропривода конкретного назначения.

Объект исследования – тихоходные синхронные машины с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов в модельном ряду ВЭУ мощностью до 30 кВт, ЛМЭП длинноходовых поршневых компрессоров с возможностью сжатия газа до давления 2 МПа одной ступенью, испытательных стендов для исследования вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

Предмет исследования – электромеханические, электромагнитные и тепловые процессы разработанных конструкций тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК конкретного назначения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теоретической электротехники, теории электромеханических преобразователей энергии, математического моделирования, методы оптимизации, методы теории подобия при анализе электрических цепей с нелинейными параметрами, вариационного, дифференциального и интегрального исчисления, матричной алгебры, методы оптимизации, методы аппроксимации функций степенными полиномами и сглаживающими кубическими полиномами (B-сплайнами), численные проекционно-сеточные методы на основе конечно-элементного анализа; методы решения систем линейных алгебраических и дифференциальных уравнений, методы математического планирования эксперимента, методы построения нейронных сетей. Экспериментальные исследования проведены на разработанных макетах, опытных образцах СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП. Для расчета магнитных полей применялись комплексы программ ANSYS, ELCUT, а также разработанные алгоритмы, реализованные в среде Borland Delphi 7.0 и Java. Решение задач динамики реализовано методами и средствами структурного моделирования в MatLab/Simulink.

Степень достоверности результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследованиях математических моделей, методов и алгоритмов, сравнением результатов расчета с данными физического моделирования и сопоставлением с данными исследований других авторов, качественным совпадением и достаточной сходимостью результатов расчета и экспериментальных данных, апробацией как предварительных, так и окончательных результатов диссертационной работы.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Предложен метод создания энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и электропривода, отличающийся от известных тем, что совместное решение уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей СМПМ, основывается на использовании итеративного процесса, уточняющего заданный в качестве начального приближения закон движения индуктора.

2. Предложен метод оптимального проектирования тихоходных СМПМ, отличающийся от известных тем, что дана математическая постановка задачи оптимизации и получено ее решение, устанавливающее взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы электрической машины, доставляющая максимум целевой функции (коэффициент полезного действия, электромагнитное усилие) в зависимости от закона движения подвижной части и условия минимума массы активных материалов, что позволяет на стадии поверочных расчетов уточнить пусковые и эксплуатационные характеристики электрической машины, сократить временные и материальные затраты на проектирование.

3. Предложен метод оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП, отличающийся от известных тем,

что на основе выбранного критерия оптимальности, получены соотношения, обеспечивающие максимум удельной полезной мощности, исходя из заданных технических условий на проектирование.

4. Предложен метод формирования численных проекционно-сеточных трехмерных моделей магнитного поля тихоходных СМППМ, отличающийся от известных методов возможностью использования «регулярного элемента», для которого получены рекуррентные соотношения, позволяющие максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов, сократив тем самым временные и материальные затраты.

5. Разработаны методики, алгоритмы оптимального проектирования предложенных конструктивных схем тихоходных СМППМ в составе электротехнического комплекса на заданный закон движения подвижной части, включающие тепловые расчеты и отличающиеся от известных учетом особенностей рабочего процесса.

6. Предложена методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов для конструирования тихоходных СМППМ в составе электротехнического комплекса, отличающаяся от известных тем, что в ее основе используется идентификация по критерию одинаковой объемной намагниченности.

7. Определен новый принцип формирования системой управления закона движения подвижной части линейной тихоходной СМППМ в двигательном режиме в составе электротехнического комплекса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, отличающийся от известных тем, что при удовлетворении требования к обеспечению угла сдвига фаз между законом движения подвижной части и электромагнитной силы обеспечивается максимум КПД электромеханического преобразователя.

8. Предложен способ стабилизации выходного напряжения ВЭУ на основе тихоходных СМППМ модульного типа, который отличается от известных тем,

что позволяет обеспечить системой управления на базе нейронной сети стабилизацию напряжения в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

9. Предложен новый способ повышения выходного напряжения СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ, отличающийся от известных тем, что повышение выходного напряжения достигается применением новой конструктивной схемы магнитной системы ротора и магнитопровода статора, позволяющей реализовать последовательное соединение выпрямительных блоков к каждой фазе СГПМ с уменьшением переменной составляющей выходного напряжения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют собой новые научно обоснованные технические положения, рекомендации, методики, модели и алгоритмы расчета, внедрение которых вносит значительный вклад в область разработки тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов конкретного назначения и режима работы, именно:

- на основе единого подхода разработан комплекс математических моделей реализованных в пакетах программ ANSYS, ELCUT, Matlab вариантов конструктивных схем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов, обеспечивающих широкие возможности для решения задач анализа и синтеза, внедрение которых в практику проектирования позволит сократить сроки выполнения проектных работ и повысить их качество;

- предложен метод формирования численного проекционно-сеточного алгоритма на регулярной триангуляционной сети для расчетов осесимметричных и трехмерных полевых моделей тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в цилиндрической (2D) и прямоугольной (3D)

системах координат, используя выведенные рекуррентные соотношения для плоского и объемного «регулярного элемента» численного конечно-элементного анализа, что позволяет максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода конечных элементов, минуя этап построения элементных систем уравнений;

- разработаны инженерные методики оптимального проектирования магнитных систем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин по заданным выходным параметрам в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

- разработаны инженерные методики расчета выходных параметров рабочего процесса тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов конкретного назначения и режима работы при заданном законе движения ротора, учитывающие процессы теплопередачи между элементами магнитной системы;

- разработаны испытательные стенды для экспериментального исследования опытных образцов тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов и идентификации постоянных магнитов из сплава NdFeB в опытной партии по критерию одинаковой объемной намагниченности;

- предложены принципы технической реализации систем управления электротехнических комплексов ВЭУ и ЛМЭП, позволяющие повысить энергоэффективность СМПМ;

- выработаны рекомендации по проектированию тихоходных СГПМ в модельном ряду ВЭУ мощностью до 30 кВт, линейных магнитоэлектрических приводов тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров с возможностью сжатия газа до давления 2 МПа и испытательных стендов, предназначенных для исследования вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

Реализация в промышленности. Научные результаты диссертации проверялись, корректировались и внедрялись в НТК «Криогенная техника», г. Омск, ООО «Тор», г. Санкт-Петербург; ПАО «Россети» АО «Янтарь Энерго» г. Калининград.

В НТК «Криогенная техника» внедрение осуществлялось путем:

- передачи методик проектирования оптимальных конструкций тихоходных линейных магнитоэлектрических двигателей для привода поршневого компрессора по критерию максимума КПД (минимума удельных относительных потерь в элементах электропривода);

- расчета линейного магнитоэлектрического двигателя для привода поршневого компрессора на развиваемое тяговое усилие 100 Н и 3000 Н по предложенным методикам оптимального проектирования.

В ООО «ТОР» внедрение осуществлялось путем:

- передачи алгоритмов расчета осесимметричных и трехмерных магнитных полей на основе «регулярного элемента» в части уравнений задачи магнитостатики для двумерного и трехмерного анализа относительно векторного потенциала магнитного поля для треугольного и тетраэдрического конечного элемента первого порядка;

- успешной проверки предложенных уравнений и использованы в программе ELCUT в качестве элементных уравнений магнитостатики в осесимметричном анализе, записанных относительно функции магнитного потока;

- планирования использования уравнений, полученных на основе предложенных алгоритмов к применению в разрабатываемой версии ELCUT для трехмерной задачи магнитостатики.

В ПАО «Россети» АО «Янтарь Энерго», внедрение осуществлялось путем:

- передачи методик оптимального проектирования тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов в составе

ветроэнергетических установок по критерию максимума КПД и максимума удельной полезной мощности;

- проведения расчета ветроэнергетической установки по предложенным методикам оптимального проектирования на основе синхронных генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом и модульного типа с независимыми магнитопроводами.

Основные результаты диссертационной работы реализованы автором в виде разработок макетных образцов, методик и компьютерных моделей. Диссертационная работа выполнялась в рамках реализуемой в различные годы программы стратегического развития ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Темы НИР:

- Исследование эффективных низкооборотных синхронных магнитоэлектрических генераторов (№ гос. регистрации №115072010084 от 20.07.2015);

- Расчет и оптимизация магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя на заданный закон движения якоря (№ гос. регистрации 01201464564 от 18.06.2014);

- Исследование способов технической реализации эффективных низкооборотных генераторов малой энергетики с использованием возобновляемых источников энергии (№ гос. регистрации №012013769 от 19.12.2013);

- Математическое моделирование динамических процессов оптимальных конструкций магнитоэлектрических приводов для исследования упруго-пластичных свойств эластомеров (№ гос. регистрации А03-3.14-389 от 27.06.2004).

Материалы диссертации нашли применение в учебном процессе при разработке лекционного курса «Математическое моделирование электротехнических устройств», «Методы идентификации объектов

электротехнических комплексов и систем» выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ для студентов направлений 13.03.02 и 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод создания энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и линейного электропривода с применением совместного решение уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей СМПМ, и основанная на использовании итеративного процесса, уточняющего заданный в качестве начального приближения закон движения индуктора.

2. Метод оптимального проектирования тихоходных СМПМ, основанный на математической постановке задачи оптимизации и ее решении, которое устанавливает взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы электрической машины, доставляющая максимум целевой функции (коэффициента полезного действия, электромагнитного усилия) в зависимости от закона движения подвижной части.

3. Метод оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП, основанный на использовании полученных соотношений, обеспечивающих максимум удельной полезной мощности исходя из заданных технических условий на проектирование.

4. Метод формирования численных проекционно-сеточных трехмерных моделей магнитного поля тихоходных СМПМ с возможностью использования трехмерного «регулярного элемента», для которого получены рекуррентные соотношения, позволяющие максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов.

5. Методики и алгоритмы оптимального проектирования предложенных конструктивных схем тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов на заданный закон движения подвижной части, учитывающий особенности рабочего процесса и теплового режима.

6. Методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности для конструирования тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов.

7. Принцип формирования системой управления закона движения подвижной части линейной тихоходной СМППМ в двигательном режиме в составе привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, основанный на удовлетворении требования к обеспечению рассчитанного угла сдвига фаз между законом движения подвижной части и электромагнитной силой, при котором обеспечивается максимум КПД электромеханического преобразователя.

8. Способ стабилизации выходного напряжения тихоходного СГПМ модульного типа в составе ВЭУ системой управления на базе нейронной сети в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

9. Новый способ повышения выходного напряжения СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ, заключающийся в том, что повышение выходного напряжения достигается применением новой конструктивной схемы магнитной системы ротора и магнитопровода статора, что позволяет реализовать последовательное соединение выпрямительных блоков к каждой фазе СГПМ с уменьшением переменной составляющей выходного напряжения.

Апробация результатов.

Результаты работы докладывались на семинарах кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

расширенном семинаре кафедр «Теоретические основы электротехники» и «Электромеханика» кафедр Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», научном семинаре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научном семинаре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», научном семинаре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет».

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции «Автоматизированный электропривод» 2020 г (АЭП, ICEPDS), г. Санкт-Петербург; Международной конференции «Федоровские чтения» 2019-2020, г. Москва, Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», 2004-2018 гг., Омск; Всероссийская научно-практическая конференция «Россия молодая: передовые технологии в промышленность», Омск, 2008-2018 гг.; IV Всероссийская научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника», Новокузнецк, 2010 г.; Международная научно-практическая конференция «Информационные ресурсы в образовании», Нижневартовск, 2013 г.; III Всероссийская научно-практическая конференция «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы», Нижневартовск, 2014 г.; International Siberian conference Control and Communications, Omsk, Moscow, Astana 2015 -2017 гг.; International Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" : conference proceeding, Omsk, 2015-2018; VII Международная научная конференция молодых ученых, Новосибирск, 2015; VII Всероссийская

научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», Ориенбург, 2014; VI, VII Международная научно-техническая конференция «Техника и технологии нефтехимического и нефтегазового производства», Омск, 2016-2017 гг.; Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016) : 2nd International conference, Chelyabinsk, 2016; Международная научно практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики» Омск, 2016-2019 гг.; VIII Международная молодежная научно-техническая конференция «Энергетика глазами молодежи» Самара, 2017 г.; XIV International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE, Новосибирск, 2018 г.; Moscow Work shop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings, Moscow, 2018 г.; VII Региональной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной науки», Омск, 2018 г.; II, III Международная научно-техническая конференция «Проблемы машиноведения», Омск, Journal of Physics: Conference Series, 2018-2019 гг.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 67 печатных работах, из них 12 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS/Web of Science, 17 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России (в том числе 13 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России по специальности диссертации), 3 монографии, 13 патентов на изобретения, 7 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 2 патента на полезную модель и 13 публикации в материалах всероссийских и международных научных конференций.

Работа выполнена на кафедре «Электрическая техника» Омского государственного технического университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Программой развития университета ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 317 страницах машинописного текста и состоит из введения, шести глав, заключения, 114 рисунков, 16 таблиц, списка использованных источников, который содержит 219 наименования и приложения.

Личный вклад автора. Автор внес определяющий вклад в постановку задачи, выбор направлений и методов исследования, в проведение экспериментальных исследований, в разработку технических решений и практическую реализацию макетных образцов тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов, обобщение полученных результатов. В работах и изобретениях [10, 135–137, 145, 153] автору принадлежат: идея применения общего подхода к оптимальному проектированию конструкций магнитных систем магнитоэлектрических машин входящих в состав ВЭТК, работающих в генераторном и двигательном режимах на заданный критерий оптимальности, идея применения трехмерного «регулярного элемента» в виде шестиугольной призмы и математическая формулировка рекуррентных соотношений глобальной СЛАУ для расчета магнитного поля с использованием метода конечных элементов разработка математических моделей для исследования динамических характеристик ВЭТК, получение расчетных формул, анализ результатов, обработка экспериментальных данных представлены в работах [99, 105, 142, 152, 156]. Автору также принадлежат разработанные в ходе подготовки диссертации имитационные модели магнитных систем тихоходных магнитоэлектрических машин, а также разработанное программное обеспечение [113, 119–122, 135, 137] по расчету и проектированию конструкций магнитных систем.

Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Соответствие паспорту специальности. Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, соответствуют областям исследования,

приведенным в паспорте специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, а именно:

Пункт 2. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.

Пункт 3. Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии.

Пункт 5. Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи работы, указаны методы исследования, изложены научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассматривается обзор конструкций и классификация СМПИМ в составе установок генерации электроэнергии и электропривода. Показано, что при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов энергоэффективность определяется процессами энергопреобразования в магнитной системе СМПИМ. Раскрыто понятие высокотехнологичного электротехнического комплекса (ВЭТК) через общие признаки: качество, надежность, экономичность, обуславливающие требования к разрабатываемому изделию при проектировании. Предложена классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПИМ, учитывающая особенности рабочего процесса ВЭУ и ЛМЭП и принципы управления. Показана необходимость применения общих подходов методологии проектирования СМПИМ в составе ВЭУ и ЛМЭП с учетом особенностей рабочего процесса.

Во второй главе проведен анализ магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭТК с учетом особенностей рабочего процесса. Представлены общие подходы методологии оптимального проектирования тихоходных СМПМ, заключающиеся в использовании итеративного процесса с циклической релаксацией к решению системы уравнений динамики электромеханической системы, когда при наложении дополнительных условий, например, на желаемое движение механической части системы в качестве начального приближения решение уравнений динамики электрической части могут быть получены независимо от процессов в механической части. В результате имеем начальное приближение (электромагнитной силы, вращающего момента), позволяющее из уравнений движения механической части найти, первое, в общем случае, отличное от начального приближение закона движения подвижной части. Предложенные подходы методологии оптимального проектирования тихоходных СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса ВЭТК позволили корректно поставить и решить задачу оптимизации их параметров. Определить аналитические выражения взаимосвязи конструктивных параметров тихоходных СМПМ с энергетическими показателями их работы.

В третьей главе дано развитие метода построения осесимметричной и трехмерной моделей магнитного поля СМПМ на регулярной триангуляционной сети, позволяющего автоматизировать процесс формирования глобальной СЛАУ в проекционно-сеточном методе Галеркина в сочетании с МКЭ, минуя этап построения «элементных» систем уравнений благодаря выведенным рекуррентным соотношениям для функции магнитного потока. Предложена программная реализация усовершенствованного метода на ПК для выполнения поверочных расчетов конструкций СМПМ и при необходимости может использоваться самостоятельно для исследования магнитных полей электрических машин. Предложен метод и устройство идентификации опытных образцов ПМ по критерию одинаковой объемной

намагниченности, которая учитывается среднеквадратичным отклонением экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими опытными образцами ПМ (для каждого в отдельности) с магнитным отражателем. Использование метода позволяет устранить повышенную вибрацию подвижных частей, радиальное биение вала, отклонение энергетических показателей работы изделия от заданных технических условий.

В четвертой главе выполнено математическое и экспериментальное исследование пусковых и эксплуатационных характеристик предложенных конструкций тихоходных СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом и модульного типа. Дано описание разработанного программного обеспечения для проектирования оптимальных конструкций тихоходных СГПМ.

В пятой главе рассмотрены примеры разработки оптимальных конструкций СДПМ возвратно-поступательного движения для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и привода тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора. Приведены результаты математического и экспериментального исследования макетных образцов разработанных конструкций СДПМ для определения их статических и динамических характеристик. Дано описание разработанного программного обеспечения, реализующего основные этапы их проектирования.

В шестой главе рассмотрены принципы разработки системы управления, реализующей заданный режим работы рассмотренных в четвертой и пятой главах тихоходных СМПМ. Для тихоходных СГПМ модульного типа представлена адаптивная нейросетевая модель системы управления, учитывающая скорость вращения ротора и коэффициент загрузки при обеспечении заданного уровня выходного напряжения. Приведена имитационная модель и представлены динамические характеристики СГПМ модульного типа. Приведены результаты математического и экспериментального исследования макетного образца СДПМ для привода

тихоходной поршневой компрессорной ступени. Предложена структурная схема системы управления СДПМ для испытания реологических свойств эластомеров, реализующая заданный закон движения прижимного штока, действующего на опытный образец эластомера, а также контролирующая температуру в термокамере.

Работа выполнена на кафедре «Электрическая техника» Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Программой развития университета ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТИХОХОДНЫХ СМПМ В СОСТАВЕ ВЭТК ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

1.1. Обзор конструкций и классификация тихоходных СМПМ в составе установок генерации электроэнергии и электропривода. Анализ методов и способов повышения энергоэффективности тихоходных СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса.

Решение ряда актуальных проблем в области создания возобновляемых и автономных источников энергии (ВИЭ, АИЭ) и электропривода тесно связано с разработкой и совершенствованием конструкций тихоходных электрических машин, которые без использования механических редукторов при низкой скорости вращения валов и возвратно-поступательного движения рабочих органов (поршня компрессорах и насосах, пуансона в прессах, вытеснителя в газовых криогенных машинах и др.) имеют высокие массогабаритные и энергетические показатели работы в составе ВЭТК [1, 2, 7, 9, 38, 60, 84, 111, 160, 167].

Разработка и использование ВЭТК в различных сферах производственной деятельности являются отличительными особенностями современного уровня развития техники и технологии, определяющими повышение качества, востребованность и конкурентоспособность товаров и услуг (рис. 1.1). Применительно к электромеханическим преобразователям в составе ВЭТК этот уровень развития проявляется в повышении эффективности магнитных систем, надежности, увеличении срока эксплуатации, ремонтпригодности, удобстве их обслуживания.

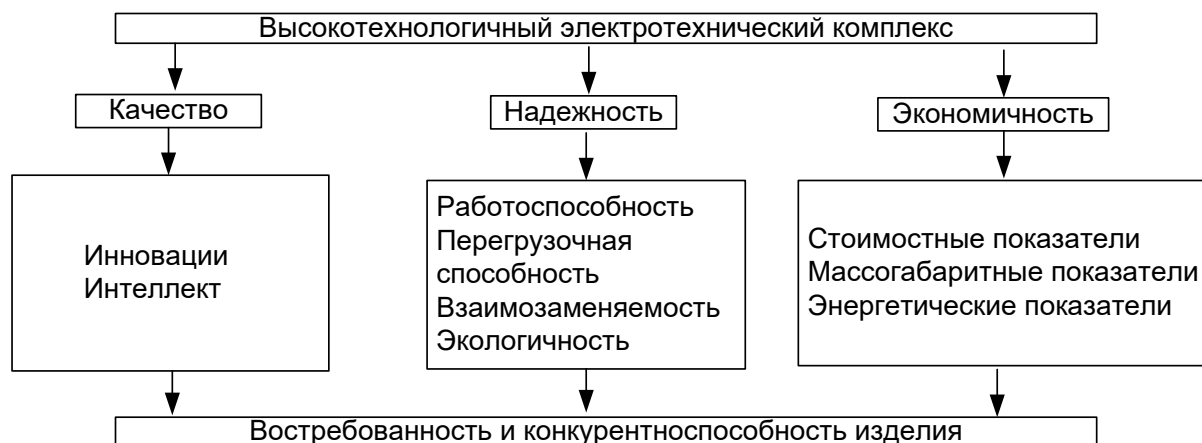


Рис. 1.1. Требования к ВЭТК.

На рис. 1.2 представлена структурная схема ВЭТК с электромеханическими преобразователями энергии.

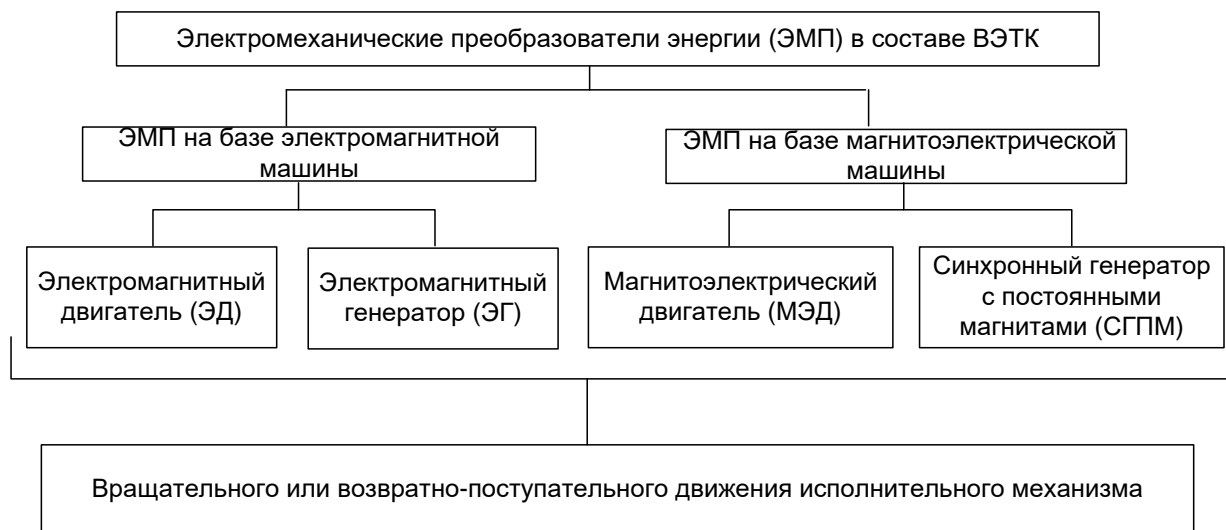


Рис. 1.2. ЭМП в составе ВЭТК.

Методы анализа и синтеза ЭМП на базе электромагнитной машины в составе ВЭТК разрабатывались и исследовались в работах многих ученых, таких как: И.И. Алиев, В.Я. Беспалов, З. Гентковски, П.Ю. Грачев, А.В. Иванов-Смоленский, Ю.З. Ковалев, И.П. Копылов, М.Л. Костырев, Г.Б. Онищенко, И.М. Постников, В.И. Радин, Н.П. Ряшенцев, М.Ю. Сергеев, Г.А. Сипайлов, Н.Д. Торопцев, В.В. Харламов и др.

Применение асинхронных электрических машин в генераторном режиме долгое время не представлялось перспективным направлением исследований

из-за трудоемкости создания компактного регулируемого источника реактивной мощности [126]. Однако энергетическая установка на основе асинхронной электрической машины позволяет непосредственно применяться для питания импульсных потребителей на подвижных объектах с отбором механической мощности, что представляет интерес для развития автономных систем.

Новые возможности открывает реализация идеи возбуждения магнитного потока в асинхронной машине с помощью полупроводниковых преобразователей и разработка микропроцессорного «бездатчикового асинхронного электропривода».

Развитию общей универсальной теории идентификации сложных нелинейных нестационарных режимов посвящены работы Браславского И.Я., Виноградова А.Б., Гинсберга К.С., Глазырина А.С., Завьялова В.М., Костылева А.В., Лотоцкого В.А., Панкратова В.В., Толочко О.И., Asher В.К., Habetler T.G., H.A. Tolyat и др.

Синхронные электрические машины вращательного действия находят применение в составе энергетических установок и электроприводе. Возможность снижения потребления реактивной мощности для синхронных двигателей за счет изменения возбуждения, а также жесткость механической характеристики обусловили широкое применение синхронного электропривода в промышленности. Большую актуальность имеет применение синхронных генераторов в промышленности, поскольку преимущественная доля электрической энергии в СЭС вырабатывается синхронными генераторами на электрических станциях.

Разработке методов расчета и исследованию и синхронных электрических машин в составе ВЭТК посвящены работы Алябьева М.И., Арутюняна В.С., Блоцкого Н.Н., Важнова А.И., Веникова В.А., Гамазина С.И., Герасимова А.Н. Калужского Д.Л., Копылова И.П., Полищука В.И., Шевченко А.Ф. и др.

Актуальными являются разработки высокоэффективной системы технической диагностики синхронных электрических машин, работающих как автономно, так и в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Научный интерес и практическое значение имеют работы по созданию ВЭТК с синхронными электромагнитными двигателями возвратно-поступательного движения, имеющими улучшенные тяговые характеристики. Актуальность применения линейного электромагнитного привода обусловлена упрощением кинематической цепи за счет исключения передаточных и преобразовательных механизмов и обеспечения наилучших условий совмещения двигателя и рабочего органа машины, имеющего возвратно-поступательное движение.

Развитию теории, расчету и конструированию оптимальных магнитных систем электромагнитных двигателей возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК посвящены работы таких ученых, как: А.Б. Буль, Ю.З. Ковалев, М.А. Любчик, В.К. Манжосов, В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, А.Г. Никитенко, Н.П. Ряшенцев, Р.Р. Саттаров, А.Р. Сафин, Б.Ф. Симонов, А.И. Смелягин, Г.Г. Угаров и др.

Наряду с ВЭТК, имеющих в своем составе ЭМП с электромагнитным возбуждением, в последнее время широкое применение получили ЭМП магнитоэлектрического типа с возбуждением от постоянных магнитов. Органическое слияние в одно целое электромеханического преобразователя энергии и рабочей машины при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов, делают эти комплексы специальными по назначению, а работы по их созданию и проектированию во многом исследовательскими, жестко подчиненными требованиям нагрузки и внешних воздействующих факторов.

Классификация тихоходных СМПМ представлена на рис. 1.3.

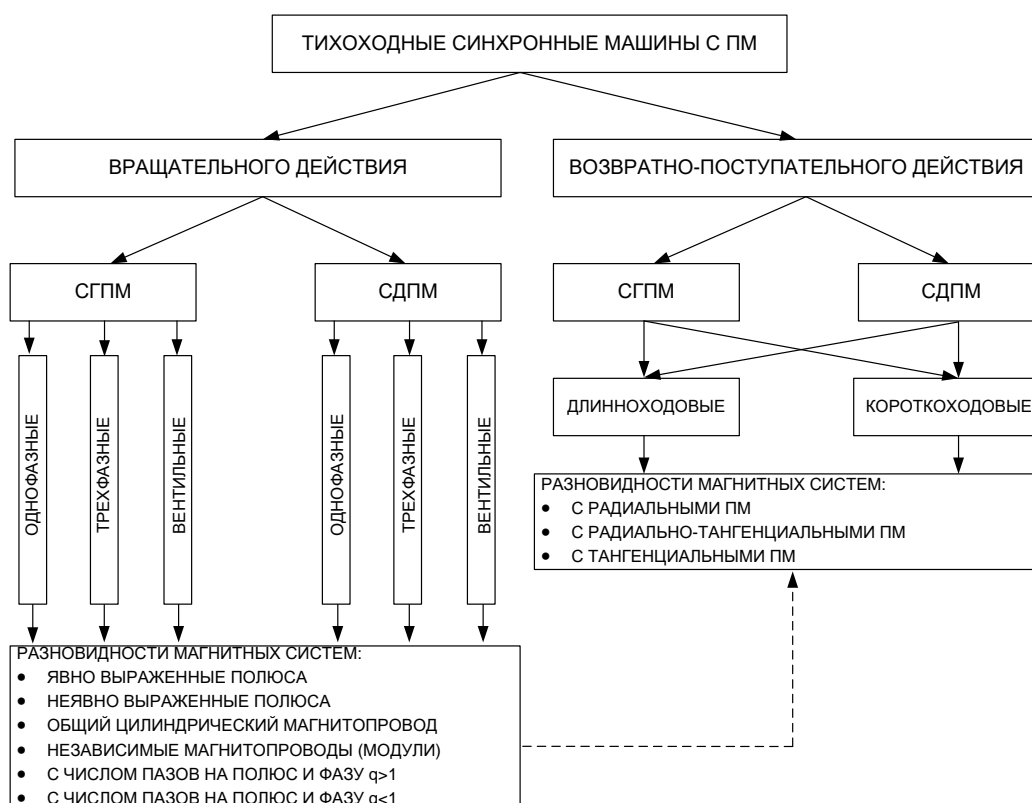


Рис. 1.3. Классификация ЭМП в составе ВЭТК.

Несмотря на свойство обратимости электрических машин, технические требования на разработку тихоходных генераторов и тихоходных двигателей в составе ВТЭК существенно различаются.

Для тихоходных генераторов ветроэнергетических установок (ВЭУ) технические требования на проектирование направлены на обеспечение жесткости внешних характеристик генераторов, повышение КПД, снижение массогабаритных показателей (МГП), учитывая тяжёлые климатические и технические условия их работы на открытом воздухе, при значительных колебаниях температуры, влажности, действии дождя, нестабильной скорости и силы ветра, в условиях повышенных вибраций, значительных динамических моментах и осевых усилиях на валу. Конструктивное размещение и условия эксплуатации делают их недоступными для регулярного технического обслуживания и ремонта. Срок службы генераторов в этих условиях должен быть не менее 20-25 лет.

В настоящее время в ветроэнергетике разработано и применяется значительное количество электромеханических генераторов (ЭМГ) постоянного и переменного тока с широким диапазоном рабочих напряжений и мощностей, выпускаемые отечественными и зарубежными производителями. Среди них бесконтактные ЭМГ малой мощности (от единиц до десятков киловатт) имеют значительное преимущество по массогабаритным показателям (МГП). К бесконтактным ЭМГ относятся известные технические решения бесконтактных асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ), синхронных генераторов с вращающимися выпрямителями (СГВВ), синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) и асинхронных генераторов (АГ), которые представляют собой синтез электрической машины и силовых электронных преобразователей.

Конструктивные схемы бесконтактных АСГ построены по принципу электрической машины двойного действия, в которой многофазная обмотка ротора питается от частотного преобразователя либо постоянным током при синхронной скорости движения ротора, либо переменным током с частотой, пропорциональной скольжению при движении ротора со скоростью меньше синхронной. Автоматическая система управления частотой токов в фазах обмотки ротора непрерывно воздействует на электромагнитный момент машины таким образом, чтобы магнитные поля статора и ротора вращались с одинаковой синхронной скоростью. Бесконтактные АСГ характеризуют высокое качество выходного напряжения при переменной частоте вращения приводного вала, преобразование механической энергии на валу в электрическую энергию происходит экономически более эффективно по сравнению с традиционными конструкциями синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением (СГВВ) из-за отсутствия необходимости выпрямления переменного тока в постоянный и инвертирования постоянного тока в переменный.

К недостаткам бесконтактных АСГ относятся сложность системы

управления, повышенная удельная мощность, большая масса и габариты, низкие показатели надежности.

К недостаткам бесконтактных АГ относятся технологическая сложность и неэффективность системы регулирования и стабилизации напряжения в нагрузке, большие токи короткого замыкания, низкий КПД, повышенный нагрев ротора при работе с переменной частотой вращения приводного двигателя.

В сравнении с другими типами генераторов конструктивные схемы СГПМ обладают рядом преимуществ. Их отличает высокая надежность в работе, независимость от источников постоянного тока, отсутствие потерь на возбуждение магнитного потока, снижение массогабаритных показателей (МГП), повышенный КПД и увеличение удельной мощности.

В таблице 1.1 приведены современные типы тихоходных СГПМ отечественных и зарубежных производителей в составе ВЭУ и микро-ГЭС.

Таблица 1.1.

Основные характеристики тихоходных СГПМ

Параметры	ВГ-05/650	ВГ-1/450	ВГ – 5/300	ВГ-10/300	ГП-15/100
Номинальная мощность, кВт	0,5	1	5	10	15
Номинальное выходное напряжение (выпрямленное), В	28,5	114	114	228	100
Число фаз	1	1	3	3	3
Частота вращения, об/мин	650	450	300	300	114 ... 140
Момент страгивания, Н·м	0,25 - 0,5	0,5 ... 0,9	1,5	1,5	2 ... 4
КПД	0,7	0,75	0,85	0,85	0,85
Масса, кг	9,6	19	95	200	495

Обзор научной и технической литературы показал, что на практике широкое внимание уделяется разработкам конструктивных схем тихоходных СГПМ аксиального (дискового) типа с торцевым расположением постоянных магнитов и коаксиального (цилиндрического) типа с радиальным

расположением постоянных магнитов ротора и катушек статора. В традиционных конструкциях магнитных систем СГПМ роторы изготавливаются по типу «звездочка» с призматическими, радиально намагниченными ПМ, с полюсными наконечниками или без них, а также роторы коллекторного типа с тангенциально намагниченными призматическими ПМ.

Появление новых материалов и новых способов концентрации магнитного потока определяют современные тенденции в проектировании тихоходных СГПМ, которые направлены на предельное упрощение конструкции, обеспечение максимальной прочности и надежности, простоту обслуживания, повышение КПД, снижение МГП, повышение эффективности системы охлаждения. В плане общего конструктивного исполнения тихоходных СГПМ целесообразно:

- сохранение общего цилиндрического магнитопровода, когда витки обмотки статора уложены в пазы полузакрытого типа, зубцы статора имеют прямоугольное сечение, на периферийной поверхности ротора закреплены постоянные магниты, число пазов на полюс и фазу q для однослойных обмоток принимается больше 1, а для двухслойных обмоток значения q изменяются диапазоне между 1 и 2;
- создание магнитной системы модульного типа, когда неподвижные подковообразные электромагниты (модули) образуют независимые магнитопроводы на статоре, а на вращающемся роторе закреплены постоянные магниты.

Исследованиям СМПМ посвящены работы Балагурова В.А., Бертинова А.И., Бута Д.А., Галтеева Ф.Ф., Ковалева Ю.З., Ледовского А.Н., А.В. Иванова-Смоленского, Исмагилова Ф.Р., Овичникова И.Е., Олейникова А.М., Шевченко А.Ф., Хитерера М.Я., Черных И.В., Amara Y., Bianchi N., Hirasa T., Morimoto S., Takeda Y.

Применение быстроходных СМППМ в составе приводных и генерирующих электротехнических комплексов целесообразно при скоростях ведущих приводов от 10 000 до 100 000 об/мин, например, в авиастроении и автономной энергетике (микротурбины) [50, 112].

К перспективным направлениям работы по развитию электротехнических комплексов с быстроходными СМППМ относят

- оптимизацию конструкций СМППМ исходя из выбранного критерия оптимальности;
- охлаждение магнитной системы СМППМ с целью уменьшения тепловых потерь и недопущении нагрева постоянных магнитов до точки Кюри;
- уменьшение влияния вихревых токов в стальных сплошных элементах магнитной системы;
- уменьшение реакции якоря;
- повышение устойчивости и надежности работы СМППМ;
- уменьшение вибраций.

Теория и практика разработки электротехнических комплексов с быстроходными СМППМ и широко применяется в различных областях производства.

Для тихоходных конструкций СМППМ, при отсутствии в составе электротехнических комплексов передаточных и преобразовательных механизмов, задачи проектирования является многофакторной, жестко подчиненной требованиям нагрузки. К числу факторов, определяющих энергоэффективность тихоходных СМППМ можно отнести энергетические свойства постоянных магнитов, особенности конструкции, позволяющие снизить остаточный момент и реакцию якоря. Большое внимание при проектировании тихоходной СМППМ уделяется требованиям технического задания на ВЭТК в целом. В частности, для тихоходных СМППМ возвратно-поступательного в двигательном режиме проектирование должно проводиться с учетом закона движения подвижной части, а для машин вращательного

действия, работающих в генераторном режиме, с учетом характера присоединенной нагрузки.

Тихоходные ВЭТК находят применение во многих отраслях производства и повседневной деятельности человека. Например, широкое распространение получили тихоходные ветроэнергетические установки (ВЭУ), устройства генерации электрической энергии в транспортных системах (в том числе железнодорожных), приводы поршневых компрессоров и насосов различного назначения, испытательные стенды для исследования свойств материалов, для изучения которых требуется механическое воздействие.

Преимуществами ВЭТК с тихоходными синхронными магнитоэлектрическими машинами в представленных отраслях являются:

- применение постоянных магнитов в конструкции магнитной системы позволяет повысить технологичность изготовления магнитоэлектрической машины и исключить потери на возбуждение;

- слияние в единое целое электромеханического преобразователя и рабочей машины при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов для электротехнических комплексов, в которых по условию технологического процесса подвижные части обладают малыми скоростями, позволяет повысить надежность и уменьшить потери в электромеханической подсистеме;

- неуклонный прогресс в области производства постоянных магнитов со все возрастающими энергетическими характеристиками обуславливает научно-практический интерес в области создания электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин повышенной мощности.

Вместе с тем совмещение исполнительного механизма и рабочей машины обуславливает необходимость учета требований нагрузки при решении общей задачи разработки электротехнического комплекса. Последнее обстоятельство делает необходимым определение энергоэффективности отдельных

компонентов, входящих в состав комплекса, и учет взаимосвязи процессов, протекающих в отдельных его подсистемах.

Учитывая, что современная элементная база полупроводниковых и микропроцессорных узлов, используемая в системах управления и электрических преобразовательных устройств, формирующих напряжение и токов с заданными параметрами в ВЭТК обладает высокой энергоэффективностью (малыми электрическими потерями), выходные характеристики ВЭТК в значительной степени определяются выходными характеристиками тихоходных СМППМ. В свою очередь выходные характеристики СМППМ могут быть представлены двумя группами: пусковыми и эксплуатационными. Классификация выходных характеристик тихоходных СМППМ представлена на рис.1.4.



Рис. 1.4. Классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМППМ в составе ВЭТК .

Следовательно, общим направлением повышения энергоэффективности ВЭТК является поиск новых оптимальных конструкций магнитных систем СМПМ, улучшающих их выходные характеристики.

Как правило, в качестве критериев оптимальности при разработке ВЭТК конкретного назначения, включающих в свой состав СМПМ, выбираются критерии жестко связанные с обеспечением требований технического задания, что в свою очередь обуславливает большое многообразие конструкций магнитных систем эффективных в одном случае и, напротив, требующих уточнения в другом.

Таким образом, выбор критерия оптимальности, решение задачи оптимизации на его основе, разработка методики проектирования и практическая реализация ВЭТК различного назначения с целью проверки его энергоэффективности является важной научной задачей требующей своего рассмотрения.

В настоящем научном исследовании в качестве критерия оптимальности для тихоходных СМПМ работающих в генераторном и двигательном режимах, вращательного и возвратно-поступательного движения рассматривается критерий обеспечения максимума удельной выходной мощности.

1.2. Структурные схемы ВЭТК на основе тихоходных СМПМ генерирования электроэнергии и электропривода возвратно-поступательного движения потребителей малой мощности.

Общая структура ВЭТК соответствует схеме автоматизированного электропривода, представленного на рис. 1.5. Схема содержит систему питания, электрический преобразователь (Пр), электромеханический преобразователь (ЭМП), рабочую машину (РМ). Устройство управления (УУ) осуществляет управление параметрами компонентов ВЭТК.

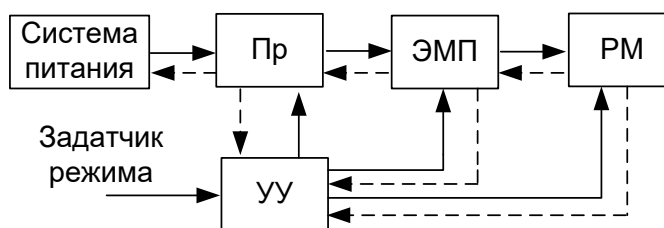


Рис. 1.5. Структурная схема ВЭТК с ЭМП.

На схеме непрерывными стрелками указана работа ЭМП в режиме двигателя, в то время как пунктирные стрелки указывают режим, в котором ЭМП является генератором.

Для двигательного режима характерна модифицированная структурная схема, представленная на рис. 1.6.

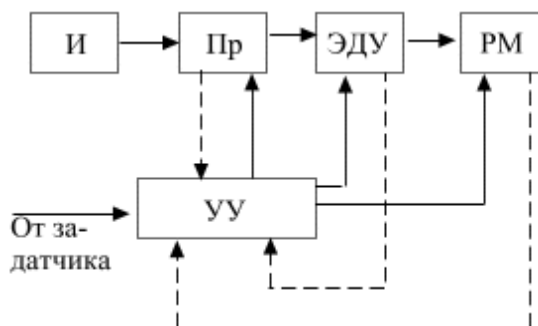


Рис. 1.6. Структурная схема ВЭТК с ЭМП в двигательном режиме.

В качестве системы питания используется для структурной схемы на рис. 1.3 используется источник электрической энергии. В качестве источника питания чаще всего используется промышленная сеть переменного тока, в отдельных случаях применяется автономный источник питания (передвижная электростанция, аккумуляторы различного типа и т.п.). С помощью преобразователя электрической энергии изменяются параметры и показания качества электрической энергии. Преобразователь напряжения формирует напряжение или ток, необходимой формы, длительности, частоты и фазы в соответствии с управляющими сигналами, которое подается на вход электродвигательного устройства. Для преобразования электрической энергии в механическую в качестве ЭДУ обычно используется один двигатель, который в зависимости от принципа действия может быть электромагнитным, магнитоэлектрическим или электродинамическим. Конструкции магнитных

систем таких двигателей отличаются большим разнообразием конструктивных решений [38, 66, 85, 167]. Благодаря этому обоснованный выбор определенной конструкции двигателя имеет творческое начало и является сложным, требующим анализа значительного числа альтернативных вариантов. Выбор типа двигателя зависит от постановки решаемой задачи, а также особенностей исследуемого в ней рабочего процесса. Функция управляющего устройства состоит в управлении преобразовательным и электродвигательным устройствами. Устройство управления содержит информационную часть, получающую информацию от датчиков (сигнал задания) и датчиков обработки связи (сигнал о состоянии системы). Управление работой привода может при этом осуществляться в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме [90, 129, 130, 168, 186, 192].

Особый интерес представляет задача создания в составе ВЭТК автономного источника питания, в качестве которого используется тихоходный электромеханический преобразователь. Актуальность указанной задачи определяется развитием малых ветроэнергетических установок.

С точки зрения процесса энергопреобразования ВЭТК использующий электромеханический преобразователь в генераторном режиме представляет собой сложную электротехническую систему. Напряжение источника питания должно удовлетворять нормируемым показателям качества электрической энергии при низкой и непостоянной скорости вращения вала в отсутствие передаточных и преобразовательных механизмов. Отсутствие общего решения, касающегося параметров электромеханического преобразователя, определяет большое многообразие форм конструктивного исполнения генератора и остро ставит задачу разработки общих принципов построения ВЭТК. В общем случае структурная схема энергетической установки (рис. 1.7.) содержит рабочую машину (РМ), обеспечивающую вращающий момент, электромеханический преобразователь (ЭМП), подключенный

непосредственно к рабочей машине, электрический преобразователь (Пр), управляющее устройство (УУ) и электрическую нагрузку (ЭН).

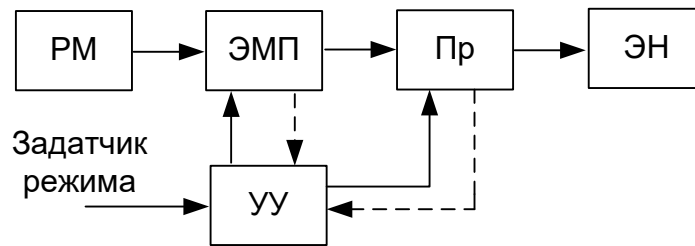


Рис. 1.7. Структурная схема ВЭТК с ЭМП в генераторном режиме.

Под рабочей машиной РМ понимается энергетическая машина, осуществляющая вращение предмета труда, ее исполнительный орган представляет собой движущийся элемент, выполняющий рабочую операцию по вращению вала электромеханического преобразователя.

Для преобразования механической энергии в электрическую в качестве электромеханического преобразователя используется обычно один генератор, который в зависимости от принципа действия может быть электромагнитным или магнитоэлектрическим. Конструкции магнитных систем таких генераторов отличаются большим разнообразием конструктивных решений.

Преобразователь напряжения реализует функции стабилизации напряжения, при этом может включать в свой состав вставку по постоянному току и осуществлять питание потребителя через инвертор напряжения. В этом случае в составе преобразователя используется зарядное устройство и аккумулятор. Функция управляющего устройства состоит в управлении электромеханического преобразователя и предназначено для регулирования скорости вращения индуктора, а также изменения конфигурации магнитной системы СГПМ в зависимости от режимов работы электрической нагрузки и рабочей машины. Устройство управления содержит аппаратную часть и информационную часть, получающая информацию от задатчика режима

(сигнал задания) и датчиков обработки связи (сигнал о состоянии СГПМ). В общем случае управляющее устройство осуществляет:

- пуск и остановку СГПМ в нормальном режиме;
- остановку и защиту СГПМ при аварийных режимах;
- набор мощности;
- сбор данных о работе СГПМ за период времени.

Рабочая машина в совокупности с электромеханическим преобразователем, электрическим преобразователем и устройством управления представляет собой автономный источник питания.

Широкое применение магнитоэлектрических машин в качестве электромеханических преобразователей в составе ВЭТК связано с рядом характерных факторов: отсутствие затрат энергии на возбуждение, отсутствием в конструкции щеточно-коллекторного узла, большой ассортимент доступных к использованию высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов из сплава неодим-железо-бор (NdFeB).

Наиболее целесообразно использование магнитоэлектрических машин в системах электроснабжения и электропривода объектов, работающих в переменных режимах работы, например, при изменении в реальном времени внешнего крутящего момента или момента сопротивления на валу машины. Решение указанной задачи находится на пути разработки новых ВЭТК, в основе которых находятся магнитоэлектрические машины, имеющие максимально уменьшенные технологические потери, что определяет ряд принципов, влияющих на конструктивные особенности магнитных систем. Конструкции магнитных систем определяют распределение магнитного поля и процессы энергопреобразования, что, в связи с отсутствием дополнительных передаточных и преобразовательных механизмов, делает задачу разработки надежных методов расчета и проектирования магнитоэлектрических машин

актуальной и во многом творческой, жестко подчиненной требованиям нагрузки.

Общие критерии качества магнитоэлектрических машин известны:

- требования к минимизации массогабаритных показателей;
- увеличение КПД и, соответственно, уменьшение тепловых потерь;
- обеспечение надежности;
- экономичность при создании, в эксплуатации, обслуживании и ремонте.

В случае работы магнитоэлектрической машины в генераторном режиме добавляются требования, предъявляемые стандартом. Специфические требования касаются:

- улучшения качества электрической энергии;
- возможность работы при переменной и резкопеременной электрической нагрузке, вызывающей отклонение и колебание напряжения;
- устойчивость к токам короткого замыкания.

Указанные требования определяют выходные параметры СМПМ, что в свою очередь формирует параметры магнитной системы.

Статор СМПМ вращательного действия, как правило, содержит шихтованный цилиндрический магнитопровод, на внутренней поверхности которого размещается якорная обмотка. Внутренняя поверхность сердечника статора содержит пазы, чередующиеся с зубцами [26]. В ряде случаев общий магнитопровод выполняется в виде «звездочки», на «лучах» которой расположены обмотки [70].

Ротор СМПМ может иметь когтеобразную конструкцию, в которой цилиндрический постоянный магнит защищен шайбами из магнитомягкой стали от внешних магнитных полей. Кроме когтеобразного ротора, ротор может быть выполнен с призматическими постоянными магнитами имеющих радиальное или тангенциальное намагничивание.

Кроме конструкций с общим магнитопроводом статор СМППМ может быть реализован в виде независимых магнитопроводов, например, П-образной формы, на которых размещены катушки (рис.1.8).

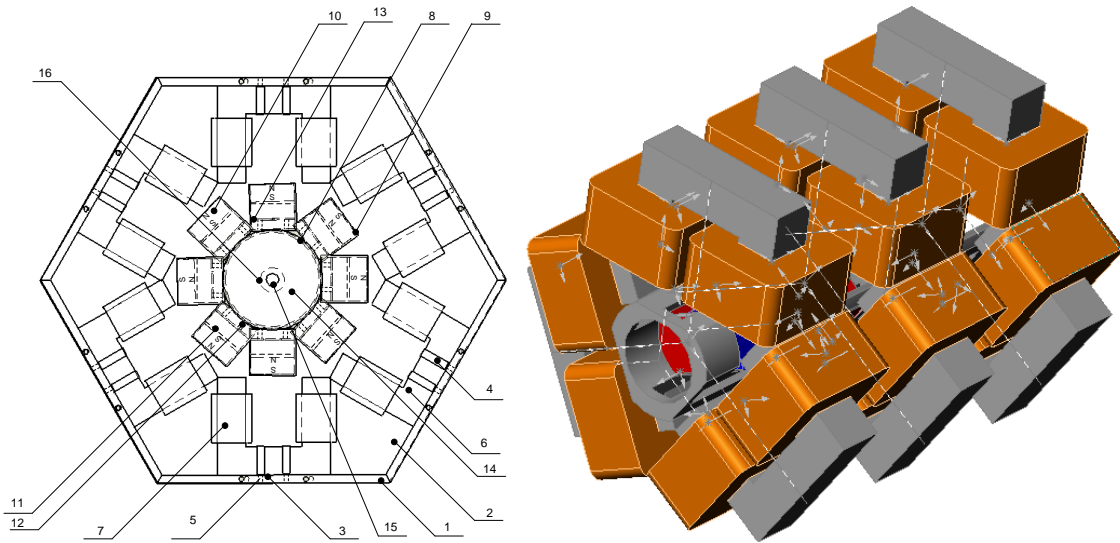


Рис. 1.8. Примеры конструкций СМППМ с независимыми магнитопроводами.

Конструкции магнитных систем СМППМ возвратно-поступательного движения, как правило, имеют цилиндрический магнитопровод. При этом можно выделить ряд общих конструктивных особенностей таких СМППМ:

- постоянные магниты расположены на подвижном магнитопроводе, который вместе с внешним магнитопроводом используется для замыкания рабочего магнитного потока;
- магнитопровод статора может быть выполнен с пазами или в безпазовом исполнении, во внутреннем пространстве которого расположены обмотки;
- постоянные магниты могут быть намагничены в радиальном или тангенциальном (аксиальном) направлении;
- магнитная система может быть один или несколько технологических воздушных зазоров.

1.3. Особенности рабочего процесса тихоходных синхронных генераторов и функциональные схемы ВЭТК ВЭУ.

К числу ВЭТК в полной мере можно отнести энергетические установки, в качестве источника питания которых используется тихоходный СГПМ. Повышенный научный и практический интерес к разработке, проектированию, исследованию и внедрению тихоходных синхронных генераторов на постоянных магнитах вызван необходимостью оснащения эффективными возобновляемыми источниками энергии, основанными на принципах работы ветро-, гидро- и пневмоэнергетики. Толчком творческому мышлению отечественной и зарубежной науки по созданию и внедрению в производство и быт новых видов конструкций магнитоэлектрических машин с возбуждением от постоянных магнитов послужило появление на потребительском рынке широкого ассортимента доступных к использованию высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов из сплава неодим-железо-бор (NdFeB).

Диапазон мощности энергетических установок в составе электротехнических комплексов на основе СГПМ достаточно велик: от питания отдельных электроприемников в составе бортовой сети (от нескольких вольт-ампер) до электроснабжения небольших населенных пунктов и предприятий, получающих питание от создаваемых в рамках стратегических программ развития ветропарков (в этом случае установленная мощность ветропарка может достигать нескольких мегавольт-ампер).

Определение ключевых пусковых и эксплуатационных характеристик СГПМ является важнейшей задачей при проектировании ВЭТК с СГПМ.

К числу общих характеристик можно отнести:

- обеспечение жесткости внешней характеристики;
- совместимость СГПМ с системой управления ВЭК;
- механическая прочность подвижной системы;

- удовлетворение стандарта качества электрической энергии, в части касающихся частоты выходного напряжения, допустимого отклонения и колебания напряжения, а также коэффициентов несинусоидальности, длительности провала напряжения, длительность временного перенапряжения
- минимизация массы используемых активных материалов;
- минимизация тепловых потерь.

Разработка ВЭТК с тихоходным СГПМ при отсутствии редуктора-мультипликатора, повышающего скорость вращения индуктора, остро ставит комплексную задачу повышения выходной мощности, решение которой поэтапно производится на различных этапах проектирования. При этом, в конструкции энергетической установки электромеханический преобразователь энергии и рабочая машина находятся на одном валу и реализуются как единое электротехнический комплекс.

Сегодня внедрение возобновляемых источников электрической энергии используется во многих регионах мира. Мотивация к их применению обусловлена многими факторами, среди которых наиболее важными являются экономичность, надежность, безопасность, высокая скорость монтажа при относительно невысоких затратах. В условиях возрастающих требований к уменьшению вредных выбросов применение альтернативной энергетики является целесообразным. Кроме этого, многообразие выпускаемых ветроэнергетических установок на различную выходную мощность обуславливает все большую популярность при выборе источника электроснабжения от нескольких киловатт до нескольких мегаватт.

Потенциал ветровой энергии в России достаточно велик: около 38% сосредоточено в Европейской части, до 30% на Дальнем Востоке, в Западной Сибири и Восточной Сибири около 16% [19, 65].

Тихоходные синхронные генераторы с постоянными магнитами оказывают заметное влияние на развитие альтернативной энергетики. В

настоящее время благодаря высоким энергетическим показателям СГПМ, обусловленным ростом их установленной мощности и отсутствием затрат энергии на возбуждение, определены пути развития альтернативной энергетики по использованию возобновляемых источников энергии, какими являются ветроэнергетические установки, дизельные генераторы, гидрогенераторы и другие [61, 79, 80]. Традиционно возобновляемые источники энергии классифицируются по следующему принципу: солнечная энергия, вода (энергия приливов и отливов, энергия рек), энергия ветра, энергия биомассы, геотермальная энергия. В отличие от других возобновляемых источников достоинствами ветроэнергетики являются фактическая повсеместность ветра и бесконечность ресурсов, вызванная циклонической деятельностью атмосферы Земли и отсутствие экологических проблем загрязнения окружающей среды. Принцип действия ветроэнергетических установок (ВЭУ), основанный на преобразовании кинетической энергии ветра в механическую энергию ветродвигателем и последующим ее преобразованием в самом синхронном генераторе в электрическую энергию, позволяет создать единый замкнутый цикл работы тихоходные СГПМ с другими источниками энергии, например, в паре с дизельными генераторами, солнечными батареями и др. Получение энергии из ветра на постоянной основе является труднодостижимой и приоритетной задачей мировой ветроэнергетики. Странами - мировыми лидерами с развитой ветроэнергетикой являются Китай, США, Германия, Испания, Индия. Конструкции ВЭУ делятся на два вида принципиально разных устройств, технические решения которых не повторяются, а именно: горизонтально осевые ВЭУ (пропеллерные) и вертикально осевые ВЭУ (роторные) [19, 28, 108]. В мире, особенно за рубежом, широкое распространение получили конструкции горизонтально-осевых ВЭУ с двумя или тремя лопастями ветроколеса [194, 200, 208]. Условием максимальной их эффективности является постоянная ориентация оси вращения ветроколеса с направлением

скорости ветра. Ориентация ветроколеса на ветер при этом обеспечивается механизмами и системой ориентации, включающей в себя датчик ветра, привод, редуктор опорно-поворотный круг с зубчатым зацеплением для поворота гондолы ВЭУ, а также тормозные фиксирующие устройства для удержания головки ВЭУ в требуемом положении. При этом полного совпадения оси вращения ветроколеса с направлением ветра получить не удастся вследствие запаздывания системы ориентации ветроколеса и естественного ветрового потока, в котором крупномасштабная турбулентность приводит к различным направлениям потоков воздуха по длине размаха лопастей ветроколеса. Отличительной особенностью вертикально-осевых ВЭУ является то, что в них практически во всем рабочем диапазоне ветров поддерживается оптимальная быстроходность, при которой реализуется максимальный коэффициент использования энергии ветра. Вертикально-осевые конструкции ВЭУ полностью не зависят от направления движения потока воздуха, в их конструкциях отсутствуют угловая передача крутящего момента и принудительные механизмы для запуска ветроколеса при стартовой скорости ветра 1,5–2 м/с. Вертикально-осевые конструкции ВЭУ имеют противодействие сильным порывам ветра и работают при любых климатических условиях с КПД не ниже 25–28 %. К недостаткам вертикально-осевых конструкций относятся большая материалоемкость ВЭУ и существенная их стоимость. Указанные недостатки не принимаются во внимание, когда речь идет об обеспечении электрической энергией территорий, имеющих малую плотность населения, в том числе труднодоступных горных населенных пунктов, военных объектов, фермерских хозяйств, удаленных или не присоединенных к централизованным энергосистемам по экономическим соображениям. В России решение этой важной задачи идет по нескольким направлениям, а именно:

- создание мобильных плавучих атомных электростанций малой мощности (ПАТЭС), какой является российский проект первая в мире ПАТЭС

«Академик Ломоносов», построенная специально для северного города Певек Чукотского автономного округа для замены небольшой по мощности Билибинской АЭС [19];

- освоение возобновляемых источников энергии согласно стратегии развития энергетики [173], предусматривающей создание новейших поколений вертикально-осевых ВЭУ, которые мало изучены и представляют собой большое поле творчества для ученых и специалистов.

Вертикально-осевые ВЭУ при сравнении с горизонтально-осевыми имеют максимальный спектр сфер применения по виду деятельности и климатических зон на всей территории Российской Федерации, а именно: полное или частичное электроснабжение, водоснабжение и отопление небольших поселков, жилых домов, коттеджей, ферм, офисных помещений, малых производственных цехов и мастерских; водоснабжение и очистка от загрязнений, солей; осушение заболоченных участков местности; электропитание световых указателей, осветительных приборов и др. Вертикально-осевые ВЭУ с ротором Дарье получили широкое распространение во многих странах мира, причем в Канаде, США, Нидерландах предпочтение отдается классической схеме с криволинейными лопастями, а в Великобритании, Германии, Индии, Китае и России в качестве основной схемы приняты роторы с прямыми лопастями, параллельными оси вращения. Диапазон мощности таких ВЭУ также расширяется, одновременно с этим растет потребность в создании малых вертикально-осевых ВЭУ, используемых для автономного энергоснабжения мощностью 0,1; 1; 3; 5; 7,5; 10, 15; 30 и 100 кВт. Наблюдается тенденция приближения малых ВЭУ к месту расположения загородного коттеджа, многоэтажного дома, строения или сооружения. Такие решения привлекательны как с технической, так и экономической точки зрения и реализованы в США, Канаде, Европе, Индии, Китае. В России эта тенденция также прослеживается, что подтверждается растущим количеством заявок от потенциальных потребителей на размещение

малых ВЭУ. В России работает много предприятий-производителей малых вертикально-осевых ВЭУ, в их число входят: ООО "ГРЦ-Вертикаль", ФГУП Государственный Ракетный Центр (КБ им. Академика В. П. Макеева), ООО «Армада-Плюс, ООО «Промэнерго», НИИ «Уралмет», НПО «Электросфера», НПФ «Мехатроника-Про» и др.

При разработке вертикально-осевых ВЭУ применяются различные технические решения по геометрии и конструктивному исполнению тихоходных СГПМ. Разнообразие предлагаемых разработчиками конструкций синхронных генераторов свидетельствует о трудоемкости поисков оптимальных решений, в которых было бы сочетание заданных технических условий с экономическими параметрами, связанными со снижением массы и габаритов синхронного генератора, низкой стоимостью активных материалов, монтажа, пусковых и наладочных работ, ремонта и обслуживания. Определение конструкции СГПМ во многом носит эвристический характер. После этапа конструирования начинается процесс непосредственного проектирования самого синхронного генератора, состоящий из предварительной и поверочной стадий расчета. На предварительной стадии определяются основные размеры магнитной системы и обмоточные данные генератора методами теории магнитных и электрических цепей. На стадии поверочных расчетов уточняются электромагнитные нагрузки синхронного генератора, основные размеры магнитной системы и обмоточные данные якоря, масса активных материалов, потери и КПД. Указанная последовательность стадий проектирования СГПМ представляет общий подход, характерный для электрических машин различного назначения, который реализуется в предложениях разработчиков в виде конкретных алгоритмов и программ для ПК. На всех стадиях проектирования должно уделяться особое внимание способам повышения эффективности и надежности работы синхронного генератора. При этом центральное место в решении задачи оптимального проектирования занимает исследование численных моделей магнитных полей

с применением метода конечных элементов [54, 63, 136, 142]. По умолчанию при эвристическом поиске оптимальной конструкции СГПМ, находящихся отражение в выработке большого числа патентов и заявок на изобретение, существует нечеткая концепция выбора в магнитной системе одинаковой формы поперечного сечения стальных полюсов и постоянных магнитов. Возможная ошибка принятия решения на этом этапе может иметь негативные последствия, как по эффективности работы самого синхронного генератора, так и технологичности его изготовления. Решение электротехнической задачи о индуцированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения позволяет предотвратить ошибку при конструировании новых типов СГПМ [145].



Рис. 1.9. Ветроэнергетическая установка «Бриз-5000»

Одним из примеров развития альтернативной энергетики является продукция НПО «Электросфера», г. Санкт-Петербург. Выпускаемый ветрогенератор «Бриз-5000» предназначен для автономного электроснабжения потребителей, не имеющих доступа к сетям централизованного электроснабжения (рис. 1.9). Компания производит ветроэнергетические установки и гибридные системы для автономного электроснабжения мощностью от 5 до 60 кВт. Основное назначение ветрогенератора заключается в заряде

аккумуляторной батареи 48 В. При использовании инвертора потребитель получает стандартное напряжение трехфазного переменного тока 380В, 50 Гц.

Тип генератора – синхронный трехфазный с возбуждением от постоянных магнитов. Основными параметрами ветрогенератора являются мощность – 5 кВт, номинальное напряжение – 48 В после выпрямителя, масса ветрогенератора – 230 кг [86]. В состав ВЭУ входят ветрогенератор с ветроколесом диаметром 5 м, инвертор, аккумуляторная батарея, регулятор заряда с балластным сопротивлением, мачта с растяжками. Регулирование скорости вращения осуществляется при помощи флюгерного устройства, которое снабжено защитой при скоростях ветра более 13.5 м/с. Метод защиты – увод ветроколеса от основного потока.

Общим направлением при создании ВЭУ является включение в состав инвертора напряжения, балластных сопротивлений, аккумуляторной батареи.

Функциональные схемы ВЭТК включающие в свой состав предложенные и зарегистрированные в патентах на изобретение СГПМ модульного типа с вертикальной осью вращения и СГПМ имеющие общий магнитопровод с горизонтальной осью вращения представлены на рис. 1.10 и 1.11. Функциональная схема включает в свой состав: 1 - датчик скорости; 2 – измерительную систему с датчиками напряжения и тока; 3 – информационную систему (ИС); 4 - систему управления (СИ); 5 – ветроколесо; 6 - электромеханическую систему (ЭМС); 7 – выпрямительный блок; 8 – инвертор напряжения.

В процессе эксплуатации данные, получаемые с датчиков, поступают на блок измерения. Блок измерений производит сравнение заданного сигнала по скорости, выходному напряжению и тока в нагрузке с сигналами, поступающих с датчиков. При этом сигнал рассогласования с блока измерения поступает на систему управления и регулирования, которая формирует сигналы управления для переключения модулей в СГПМ модульного типа, корректора коэффициента мощности нагрузки.

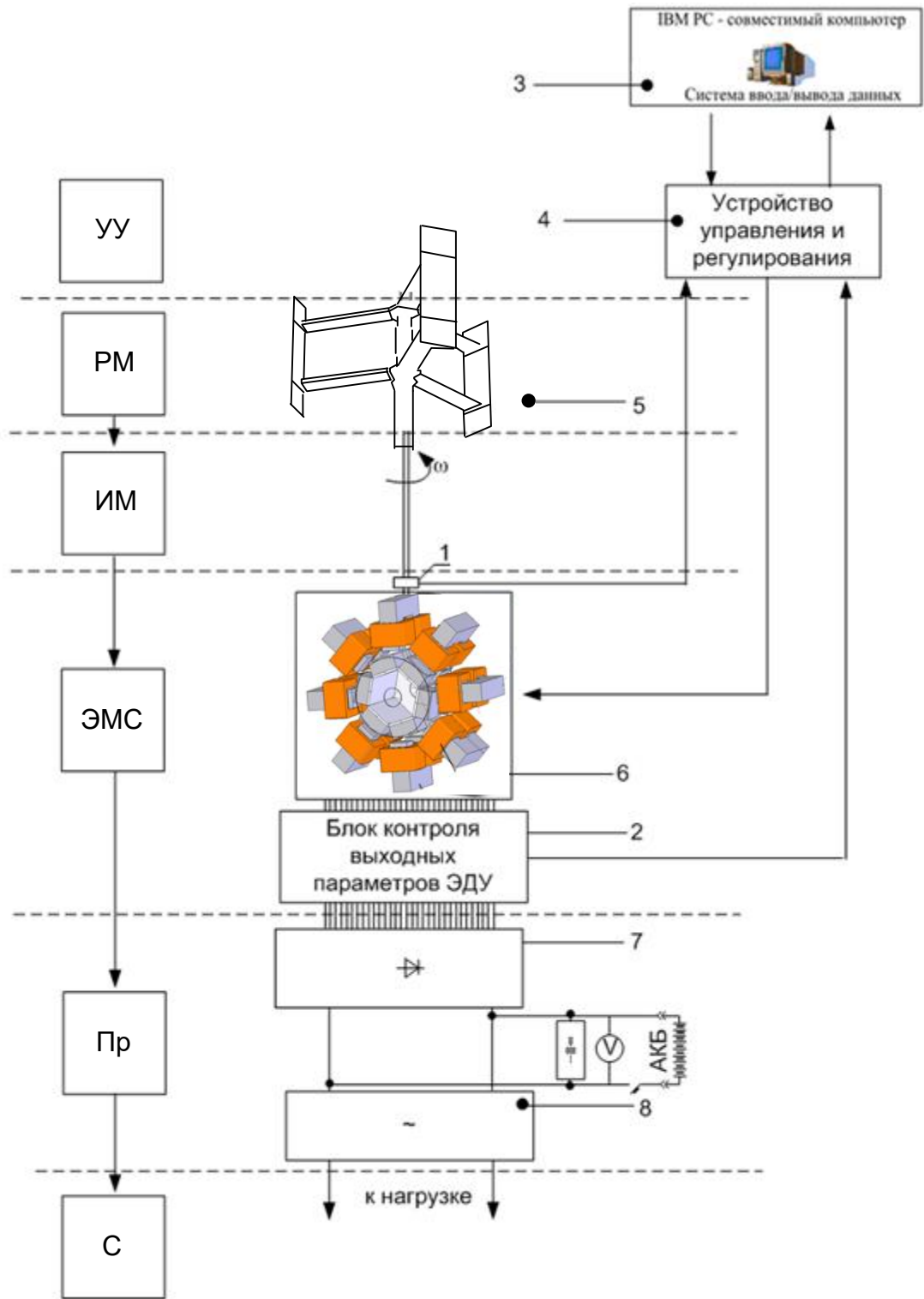


Рис. 1.10. Функциональная схема ВЭТК с СГПМ модульного типа.

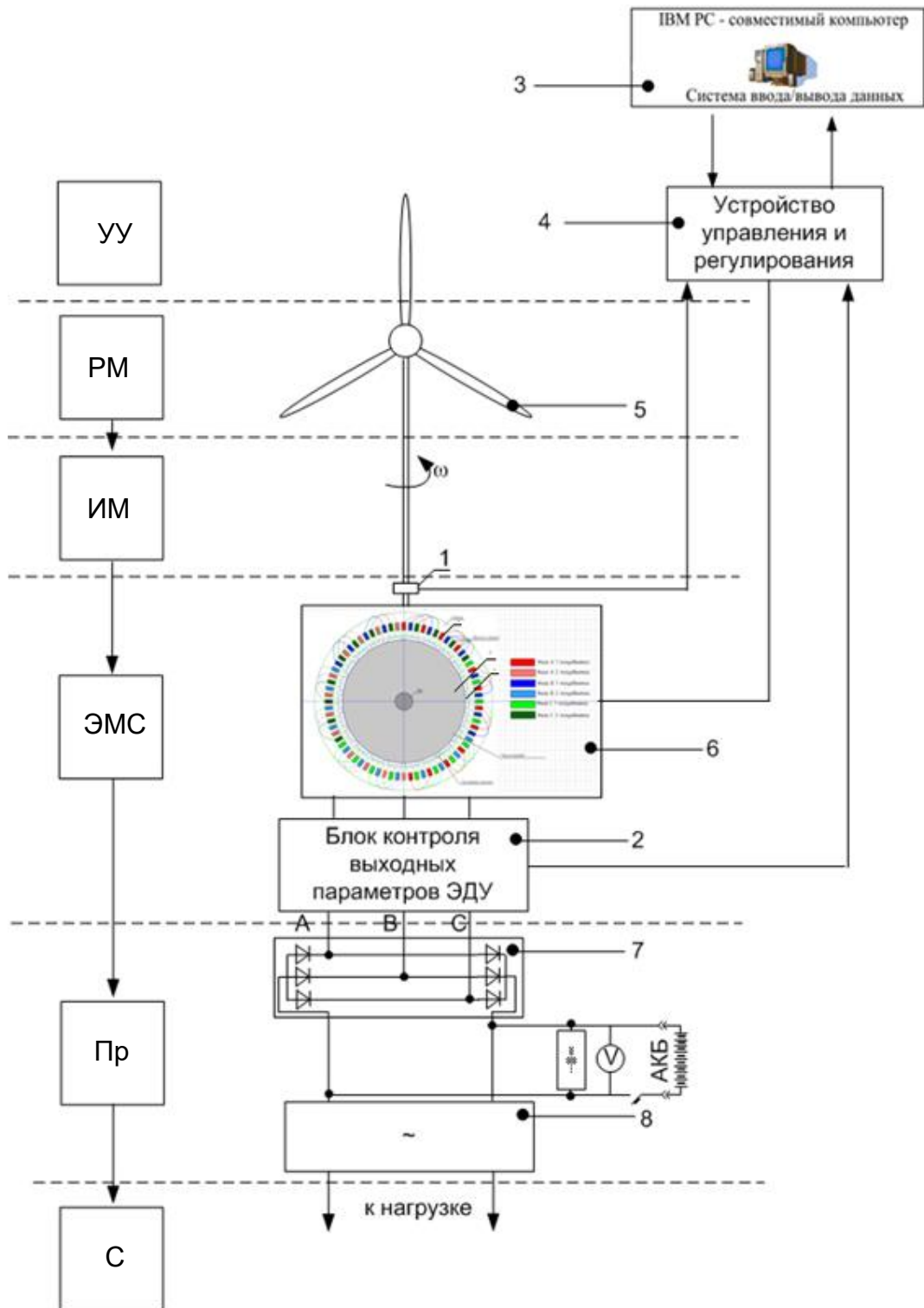


Рис. 1.11. Функциональная схема ВЭТК с СГПМ с общим магнитопроводом.

1.4. Особенности рабочего процесса и функциональные схемы ВЭТК ЛМЭП на основе СДПМ возвратно-поступательного действия для испытаний реологических характеристик эластомеров.

Механические свойства эластомеров обычно определяют при испытаниях на растяжение. Эластомеры характеризуются условной прочностью при растяжении $\sigma_B = 10 - 60$ МПа и большим относительным удлинением опытных образцов в момент разрыва $\delta = 900 - 1000$ %. При испытаниях трещины в эластомерах распространяются медленно, а сопротивление раздиру составляет $20 - 150$ кН/м. Справочные данные механических свойств применяемых резиновых смесей и их основное назначение приведены в [74]. При эксплуатации изделия, изготовленные из эластомеров, испытывают напряжения, которые меньше временного сопротивления. Часть механической энергии, подводимой к изделиям из эластомеров, находящихся в напряженно деформированном состоянии, идет на преодоление межмолекулярного взаимодействия и преобразуется в тепловую энергию. При однократном цикле нагружения возникают гистерезисные потери. При многократном циклическом нагружении они приобретают особое значение. В массивных изделиях из-за невысокой теплопроводности эластомеров температура внутренних участков повышается на 100^0 С и более, что ведет к снижению прочности эластомеров и усилению окислительного старения. Гистерезисные потери обеспечили использование эластомеров в качестве основного материала для амортизаторов. В зависимости от сопротивления старению эластомеры подразделяют на стойкие (не содержащие двойных связей), умеренно-стойкие и нестойкие. Стойкими являются эластомеры на основе этиленпропиленовых и фторкаучуков. У них эффект старения проявляется с годами. К умеренно-стойким эластомерам относятся эластомеры на основе хлоропренового и бутилового каучуков. В этих материалах трещины уже

начинают проявляться с течением нескольких месяцев. Нестойкими являются эластомеры общего назначения на основе изопреновых, бутадиен-стирольных, бутадиен-нитрильных и ряда других каучуков. Трещины в них возникают после непродолжительного растяжения, изгиба или кручения.

Номенклатура изделий из эластомеров исключительно широка. Основное значение для машиностроения имеют шины для транспортных средств, амортизаторы, различные прокладки и манжеты и т.п. Для производства изделий из эластомеров применяют эластомеры общего и специального назначения. К эластомерам общего назначения относят натуральную резину и практически одинаковую с ней по свойствам изопреновую резину, а также превосходящие по степени изнашивания натуральную резину бутадиен-стирольные резины. К специальным эластомерам относятся морозостойкие (бутадиен-нитрильные резины), теплостойкие (этилен-пропиленовые и фторкаучуковые резины), маслостойкие (хлоропреновые, бутадиен-нитрильные, фторкаучуковые резины). Исключительная ценность эластомеров сделала необходимой комплексную проверку их свойств по стандартным испытаниям на растяжение, раздир, морозостойкость, сопротивление термическому старению, стойкость в жидких средах и др.

К числу стандартных испытаний относится определение вязкоупругих свойств эластомеров, подверженных динамическим нагрузкам, например, на колесах, частях машины (на прокладках) и сцеплении или в соединительных элементах для изоляции колебаний (действия пружины, отдача и т. п.). В соответствии с нормами испытаний по исследованию вязкоупругих свойств эластомеров колебания напряжения σ и деформации ε в линейных областях (исключая резонанс) подчиняются условиям [182]:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t), \quad \varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_a \sin(\omega t - \delta) \quad (1.1)$$

При установившихся колебаниях значения $\sigma_m = \text{const}$ и $\varepsilon_m = \text{const}$. Амплитудные значения переменных составляющих σ_a и ε_a от значений σ_m и ε_m соответственно не зависят. Переменные составляющие напряжения и деформации изменяются во времени с одинаковой частотой, но деформация отстает от напряжения на угол сдвига фаз δ .

Для удобства описания вязкоупругого поведения эластомера при периодической деформации в нормы испытаний вводится в рассмотрение фактор потерь $d = \text{tg}\delta$ и динамический модуль при растяжении или сжатии $|E^*| = \sigma_a / \varepsilon_a$, характеризующий динамическую упругость или давление в отношении колебания. При циклической нагрузке удельные потери в эластомере выражаются площадью эллипса, построенного на диаграмме в осях деформация – напряжение, и вычисляются по формуле $W_{\text{уд}} = \pi \varepsilon_a \sigma_a \sin \delta$.

Исходя из норм испытаний вязкоупругих свойств эластомеров на растяжение или сжатие, к испытательному стенду предъявляются следующие требования. Испытательный стенд должен обладать способностью

- задавать требуемый закон изменения внешней механической силы или деформации в испытываемом образце эластомера и иметь возможность варьировать их значения по среднему значению и амплитуде синусоидальной составляющей;
- измерить деформацию опытного образца эластомера или держать ее постоянной;
- измерить внешнюю механическую силу, амплитуду деформации и удельные потери при циклической нагрузке для вычисления угла сдвига фаз между силой и деформацией;
- измерить температуру испытываемого образца эластомера.

Согласно нормам испытаний эластомеров, способ поддержания температуры заключается в следующем. Опытный образец эластомера

выдерживается в течение 10 минут в печи или в испытательном стенде без нагрузки. При нагрузке давлением задается небольшая внутренняя деформация, чтобы зафиксировать испытываемый образец в зажимах. Затем подключается вибрационная нагрузка на пять минут. В течение пятиминутных измерений температура опытного образца эластомера по показанию датчика не должна измениться больше, чем на 1°C , иначе время контроля уменьшается или контроль проводится при меньших амплитудах деформации.

Определение динамического модуля $|E|$ и коэффициента потерь $\text{tg}\delta$ согласно методике испытаний проводится в соответствии с установленным планом температур при частоте 10 Гц. Во время измерения поддерживаются средняя длина L_m и амплитуда L_a опытного образца эластомера. Измеряются соответствующие силы F_m и F_a или поддерживаются постоянными сила F_m и амплитуда силы F_a , а измеряются соответствующие величины L_m и L_a . В первом случае при применении жесткости по Шору от 35 до 80 рекомендуются следующие значения $L_m = 8.0$ мм и $L_a = 0.2$ мм. Это соответствует деформации испытываемого образца $\varepsilon_m = 20\%$ и $\varepsilon_a = 2\%$. Во втором случае рекомендуется результирующая сила $F_m = 60$ Н и амплитуда силы $F_a = 40$ Н, что соответствует среднему напряжению около $\sigma_m = 0.75$ МПа и амплитуде напряжения $\sigma_a = 0.5$ МПа испытываемого образца эластомера.

При испытаниях напряжения и деформации определяются из уравнений:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0}, \sigma_a = \frac{F_a}{A_0}, \varepsilon_m = \frac{L_m - L_0}{L_0}, \varepsilon_a = \frac{L_a}{L_0} \quad (1.2)$$

Удельные потери в эластомере определяются по площади эллипса на диаграмме деформация – напряжение: $A_w = WV_0$ или $A_w = \pi F_a L_a \sin \delta$.

Из этого уравнения может быть определен $\sin \delta$ и механический фактор потерь $\text{tg}\delta$.

Статический модуль упругости рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} \quad \text{или} \quad E = \frac{F_m}{A_0} \frac{L_0}{(L_m - L_0)}, \quad (1.3)$$

где A_0 - площадь начального поперечного сечения.

Для объема V_0 опытного образца эластомера можно записать:

$$A_0 L_0 = A_m L_m \quad (1.4)$$

При наложении колебаний динамической нагрузки справедливо соотношение:

$$A_{\max} (L_m - L_a) = A_{\min} (L_m + L_a), \quad (1.5)$$

где A_{\max} , A_{\min} – соответственно максимальное и минимальное поперечное сечение опытного образца эластомера.

Соотношения (1.4) и (1.5) дают возможность скорректировать опытные значения статического и динамического модуля упругости в виде:

$$E_{\text{korр}} = E \frac{L_m}{L_0}, \quad |E_{\text{korр}}^*| = |E^*| \frac{L_m + (F_m / F_a) L_a}{L_0}. \quad (1.6)$$

При установившихся колебаниях в нелинейных областях для учета вязкоупругих свойств эластомеров необходимо экспериментально полученные временные зависимости механической силы и деформации разложить в ряд Фурье и найти комплексные амплитуды основных гармоник механической силы $F^*(1)$ и деформации $X^*(1)$ в соответствии с методикой [182, 185]. По ним вычисляется комплексный модуль $K^*(1) = F^*(1) / X^*(1)$ и находятся начальные фазы первых гармонических составляющих механической силы и деформации

$$\varphi_F = \arctg \left(\frac{\text{Im}(F^*(1))}{\text{Re}(F^*(1))} \right), \quad \varphi_X = \arctg \left(\frac{\text{Im}(X^*(1))}{\text{Re}(X^*(1))} \right). \quad (1.7)$$

Механический фактор потерь при этом будет

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}(\varphi_F - \varphi_X). \quad (1.8)$$

Модули упругости $K_y(1)$ и вязкости $K_B(1)$ находятся из соотношений

$$K_y(1) = K^*(1) \cos \delta, \quad K_B(1) = K^*(1) \sin \delta. \quad (1.9)$$

Соотношения (1.1) - (1.9) определяют значения основных реологических характеристик опытных образцов эластомеров при динамических испытаниях. Принимая во внимание особенности рабочего процесса и требования стандарта испытаний вязкоупругих свойств эластомеров при установившихся колебаниях, предъявляемых к электроприводу, представляется целесообразным использование в качестве привода магнитоэлектрического двигателя возвратно-поступательного движения. В пользу использования такого типа привода по сравнению с приводом вращательного действия можно отнести простоту конструктивного исполнения двигателя, отсутствие передаточного и преобразовательного механизмов, снижение расхода активных материалов, повышение коэффициента полезного действия привода, а также прямо пропорциональную зависимость механического усилия, развиваемого двигателем, от тока в обмотке.

Функциональная схема ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров показана на рис. 1.12, включает в свой состав 1- датчик температуры; 2 – датчик силы; 3 – датчик перемещения; 4 – информационная система (ИС); 5- система управления (СИ), 6 – термостатическая система (ТС), 7 – вязкоупругая система (ВУС), 8 – электромеханическая система (ЭМС), 9 – электрическая система (ЭС)

Из схемы видно, что реологические характеристики эластомеров получают с использованием информации, поступившей с датчиков перемещения и силы. Для этого в процессе динамических испытаний данные, полученные с датчиков перемещения и силы, поступают на блок измерения, а затем в персональный компьютер.

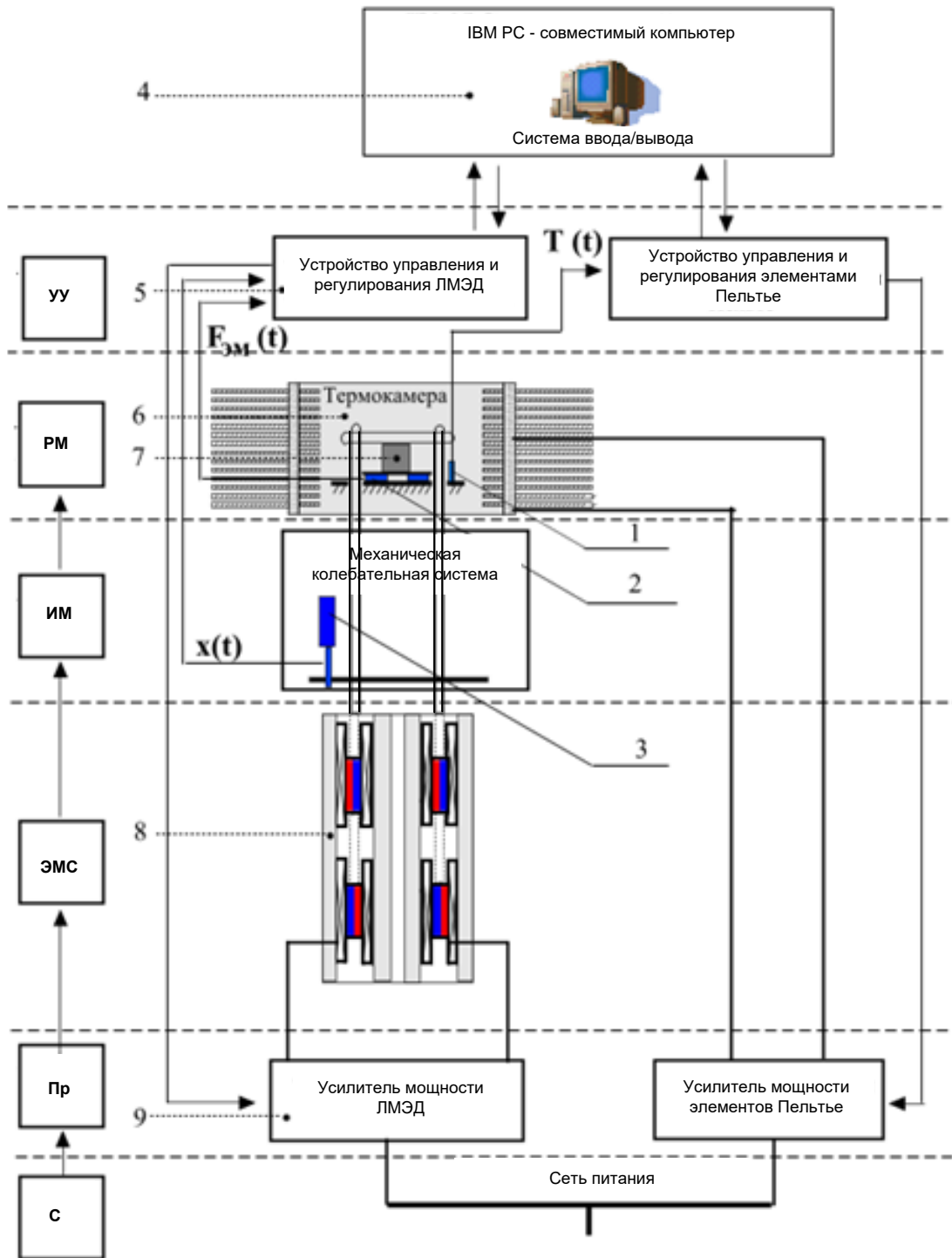


Рис. 1.12. Функциональная схема ЛМЭП с СМПИМ возвратно-поступательного движения для испытания вязкоупругих свойств эластомеров.

Блок измерений производит сравнение опорного сигнала по силе или перемещению с сигналами, поступающими с датчиков.

При этом сигнал рассогласования с блока измерения поступает на систему управления и регулирования, которая формирует соответствующее напряжение блока питания на обмотке магнитоэлектрического двигателя. В компьютере производится обработка информации, поступающей с датчиков, расчет временных зависимостей напряжений и деформаций в опытных образцах эластомеров, разложение этих зависимостей в ряд Фурье и определение реологических характеристик эластомеров по соотношениям (1.1) - (1.9).

Использование в ЛМЭП в качестве нагрузочного узла линейного магнитоэлектрического двигателя позволяет проводить статические и динамические испытания вязкоупругих свойств эластомеров, включая исследование процессов релаксации напряжения в опытных образцах эластомеров при заданной деформации и температуре. За счет быстрой и качественной передачи информации от системы управления и регулирования на нагрузочный узел обеспечиваются условия стандарта испытаний, а с помощью блока измерения и персонального компьютера повышается точность определения реологических характеристик эластомеров.

1.5. Особенности рабочего процесса и функциональные схемы ВЭТК ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора.

Широкое применение автономных установок для выработки сжатого газа обусловлено необходимостью их использования во многих ключевых для экономики отраслях промышленности, например, передвижные компрессорные установки общего и специального назначения среднего и высокого давления находят применение для обслуживания месторождений

нефти и газа, в составе газонаполнительных станций, функциональных узлах транспорта, холодильных установок рефрижераторных объектов. Многообразие представленных комплексов различного назначения объединяют общие требования, среди которых актуальными можно считать повышение мобильности и автономности, возможность транспортировки (в том числе и уменьшение массогабаритных показателей), надежность, большой эксплуатационный ресурс, широкий диапазон рабочих температур, упрощенный ввод в рабочий режим. Удовлетворение указанным требованиям невозможно без совершенствования компрессорных ступеней, что связано с исследованием процессов тепломассообмена с учетом их конструктивных особенностей и условий ее функционирования в составе комплекса [176].

В компрессорах одновременно протекают разные тепловые и газодинамические процессы, существенно влияющие на производительность. Длительность отдельных процессов мала, в связи с чем фиксация и их учет представляется сложной задачей. Глубокая взаимосвязь протекающих процессов сопряжено с применением сложного математического аппарата [106]. К числу особенностей рабочего процесса ступени компрессора можно отнести учет мертвого объема в цилиндре, подогрева газа при всасывании, тепловой инерции стенок рабочей полости, потерь давления на гидравлических сопротивлениях в клапанах, пульсации давления в стандартной точке нагнетания и всасывания, механического трения.

Особый интерес представляют компрессорные ступени производительностью от 0.5 до 100 м³/мин с рабочим давлением нагнетания до 2 МПа.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные отечественными учеными при фиксированных конструктивных и режимных параметрах ступени, подтверждают возможность повышения давления в одной ступени с атмосферного до среднего при допустимой температуре нагнетания. В работе [25] указывается на возможность получения давления воздуха в

одной тихоходной ступени с атмосферного до давлений близких к 2 МПа при водяном охлаждении цилиндра и температурой нагнетания 390 К. В настоящее время указанный температурный режим характерен для отдельных ступеней воздушных многоступенчатых компрессорных агрегатов, степень повышения давления в каждой из которых обычно не превышает 4–6. Одноступенчатое сжатие применяют при небольшом отношении конечного давления к начальному, а многоступенчатое – при среднем и большом отношении давления. Это открывает перспективы применения одноступенчатых схем для получения сжатых газов среднего давления без дополнительного теплообменного оборудования. Однако при увеличении степени повышения давления резко падает коэффициент подачи, что во многом объясняется влиянием неплотностей в рабочей камере ступени. Так, при степени повышения давления в ступени до 30...40 эффективность рабочего процесса можно считать приемлемой для практической реализации, однако для режимов с и более высокими давлениями нагнетания необходимо искать пути повышения эффективности рабочего процесса.

В настоящее время широкое распространение получили линейные приводы электромеханического и электрогидравлического типа (отношение хода поршня $-S$ к диаметру цилиндра $-D$ более 10; частота перемещения поршня 20 – 100 циклов в минуту).

Такие приводы в настоящее время получают всё большее распространение в машиностроении, станкостроении, металлургии, нефтедобыче, на транспорте и т.д. Это обусловлено их неоспоримыми преимуществами в отношении конструктивных и эксплуатационных характеристик относительно ранее применяемых приводов поршневого компрессора [106], таких как отсутствие вращающихся частей, приводящих к уменьшению вибрации и шума, возможность изменять ход поршня, осуществлять движение исполнительного органа по сложным законам.

В зависимости от используемого вида энергии линейные приводы подразделяют на электромагнитные; пневматические; гидравлические; электрические (электромеханические); комбинированные [106].

К линейным приводам любого типа независимо от области применения предъявляются следующие общие требования:

- минимальные габаритные размеры при высоких энергетических показателях, обеспечивающие большое значение отношения выходной мощности к массе;
- возможность работы в режиме автоматического управления и регулирования, обеспечивающая оптимальные законы разгона и торможения при минимальном времени переходных процессов;
- быстродействие, т.е. осуществление движений исполнительных механизмов с высокими скоростями и малой погрешностью позиционирования;
- малая масса элементов привода при высоком КПД всей конструкции;
- надежность и долговечность элементов конструкции;
- удобство монтажа, ремонта, обслуживания, переналадки и бесшумность работы.

Одним из таких линейных приводов является электромеханический тип привода. Он состоит из гибридного шагового двигателя и линейной передачи. К преимуществам линейного электромеханического привода можно отнести [41, 59, 127, 161]:

- привод обладает высокой точностью позиционирования. Для примера точность может достигать 8 мкм с повторяемостью не хуже 1 мкм;
- обеспечивается полное управление параметрами движения. Могут включать энкодеры для контроля скорости, положения, момента и приложенных сил;
- отсутствие систем под давлением для привода рабочего органа позволяет полностью исключить возможность загрязнения окружающей среды.

К недостаткам линейного электромеханического привода можно отнести:

- начальная стоимость электрических приводов выше пневматических и гидравлических;
- при продолжительной работе электродвигатель может перегреваться, увеличивая износ редуктора;
- сила электропривода, допустимые осевые нагрузки и скоростные параметры электропривода определяются выбранным электродвигателем и не могут быть изменены в сторону увеличения (в том числе и при кратковременных перегрузках).

Приводы таких фирм, как Cetat, Exlar, Jrone и других часто используют для задач, где важна высокая динамика, точность, скорость и усилие [174]. Электромеханические приводы способны развивать ускорения до 100 м/с^2 как в прямом, так и в обратном направлении, тем самым осуществлять точные и высокоскоростные реверсивные движения. Линейные электромеханические приводы способны работать на скоростях до $1,5 \text{ м/с}$ с усилиями до 500 кН и имеют ход штока до $2,0 \text{ м}$ с точностью позиционирования единицы микрон.

Более широкое применение в различных отраслях техники получил электрогидравлический привод, что объясняется прежде всего такими преимуществами, как быстроедействие, значительные усилия, простота конструкции, требующим учета динамики привода. Благодаря возможности получения больших сил в очень ограниченном пространстве обеспечивается способность гидропривода к быстроедействию, развитию больших ускорений. По величине отношения развиваемого момента к моменту инерции ротора распространенные гидромоторы в $50 - 160$ раз превосходят электродвигатели той же мощности [191].

К недостаткам электрогидропривода является необходимость в гидравлической станции, повышенные требования к герметичности гидравлической системе, а также ограничения в отрицательном температурном диапазоне.

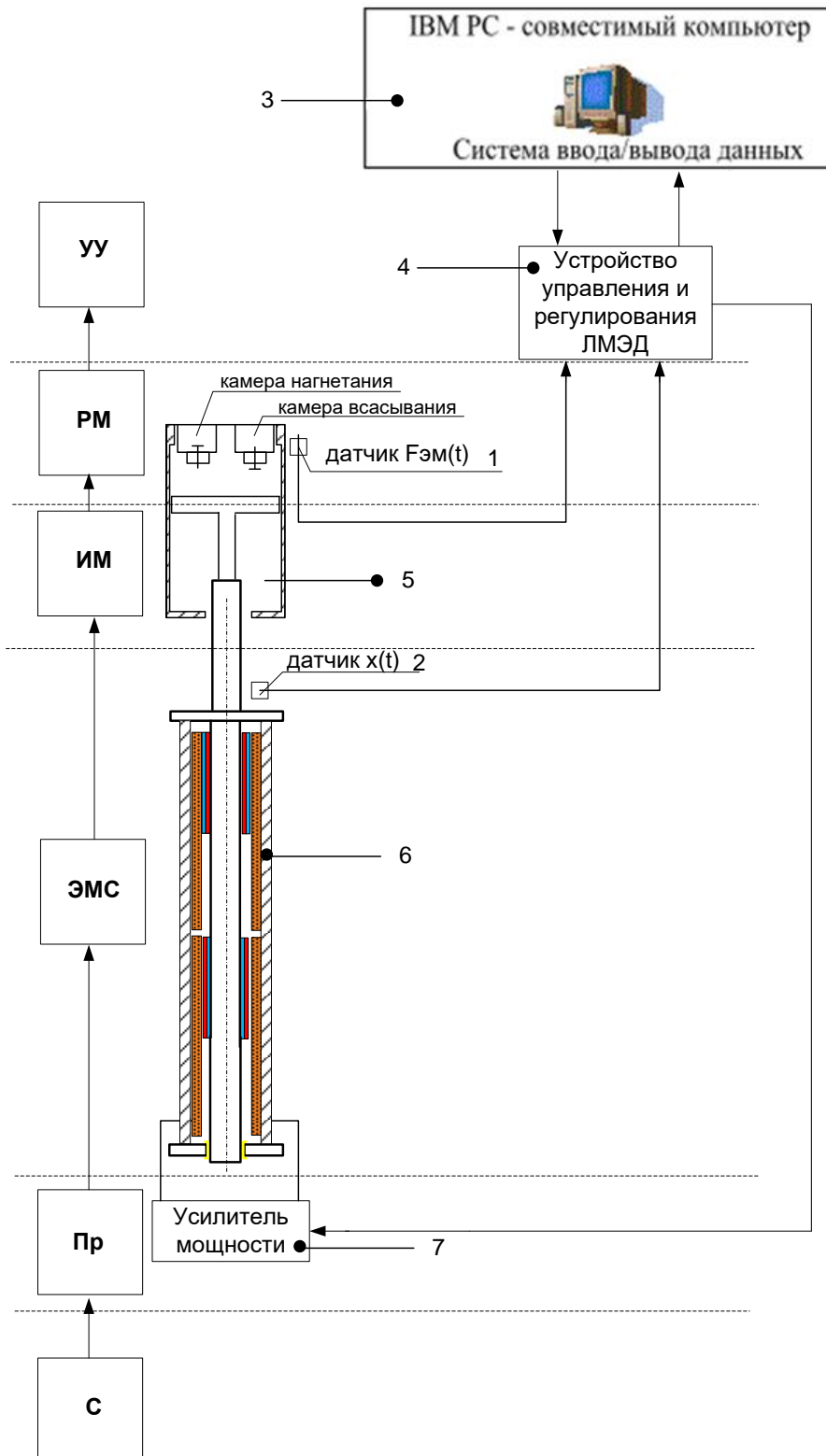


Рис. 1.13 Функциональная схема ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора.

Снижение уровня шума, вибраций, обеспечение надежности компрессорного оборудования, снижение температуры нагнетания в поршневых компрессорных агрегатах при средних и высоких давлениях обуславливают необходимость поиска новых альтернативных конструкций приводов компрессорных машин, например, разработки тихоходных СМПМ.

На рис. 1.13 представлена функциональная схема ЛМЭП с СМПМ одноступенчатого поршневого компрессора: 1- датчик силы; 2 – датчик перемещения; 3 – информационная система (ИС); 4- устройство управления (УУ), 5 – компрессорная ступень (КС), 6 – электромеханическая система (ЭМС), 7 – преобразовательное устройство (Пр).

1.6. Постановка задачи исследования.

Развитие научно-обоснованных технических и технологических решений по разработке методологических основ проектирования тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения, работающих в составе установок генерации электрической энергии и электропривода заключается в повышении энергетических показателей (КПД, удельной мощности, электромагнитной силы, вращающего момента), снижении массогабаритных показателей, минимизации временных затрат на оптимизацию конструкций тихоходных СМПМ, расчете их статических и динамических характеристик.

Эффективность методологических основ проектирования тихоходных СМПМ в составе ВЭТК обеспечивается на решении следующих задач:

1. Критический анализ состояния и перспективы развития тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК, обзор конструктивных схем тихоходных СГПМ с ротором аксиального (дискового), коаксиального (цилиндрического) и модульного типов и тихоходных СДПМ возвратно-поступательного движения с радиально намагниченными ПМ, аксиально намагниченными ПМ.

2. Постановка и решение задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК с учетом взаимосвязанных процессов энергопреобразования и внешних воздействующих факторов.

3. Получение в аналитическом виде взаимосвязи конструктивных параметров с энергетическими показателями работы тихоходных СМПМ, обеспечивающих максимум (КПД, удельной мощности, электромагнитной силы, вращающего момента) при минимуме массы используемых активных материалов.

4. Построение математических моделей тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК с использованием рекуррентных соотношений для определения функции магнитного потока (2Dмодель осесимметричного магнитного поля) и векторного магнитного потенциала (3Dмодель электромагнитного поля) в узлах триангуляционной сети расчета магнитного поля на основе МКЭ.

5. Разработка новых конструктивных схем тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, учитывающих особенности рабочего процесса.

6. Разработка алгоритмов и программ по оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, удовлетворяющих выбранному критерию оптимальности максимуму (КПД, удельной мощности, электромагнитной силы, вращающего момента) при минимуме массы используемых активных материалов.

7. Исследование пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК с системой управления, основанной на применении алгоритмов нечеткой логики.

8. Разработка рекомендации по оптимальному проектированию энергоэффективных тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-

поступательного движения в составе устройств генерации электроэнергии и электропривода.

1.7. Выводы.

1. Определены признаки высокотехнологичных комплексов на основе тихоходных магнитоэлектрических машин, а также выполнена классификация их пусковых и эксплуатационных характеристик в генераторном и двигательном режимах.

2. Рассмотрены особенности рабочих процессов и методы исследования ВЭУ и ЛМЭП, центральное место в которых занимает тихоходная магнитоэлектрическая машина, определяющая энергоэффективность ВЭТК.

3. Представлена классификация тихоходных СМПМ, а также подлежащие улучшению их пусковые и эксплуатационные характеристики, выбранные с учетом особенностей рабочего процесса и требований технического задания.

4. Показана необходимость использования комплексного подхода к созданию тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, состоящего из следующих этапов проектирования: предварительного расчета параметров магнитной системы СМПМ, моделирование с учетом рабочего процесса отдельных подсистем СМПМ и ВЭТК в целом и уточнение их массогабаритных показателей.

5. Показано, что существующие методы разработки и проектирования тихоходных СМПМ не позволяют осуществить обоснованный выбор базовой конструкции магнитной системы с учетом требований технического задания и особенностей рабочего режима.

6. Представлены функциональные схемы с различными конструкциями магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП для

исследования реологических свойств эластомеров и длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.

Основные выводы данной главы позволили обоснованно сформулировать цель данной работы и поставить задачи ее реализации.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ НА ЗАДАННУЮ НАГРУЗКУ.

2.1. Выявление возможностей и практических путей обеспечения современных требований к параметрам тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов на основе анализа критериев оптимальности.

В высокотехнологичных электротехнических комплексах тихоходные синхронные магнитоэлектрические машины являются основными компонентами. Они определяют динамику и эффективность рабочих процессов энергопреобразования в электроприводах поршневых компрессоров и насосов, ветроэнергетических установках, а также других электромеханических, электромагнитных, электрогидравлических, магнитоэлектрических системах, связанных между собой источниками энергии и внешней средой известными физическими законами. Для возбуждения рабочего магнитного потока в конструкциях тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин используются постоянные магниты из редкоземельных металлов, сплав неодима (Nd), железа (Fe) и бора (B), образуя тетрагональную кристаллическую структуру Nd₂Fe₁₄B с более высокими магнитными параметрами (остаточная индукция, коэрцитивная сила, удельная магнитная энергия), чем другие магнитотвердые сплавы, выпускаемые промышленностью [75, 107]. В конструкциях тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин применяются постоянные магниты, имеющие форму цилиндров, колец, прямоугольных призм или сегментов. От формы постоянных магнитов зависит основной тип их намагничивания (радиальное, диаметрально-аксиальное или аксиальное).

Исследованию рабочих процессов синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов и разработке методик расчета их параметров посвящено большое число научных работ в нашей стране, и за рубежом [13–15, 26, 46, 69, 77, 80]. Важный вклад в развитие общих вопросов создания таких машин внесли первые фундаментальные работы Э. Арнольда, М. Видмара, Р. Рихтера, К.И. Шенфера, а также труды Р.Р. Арнольда, В.А. Балагурова, Д.А. Бута, А.И. Вольдека, Ф.Р. Исмагилова, А.В. Иванова-Смоленского, Ю.З. Ковалева, И.П. Копылова, В.С. Кривцова, Б.В. Лукутина, И.Е. Овчинникова, А.М. Олейникова, М.Я., Хитерера и др. Несмотря на достигнутые успехи в области проектирования и создания синхронных магнитоэлектрических машин, проведенные в работах специалистов исследования не являются полными и не имеют систематизированный характер. Прежде всего, это относится к оптимизационным расчетам конструкций синхронных магнитоэлектрических машин, в которых определение главных размеров связано учетом специфических особенностей рабочего процесса и удовлетворением жестких требований по габаритам, используемой массе активных материалов на единицу мощности и электропотреблению.

Для быстроходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов, применяемых, например, в авиационной технике, особенности рабочего процесса заключаются в обеспечении механической прочности ротора и исследовании тепловых режимов, учетом нелинейных свойств выпрямительной нагрузки и высших гармонических составляющих тока в диапазоне высоких частот вращения роторов от тысячи до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту. При этом необходимость установки системы регулирования напряжения в таких быстроходных машинах требует принятия дополнительных условий по конструкции машины и устройству магнитной системы [31, 50, 64, 131].

В тихоходных синхронных магнитоэлектрических машинах, применяемых, например, в ветроэнергетических установках, особенности рабочего процесса заключаются в широком диапазоне варьирования электрической нагрузки из-за изменчивости силы и скорости ветра во времени, проектировании конструкций синхронных генераторов в многополюсном исполнении, вследствие отсутствия мультипликатора (механического звена усилителя крутящего момента). Работа тихоходных синхронных генераторов в ветроэнергетических установках сопровождается также частыми бросками тока при переходных процессах, нагревом активных частей, электродинамическими силами, вызывающими вибрации и механические биения вала при малых окружных скоростях ротора. При этом жесткость требований к показателям качества электрической энергии синхронных генераторов (например, по частоте) определяется разделением потребителей электрической энергии на категории в зависимости от важности, а требования к надежности системы электроснабжения в периоды безветрия соответственно наличием в электротехническом комплексе аккумуляторных батарей или работе в паре с другими источниками энергии, какими являются дизельные генераторы, солнечные батареи [69, 187, 189, 199].

Существенные отличия особенностей рабочего процесса быстроходных и тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов в конструктивном отношении и эксплуатационных режимах ставят перед исследователями и разработчиками новые, не решенные ранее задачи, различные по реализации, но общие по постановке цели. Это стремление к предельному упрощению конструкции электрической машины, отвечающей требованиям максимальной прочности и надежности, эффективности системы охлаждения, простоте обслуживания с учетом заданных основных исходных данных и технических условий на проектирование. Общность цели разработки синхронных магнитоэлектрических машин делает целесообразными объединение усилий к

использованию общего подхода для их проектирования, который на всех этапах развития должен учитывать новейшие достижения в теории и практике электромашиностроения [5, 27, 32, 69, 184, 188, 190, 196, 197, 206].

Центральное место в общем подходе занимает связь главных размеров электрической машины с допустимыми электромагнитными нагрузками, частотой вращения, магнитной индукцией в рабочем зазоре и другими параметрами, выраженная с помощью машинной постоянной Арнольда [21]

$$C_A = \frac{D_1^2 \cdot \ell' \cdot n}{P'} = \frac{6,1}{A \cdot B_\delta \cdot \alpha' \cdot k_{об} \cdot k_\phi}, \quad (2.1)$$

где P' – расчетная мощность; D_1 – диаметр сердечника статора; ℓ' – расчетная длина сердечника; A – линейная токовая нагрузка; B_δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре; n – синхронная частота вращения; α' – коэффициент полюсного перекрытия, определяемый отношением среднего значения магнитной индукции в воздушном зазоре к её максимальному значению; k_ϕ – коэффициент формы кривой поля, определяемый отношением действующего значения ЭДС обмотки статора к среднему; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Несмотря на то, что машинная постоянная C_A не является константой, ее величина зависит допустимых электромагнитных нагрузок, напряжения питания, типа изоляции, системы охлаждения, активных материалов и других факторов, зависимость $C_A = C_A(P')$ является базой для расчета различных типов электрических машин. Коэффициент использования электрической машины, определяемый как величина, обратная машинной постоянной Арнольда

$$K_A = \frac{1}{C_A} = \frac{P'}{D_1^2 \ell' n} \quad (2.2)$$

показывает, что машинная постоянная C_A пропорциональна объему сердечника, приходящегося на единицу момента вращения, а коэффициент использования K_A пропорционален расчетному моменту вращения, приходящемуся на единицу объема сердечника, то есть меньшему значению C_A соответствуют меньшие размеры сердечника и больший коэффициент использования. В методиках расчета параметров электрических машин задание допустимых электромагнитных нагрузок – линейной токовой нагрузки A и максимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ – связывают с отношением A/B_δ , которое определяется по результатам обобщения накопленного опыта проектирования и испытания электрических машин.

На основе общего подхода определения главных размеров электрической машины современные рекомендации по повышению энергоэффективности тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин предусматривают:

- увеличение числа пар полюсов в машине;
- использование максимальной удельной магнитной энергии постоянных магнитов;
- шихтованный магнитопровод из улучшенных марок холоднокатаной электротехнической стали или магнитопровод, изготовленный из аморфного железа [45, 49, 205, 213, 215];
- переход к нагревостойкой изоляции обмотки класса H путем усовершенствования системы охлаждения за счет повышения производительности вентиляторов и коэффициента заполнения обмотки.

Перечисленные рекомендации по проектированию тихоходных магнитоэлектрических машин не затрагивают непосредственно вопросы оптимизации их конструкций, удовлетворяющих выбранным критериям оптимальности, поэтому их можно считать технологическими, снижающими с одной стороны электрические потери, массу используемых активных

материалов, а с другой – повышающих приведенные затраты на изготовление электрической машины.

Следует заметить, что в общем подходе ориентация разработки методик расчета тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин на определение коэффициента использования имеет существенные недостатки:

- коэффициент использования K_A не является константой, его значение зависит от линейной токовой нагрузки A и магнитной индукции B_δ в рабочем воздушном зазоре, так как значения коэффициентов α' , $k_{об}$, k_ϕ в формуле (2.1) близки к единице;

- выражение (2.2) не учитывает величину рабочего воздушного зазора, геометрию и число пазов в магнитопроводе, которые влияют на выбор главных размеров электрической машины;

- выражение (2.2) для коэффициент использования K_A применимо для классической конструктивной схемы электрической машины вращательного движения, в которой магнитная система имеет общий цилиндрический магнитопровод статора и ротора, разделенный круговым воздушным технологическим зазором. тогда как современные конструктивные схемы магнитных систем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин вращательного движения могут иметь самостоятельные независимые магнитопроводы в составе одной электрической машины, а также линейные магнитопроводы с секционированными обмотками, в которых ротор совершает возвратно-поступательное движение. Для таких магнитных систем выражение коэффициента использования K_A требует доработки.

Общий подход к расчету параметров электрических машин реализуется в виде конкретных алгоритмов и программ для ПК. На предварительной стадии проектирования электрических машин руководствуются аналитическими инженерными методиками расчета их магнитных систем, основанными на теории магнитных цепей. Определение геометрических размеров магнитной системы

и обмоточных данных электрических машин производится на основании требуемых выходных параметров с учетом справочных данных об электрических и магнитных свойствах активных материалов, применяемых для изготовления. На стадии поверочных расчетов решаются задачи оптимального проектирования, в которых центральное место занимает исследование численных моделей магнитных полей электрических машин с применением МКЭ. Результатом исследований магнитного поля является уточнение геометрии магнитной системы электрических машин и их обмоточных данных. В дальнейшем построенные математические модели электрических машин могут использоваться для математического моделирования технически сложных объектов, состоящих из математических моделей отдельных подсистем, имеющих различную физическую природу, объединяются в одну систему с единой целью функционирования [110, 196].

Многообразие возможных вариантов конструктивного исполнения синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами и режимов их работы в составе электротехнических комплексов предполагает наличие начальной стадии проектирования поиска и выбора схемных решений, например, эвристическими методами [11, 67]. Однако на этой стадии имеет место нечеткая концепция выбора магнитных систем магнитоэлектрических машин с одинаковой формой поперечного сечения стальных полюсов и постоянных магнитов. Возможная ошибка принятия схемного решения на начальной стадии оказывает негативное влияние на остальные стадии проектирования.

Исходя из опыта, общие рекомендации по конструированию тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами удовлетворяют следующим признакам [26, 68, 172, 195, 209] :

- традиционная цилиндрической форма магнитопровода статора и ротора;

- статор с полузакрытыми трапецидальными пазами и зубцами прямоугольного сечения для укладки выпной обмотки из круглого эмалированного провода;
- постоянные магниты располагаются на периферийной поверхности ротора;
- для однослойной обмотки статора число пазов на полюс и фазу меньше единицы, а для двухслойной обмотки - дробное в интервале $1 < q < 2$;
- на полюсах радиально намагниченных постоянных магнитов полюсные наконечники из магнитомягкой стали;
- геометрические размеры активных частей статора и ротора удовлетворяют принятым стандартам высот осей вращения электрических машин и вырубкам листов электротехнической стали.

Проектный расчет тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов с постоянными магнитами учитывает тесную связь между начальной и предварительной стадий проектирования, в которой обоснование, сравнение и выбор базового варианта конструкций производится на основе решения задачи оптимизации их магнитной систем. При этом определению подлежат конфигурация магнитной системы, геометрические размеры, материал магнитопровода и постоянного магнита, обмоточные данные и другие параметры, при которых набор значений независимых переменных, доставляет экстремум некоторому функционалу, называемому целевой функцией или критерию оптимальности. Очевидно, наилучшим из множества вариантов конструктивного исполнения магнитной системы машины конкретного назначения следует считать тот, который реализует заданные технические условия и удовлетворяет определенному критерию оптимальности.

При выборе критерия оптимальности возможны два подхода:

- определение основного критерия оптимальности, при этом другие критерии оптимальности рассматриваются в виде ограничений и

удовлетворяются в оптимальной конструкции магнитоэлектрической машины по мере возможности;

- определение обобщенного критерия, объединяющего ряд частных технических, экономических и других требований, выраженный в виде суммы частных показателей с соответствующими весовыми коэффициентами, определяющими долю (вес) каждой величины в его значении.

Типичными критериями оптимальности, используемыми при проектировании электрических машин, являются:

- минимум массы, минимум габаритного объема, минимум стоимости активных материалов;

- минимум времени срабатывания, минимум постоянной времени обмотки, максимум эксплуатационной надежности;

- максимум кинетической энергии, максимум силы тяги, минимум потребляемой энергии, максимум КПД;

- минимум обобщенного критерия экономичности, максимум динамической эффективности, минимум критерия согласования характеристик.

- минимум приведенных затрат на изготовление и эксплуатацию электрической машины за нормативный срок окупаемости.

Очевидно, что среди перечисленных критериев оптимальности нет ни одного универсального, выполнение которого не отразилось бы на ухудшении значений других критериев оптимальности. Например, экономия массы постоянных магнитов ведет к минимуму массы используемых активных материалов всей электрической машины и неизбежно отразится на ухудшении энергетических показателей ее работы.

Поэтому при оптимизации конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин, работающих в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов, основополагающими факторами для выбора определенного критерия оптимальности являются специфические условия

обеспечения рабочего процесса с заданными выходными параметрами. Анализ условий использования тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов определяет также выбор принимаемых конструктивных схемных решений устройства их магнитных систем, которые по мере возможности должны быть простыми, технологичными в изготовлении и сборки в целом.

2.2. Математическая формулировка и решение задачи оптимизации параметров тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в генераторном и двигательном режимах работы в едином электротехническом комплексе.

В составе электротехнического комплекса конкретного назначения тихоходной синхронной магнитоэлектрической машине с постоянными магнитами (СМПМ), как правило, назначается основной режим работы (генераторный, двигательный), в которой подвижная часть машины – ротор совершает вращательное или возвратно-поступательное движение. При этом специфика рабочих процессов, связанных с преобразованием электрической энергии в каждом отдельном случае такова, что к числу первоочередных задач оптимизации параметров машины является создание условий повышения ее энергоэффективности. Из этого следует, что достижение максимально возможного КПД тихоходной СМПМ, работающей в режиме генератора (двигателя) имеет надежную аргументированную основу.

Математическая формулировка задачи оптимизации параметров тихоходной синхронной магнитоэлектрической машины в составе электротехнического комплекса может быть представлена следующим образом. Требуется найти значения переменных x_1, x_2, \dots, x_n , определяющие соотношения конструктивных параметров – размеров магнитной системы,

которые максимизируют критерий оптимальности, то есть функцию цели – КПД генератора (двигателя)

$$\eta_{\text{СМПП}}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max \quad (2.3)$$

при ограничениях в виде равенств или уравнений связи между параметрами магнитной системы

$$q_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad s < n, \quad (2.4)$$

и неравенств, определяющих физическую реализуемость магнитной системы машины, исходя из характеристик используемых активных материалов и конструктивных параметров, варьируемых при проектировании, таких как, например, коэффициент заполнения по меди, плотность тока в обмотке и др.

$$p_j(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad m < n \quad (2.5)$$

Функции $\eta_{\text{СМПП}}$, q_k и p_j являются нелинейными, причем функция цели может иметь не один, а несколько локальных (относительных) экстремумов. Тогда задача оптимизации магнитной системы СГПП по выбранному критерию оптимальности будет заключаться в определении глобального экстремума, то есть наибольшего из всех значений функций в области допустимых значений переменных. Для решения задачи оптимизации магнитной системы СМПП универсальными являются численные методы линейного и нелинейного программирования и методы теории планирования эксперимента [17, 49, 50, 53]. С их помощью удастся учесть сложную зависимость выходных параметров машины от геометрических размеров магнитной системы. К числу наиболее значимых методов для решения задачи оптимизации магнитной системы по выбранному критерию оптимальности относятся метод исключения зависимых переменных, метод определенных множителей Лагранжа, градиентные методы, методы безградиентного поиска и методы случайного поиска [33, 84, 179, 204]. Достижения в области использования ПК с большой ресурсной памятью и быстродействием, наличие новых программных средств, включающих библиотеки и пакеты стандартных

программ, таких как система Matlab, позволяют автоматизировать процесс поиска оптимальной конструкции магнитной системы [43, 60, 84].

С другой стороны, не следует пренебрегать накопленным опытом проектирования магнитных систем электрических машин другого принципа действия для установления наиболее экономичных методов оптимизации. Предложенная в работах [59, 110] задача оптимизации параметров электромагнитного двигателя возвратно-поступательного движения по максимуму КПД (область применения силовые преобразователи) была заменена вариационной. Исследование построенного функционала на экстремум позволило авторам в первом приближении записать выражения взаимосвязи конструктивных параметров электромагнитного двигателя с его энергетическими показателями и разработать методику оптимизации электромагнитных параметров привода возвратно-поступательного движения на заданный закон движения индуктора во времени. Задание закона движения индуктора во времени $q = q_0(t)$ в качестве начального приближения ведет к упрощению анализа электромагнитных и механических процессов и решению уравнений динамики электрической части привода независимо от процессов в механической части. Определение начального приближения электромагнитной силы $F_{ЭМ} = F_0(t)$ на этой стадии расчета позволяет из уравнений движения механической части найти первое, отличающееся от начального, приближение закона движения индуктора $q = q_1(t)$.

Оценка расчета по среднеквадратичному отклонению

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_1 - q_0)^2 dt} \quad (2.6)$$

позволяет сделать заключение о близости принятого приближения $q_0(t)$ к полученному на первом шаге итерационного процесса $q_1(t)$. Процедура приближений повторяется до тех пор, пока величина ошибки ε не будет

превышать заданного значения. Описанный итерационный процесс представляет суть метода Шварца, с помощью которого производится сведение решения общей задачи к последовательности решений стандартных задач на каждом шаге итерации. Этот метод успешно применяется для расчетов напряженно-деформируемого состояния соприкасающихся деталей различных конструкций [132], электрических линейных цепей [22], а также отдельного рассмотрения процессов в электрической и механической частях электромагнитного привода возвратно-поступательного движения [110]. При проектировании электрических машин метод Шварца используется в задаче на определение взаимосвязи между конструктивными параметрами, доставляющей минимум некоторому функционалу при соответствующих уравнениях связи. Физический смысл функционала может быть различным. В работах [56, 57, 110] в качестве функционала используются относительные потери в электромагнитном двигателе возвратно-поступательного движения привода поршневого компрессора. Решение задачи оптимизации выполнено в несколько этапов: 1 – для идеализированного случая, когда действует допущение об отсутствии насыщения участков магнитной цепи, 2 – для синусоидального хода и отсутствии ограничения на величину допустимого напряжения на обмотках, 3 – для реальных конструкций и условий. Решением задачи оптимизации на первом этапе позволяет рассчитать предельные, теоретически возможный КПД, и тем самым дает возможность оценить предельные свойства конструкции на начальных стадиях проектирования.

Используя итерационный метод Шварца были получены уравнения для расчета оптимальных токов и напряжений в функции времени электромагнитного двигателя, обеспечивающих периодический режим его работы с максимальным КПД. В ходе решения задачи оптимизации на заданный закон движения якоря исследование функции относительных потерь P_r^* от параметра ωt_k , приводит к получению аналитических выражений для энергетических характеристик электромагнитного двигателя: мощности,

потребляемой двигателем; мощности, передаваемая в механическую подсистему, мощности тепловых потерь; мощность поступающая в обмотку от внешнего источника; мощности магнитного поля. Общим выводом по созданию электромагнитного двигателя с оптимальными параметрами в смысле минимума функционала P_r^* является необходимость учета взаимосвязи параметров источника питания, параметров двигателя, параметров компрессора.

Опыт применения метода Шварца можно распространить на разработку методики оптимизации параметров тихоходных СМПМ в составе ВЭТК с учетом их назначения и режимов работы.

Проектирование тихоходных СМПМ в составе ВЭТК обуславливает необходимость разработки методологической схемы проектирования оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ (рис. 2.1).

Для решения задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режимах примем следующие допущения:

- плотность тока в активном слое якоря, нагруженном токами в проводниках обмотки, распределяется равномерно по всей площади ее поперечного сечения;
- относительная магнитная проницаемость стали магнитопровода является бесконечно большой;
- неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре учитывается с помощью поправочного коэффициента;
- схема замещения магнитной цепи машины представляется последовательной магнитной цепью, в которой ферромагнитные участки с обмотками отделены от постоянных магнитов воздушным зазором;
- размещение проводников обмотки якоря в пазах машины (активный слой якоря) учитывается в схеме замещения магнитной цепи эквивалентным воздушным зазором.



Рис. 2.1. Методологическая схема проектирования оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ.

*Работа тихоходной СМПМ в режиме двигателя
возвратно-поступательного движения.*

При разработке математической модели тихоходного СМПМ в режиме двигателя возвратно-поступательного движения (СДПМ) примем за основу математическую модель для колебательного электромеханического преобразователя энергии с одной степенью свободы:

$$\begin{cases} m_3 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = Ci - K \frac{dx(t)}{dt} - Q_B \\ L \frac{di}{dt} + C \frac{dx(t)}{dt} + iR = u(t) \end{cases}, \quad (2.7)$$

где m_3 – масса подвижных частей, $x(t)$ – закон движения подвижной части, C – постоянная машины, K – интегральный коэффициент трения, Q_B – внешняя сила; L – индуктивность обмотки якоря, R – активное сопротивление обмотки якоря, i – ток в обмотке якоря, $u(t)$ – напряжение на обмотке якоря.

Согласно итерационной процедуре метода Шварца при решении системы уравнений (2.7) будем полагать, что в установившемся режиме закон движения подвижной части машины является известным, и его можно представить несинусоидальной периодической функцией во времени, которую можно аппроксимировать рядом Фурье.

Действительная энергия, поступающая в обмотку якоря от внешнего источника за вычетом тепловых потерь на интервале времени dt

$$u(t)idt - i^2 R dt = \frac{d}{dt} \left[\frac{Li^2}{2} \right] dt + C \frac{dx(t)}{dt} idt \quad (2.8)$$

идет на приращение энергии магнитного поля и на совершение механической работы, электрическая энергия передается в механическую подсистему.

За период времени T баланс мощности в СДПМ будет

$$\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i dt = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d}{dt} \left[\frac{L i^2}{2} \right] dt + \frac{1}{T} \int_0^T C \frac{dx(t)}{dt} i dt. \quad (2.9)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (2.9) представляет собой среднее значение мощности магнитного поля за цикл энергопреобразования (время одного периода) и тождественно равно нулю.

Коэффициент полезного действия СДПМ на основании уравнения (2.9) можно представить в виде

$$\eta_d = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T C \frac{dx(t)}{dt} i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left[i^2 R + C \frac{dx(t)}{dt} i \right] dt}. \quad (2.10)$$

Определим временные зависимости напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ в обмотке якоря, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу

$$\eta_d = \left(1 + P_r^* \right)^{-1} \quad (2.11)$$

где $P_r^* = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt}{\frac{1}{T} \int_0^T C \frac{dx(t)}{dt} i(t) dt}$ – относительные потери в двигателе.

Очевидно, что отыскание оптимальной функции тока $i(t)$ в функционале (2.11) можно найти из условия минимума P_r^* . Поскольку P_r^* есть число, устанавливающее относительные потери, то введем его под знак интеграла. Преобразование выражения (2.11) дает следующий результат

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left[P_r^* C \frac{dx(t)}{dt} i(t) - i^2(t) R \right] dt = 0. \quad (2.12)$$

Ток в обмотке якоря будет

$$i(t) = \frac{P_r^* \min C \frac{dx(t)}{dt}}{R}. \quad (2.13)$$

Так как P_r^* , C , R - являются константами, то оптимальный закон изменения тока в обмотке якоря во времени должен быть тождественен временной зависимости скорости движения подвижной части, то есть

$$i(t) \equiv \mathfrak{I}(t) = \frac{dx(t)}{dt}. \quad (2.14)$$

Тождество (2.14) показывает, что в установившемся режиме максимум КПД СДПМ достигается при условии, когда закон изменения тока в обмотке якоря $i(t)$ опережает по фазе перемещение подвижной части машины $x(t)$ на угол 90° . Этот вывод согласуется с теоретическими основами энергоэффективности работы линейного электропривода, когда его электромеханическая система настроена на резонанс [110]. В уравнении движения электромагнитная сила $F_{\text{ЭМ}} = C \cdot i(t)$ пропорциональна току, а значит она как и ток опережает перемещение подвижных частей машины по фазе на угол 90° .

Используя итерационную процедуру метода Шварца, зададим закон перемещения подвижных частей СДПМ в виде (рис. 2.2, а, б)

$$x(t) = x_m [1 - \cos(\omega t)], \quad (2.15)$$

где x_m - половина хода перемещения подвижной части, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - угловая частота колебаний, T - период колебаний.

При использовании тихоходного СДПМ, например, для целей электропривода поршневого компрессора, синусоидальный закон движения поршня является наиболее совершенным, так как теоретически исключает удары поршня о стенки цилиндра [110].

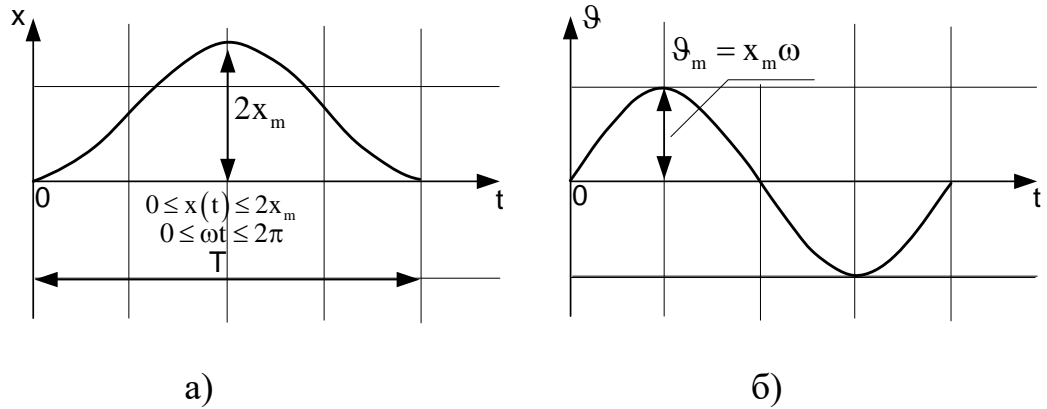


Рис. 2.2. Временная зависимость перемещения (а) и скорости движения подвижной части СДПМ (б).

С учетом выражений (2.13) - (2.15) оптимальный закон изменения тока в обмотке якоря $i(t)$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) = \frac{P_{r \min}^* C x_m \omega}{R} \sin(\omega t). \quad (2.16)$$

Скорость движения подвижных частей машины

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = x_m \omega \sin(\omega t). \quad (2.17)$$

Из выражения (2.16) амплитуда тока в обмотке якоря

$$I_m = \frac{P_{r \min}^* C x_m \omega}{R}. \quad (2.18)$$

Для определения постоянной машины C в выражении (2.18) рассмотрим пример конструктивной схемы СДПМ (рис. 2.3, а) с секционированной обмоткой якоря, в которой при перемещении подвижных частей машины под напряжением остается одинаковое число витков, расположенных под полюсами постоянных магнитов. Благодаря системе управления СДПМ, которая отключает часть витков обмотки якоря, находящиеся вне зоны действия полюсов постоянных магнитов, можно существенно снизить потери на нагрев обмоточного провода и повысить КПД.

При этом постоянная машины будет

$$C = B_{\delta} l_{cp} W_a k, \quad (2.19)$$

где B_{δ} – максимальное значение индукции в межполюсном зазоре, в котором расположены секции обмотки якоря; l_{cp} – средняя длина витка обмотки якоря; k – коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; W_a – суммарное число активных витков обмотки якоря, сцепляющихся магнитным потоком постоянных магнитов.

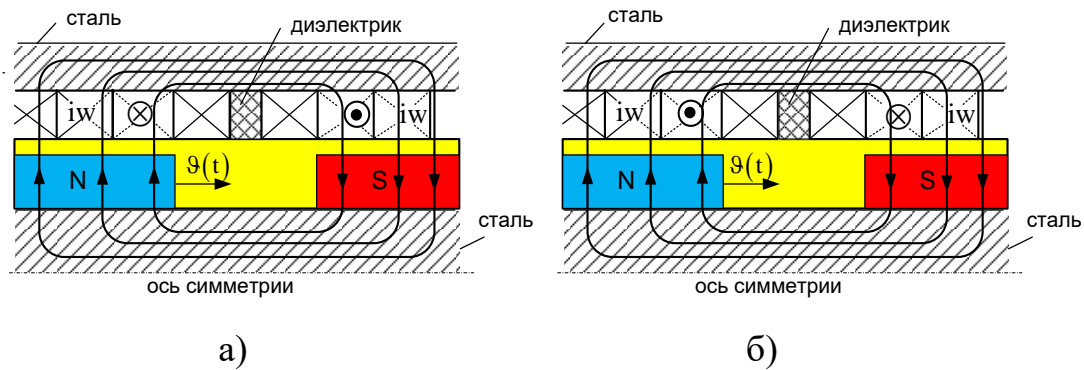


Рис. 2.3. Конструктивная схема СМПМ: а - режим двигателя;
б - режим генератора.

Принимая во внимание, что активное сопротивление обмотки якоря при перемещении подвижных частей машины остается неизменным, найдем сопротивление активной части витков обмотки

$$R = \frac{l_{cp} W_a}{\gamma_{пр} q_{пр}}, \quad (2.20)$$

где $q_{пр}$ – площадь поперечного сечения; $\gamma_{пр}$ – удельная электропроводность обмоточного провода.

С учетом (2.19) и (2.20) выражение для амплитуды тока в обмотке якоря (2.18) можно преобразовать

$$I_m = P_{r \min}^* B_{\delta} k \gamma_{пр} q_{пр} x_m \omega. \quad (2.21)$$

Задавшись значением допустимой плотности тока в проводниках обмотки якоря из условия, что

$$J_{\text{обм}} = \frac{I_m}{\sqrt{2} q_{\text{пр}}} \leq J_{\text{доп}}, \quad (2.22)$$

и подставив его в выражение (2.21), получим формулу для расчета минимально возможных относительных потерь в СДПМ

$$P_{r \min}^* = \frac{\sqrt{2} J_{\text{доп}} \gamma_{\text{пр}}^{-1}}{B_{\delta} k x_m \omega} \quad (2.23)$$

или

$$P_{r \min}^* = \frac{\sqrt{2} J_{\text{доп}} \gamma_{\text{пр}}^{-1}}{B_{\delta} k \vartheta_m}. \quad (2.24)$$

Из формулы (2.24) следует, что минимально возможные относительные потери СДПМ, а значит предельный максимум КПД двигателя

$$\eta_{\text{дmax}} = \left(1 + P_{r \min}^*\right)^{-1} \quad (2.25)$$

определяются допустимой плотностью тока в обмотке якоря, удельной электропроводностью обмоточного провода, активной частью средней длины витка обмотки якоря, расположенной под полюсами постоянных магнитов, амплитудой скорости движения подвижных частей машины и средним значением индукции в межполюсном зазоре.

Найдем среднее значение механической мощности двигателя

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{T} \int_0^T C \cdot i \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt = \frac{1}{2} C I_m x_m \omega. \quad (2.26)$$

Преобразуем соотношение (2.26), используя амплитудное значение ампервитков активной части обмотки

$$I_m W_a = \sqrt{2} \cdot J_{\text{доп}} \cdot S_{\text{обм.акт}} \cdot k_3, \quad (2.27)$$

где $S_{\text{обм.акт}}$ - площадь поперечного сечения активной части витков обмотки, k_3 - коэффициент заполнения по меди.

Тогда можно записать

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{\delta} \cdot k \cdot x_m \cdot \omega \cdot J_{\text{доп}} \cdot \left(\ell_{\text{ср}} \cdot S_{\text{обм.акт}} \cdot k_3 \right) \quad (2.28)$$

Величина, выделенная скобками в выражении (2.28), представляет собой объем активной части витков обмотки якоря $V_{\text{обм.акт}}$.

Введение в выражение (2.28) плотности материала обмоточного провода $\gamma_{\text{обм}}$ позволяет определить необходимую массу активной части витков обмотки тихоходного СДПМ, работающего с максимальным КПД при заданных значениях механической мощности и других параметрах, приведенных в данной формуле

$$m_{\text{обм.акт}} = V_{\text{обм.акт}} \cdot \gamma_{\text{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{\text{мех}} \cdot \gamma_{\text{обм}}}{B_{\delta} \cdot J_{\text{доп}} \cdot k \cdot x_m \cdot \omega} \quad (2.29)$$

Из выражения (2.26) можно определить амплитудное значение электромагнитного тягового усилия $F_{\text{эм.м}}$, приложенного к индуктору, а именно:

$$F_{\text{эм.м}} = C \cdot I_m = \frac{2P_{\text{мех}}}{x_m \cdot \omega} \quad (2.30)$$

Исходя из заданного при оптимальном проектировании конструкции СДПМ максимального значения электромагнитной силы с учетом выражения (2.29) необходимая масса активной части витков обмотки якоря

$$m_{\text{обм.акт}} = \frac{F_{\text{эм.м}} \cdot \gamma_{\text{обм}}}{\sqrt{2} \cdot B_{\delta} \cdot J_{\text{доп}} \cdot k} \quad (2.31)$$

Важное практическое значение имеет решение задачи расчета эксплуатационных характеристик СДПМ при несинусоидальном ходе движения поршня тихоходной поршневой компрессорной ступени.

Используя уравнения (2.12), можно записать

$$P_r^* C_i(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i^2(\omega t_k) R = 0. \quad (2.32)$$

Определим экстремум $\frac{dP_r^*}{d(\omega t_k)} = 0$

$$P_r^* [Ci'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + Ci(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)] - 2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R = 0, \quad (2.33)$$

откуда

$$P_r^* = \frac{2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R}{C [i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)]}. \quad (2.34)$$

После подстановки выражения (2.34) в (2.32) получим уравнение для определения корня ωt_k

$$i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k) = 0 \quad (2.35)$$

Примем, что закон движения индуктора во времени является несинусоидальным и его можно разложить в ряд Фурье с конечным числом слагаемых, т.е.

$$x(t) = \sum_{v=1}^N [x_{vs} \sin(v\omega t) + x_{vc} \cos(v\omega t)] + x_0. \quad (2.36)$$

Тогда условие (2.35) выполняется, если принять $i(t) = K\dot{x}(t)$, где $K = \text{const}$. После подстановки выражений $i(\omega t_k) = K\dot{x}(\omega t_k) = K\vartheta(\omega t_k)$ и $i'(\omega t_k) = K\omega\ddot{x}(\omega t_k)$ в (2.34), получим

$$P_{r \min}^* = \frac{2K^2 \omega ABR}{C \cdot 2K\omega AB}, \quad (2.37)$$

где $A = \sum_{v=1}^n [\vartheta_{vs} \cos(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} \sin(v\omega t_k)]$, $B = \sum_{v=1}^n [-\vartheta_{vs} v \sin(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} v \cos(v\omega t_k)]$.

Сокращая одинаковые множители в числителе и знаменателе дроби (2.37), минимально возможные относительные потери

$$P_{r \min}^* = \frac{KR}{C}. \quad (2.38)$$

Среднее значение механической мощности, поступающей в компрессор

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{T} \int_0^T Ci(t) \vartheta(t) dt = \frac{1}{2} CK \sum_{v=1}^N [\vartheta_{vs}^2 + \vartheta_{vc}^2] = CK\vartheta^2, \quad (2.39)$$

где ϑ - среднеквадратичное (действующее) значение скорости движения индуктора.

Для синусоидального закона движения ротора $x(t) = x_m(1 - \cos \omega t)$ среднее значение механической мощности $P_{\text{мех}} = CK\vartheta^2 = \frac{1}{2}I_m C x_m \omega$.

Выполнив подстановку выражения для коэффициента $K = \frac{I_m x_m \omega}{2\vartheta^2}$ в формулу (2.38) и расчетных соотношений для постоянной машины, активного сопротивления обмотки и амплитуды тока, получим в явном виде минимально возможные относительные потери соответственно для несинусоидального и синусоидального закона движения индуктора СДПМ

$$P_{r \min}^* = \frac{\gamma_{\text{пр}}^{-1} J_d}{\sqrt{2} B_{\text{ср}} k \bar{\vartheta}^2}, \quad P_{r \min}^* = \frac{\sqrt{2} \gamma_{\text{пр}}^{-1} J_d}{B_{\text{ср}} k x_m \omega}, \quad (2.40)$$

где J_d - максимально допустимая плотность тока; $\bar{\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1}^N [\bar{\vartheta}_{vs}^2 + \bar{\vartheta}_{vc}^2]}$ -

действующее значение скорости индуктора, выраженное в относительных

единицах; $\bar{\vartheta}_{vs} = \frac{\vartheta_{vs}}{x_m \omega} = \frac{v x_{vc}}{x_m}$, $\bar{\vartheta}_{vc} = \frac{\vartheta_{vc}}{x_m \omega} = \frac{v x_{vs}}{x_m}$ - относительные значения

соответственно амплитуд синусной и косинусной v -ой гармоники скорости

ротора; $\gamma_{\text{пр}} = 56 \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ - удельная электропроводность меди.

Анализ выражения (2.40) определяет пути достижения максимально возможного КПД СДПМ в зависимости от закона движения индуктора во времени. На рис. 2.4 приведены некоторые характерные законы $x(t)$ и $\vartheta(t)$ движения индуктора, которые можно аппроксимировать конечным числом (не менее трех) членов ряда Фурье, обеспечивающие заданную производительность компрессора.

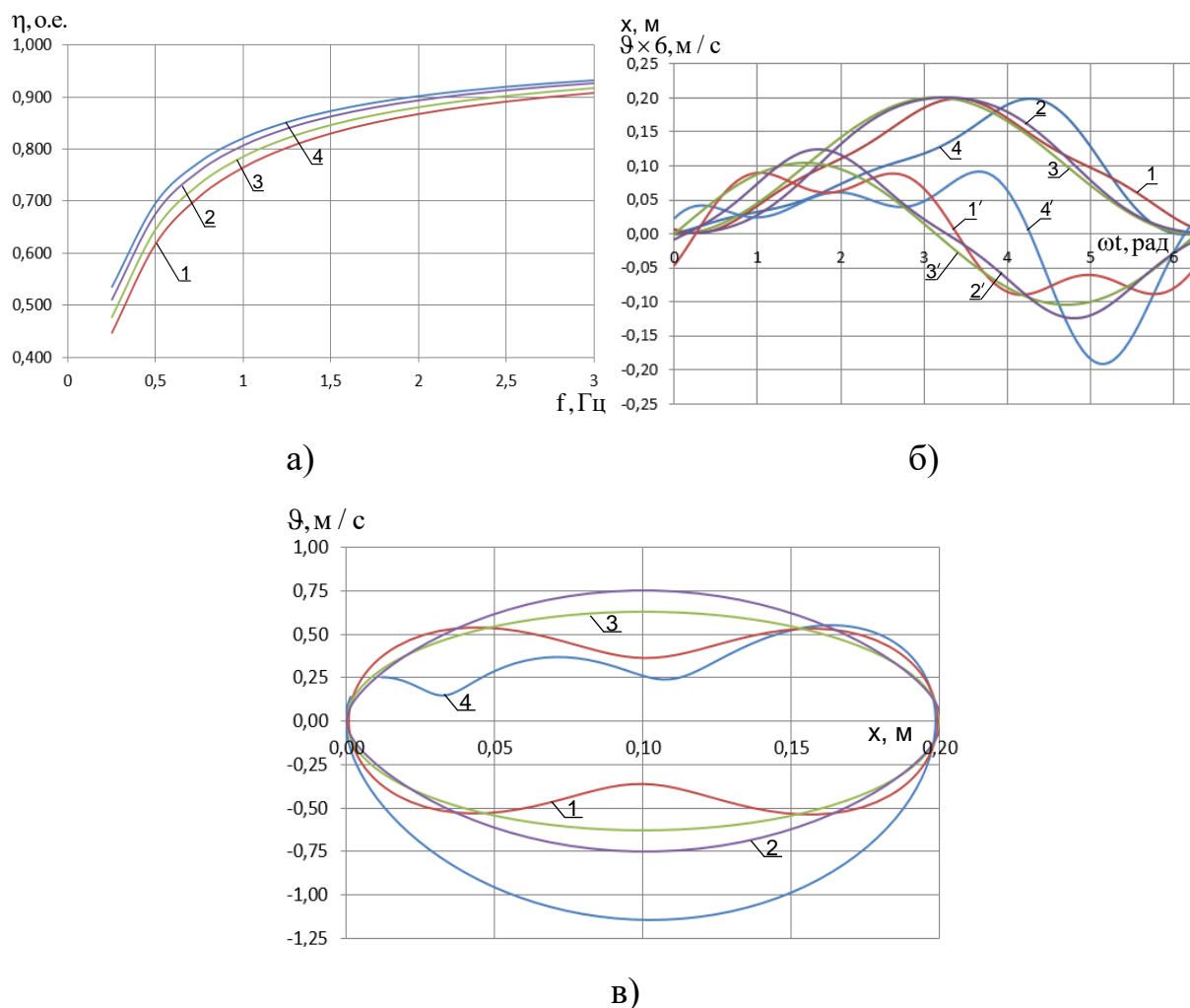


Рис.2.4. Максимально возможные (а) значения КПД ЛМЭП для некоторых характерных законов $x(t)$ и $v(t)$ движения индуктора (б) и расчетные зависимости $v = v(x)$ за время рабочего цикла (в): 1 - движение индуктора (поршня) близкой к постоянной по модулю скоростью $v = v(t)$; 2 - то же, но близкой к линейной зависимости $v = v(t)$; 3 - то же, но синусоидальная зависимость скорости $v = v(t)$; 4 - движение индуктора с предлагаемой зависимостью скоростью $v = v(t)$ при $P_{\text{мех}} = \text{const}$ и $x_m = \text{const}$, $f = 1 \text{ Гц}$,

$$J_d = 3 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2, B_{\text{ср}} = 0,5 \text{ Тл}, x_m = 0,1 \text{ м}, k = 0,85 .$$

На рис. 2.4 видно, что при использовании известных временных зависимостей кривая 1 близка к линейному закону $x(t)$ перемещения

индуктора (поршня) от нуля до $2x_m$ за время прямого и от $2x_m$ до нуля обратного циклов работы компрессора, кривая 2 - близка к линейному закону скорости движения индуктора во времени при перемещении поршня от нуля до $2x_m$ и обратно, кривая 3 соответствует синусоидальному закону скорости движения индуктора во времени; кривая 4 - близка к предлагаемому закону скорости движения индуктора, учитывающего время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла.

Введение в выражение (2.39) плотности материала обмоточного провода $\gamma_{\text{обм}}$ позволяет вывести формулу для расчета необходимой массы активной части витков обмотки СДПМ, работающего с максимально возможным значением КПД, обеспечивающим заданное среднее значение механической мощности $P_{\text{мех}}$, поступающей в компрессор, или выраженную через максимальное значение электромагнитной силы, определяющей величину давления сжимаемого газа

$$m_{\text{обм.акт.}} = \frac{\sqrt{2}P_{\text{мех}}\gamma_{\text{обм}}}{B_{\text{ср}}J_{\text{дк}} \cdot x_m \omega} = \frac{F_{\text{эм. max}}\gamma_{\text{обм}}}{\sqrt{2}B_{\text{ср}}J_{\text{дк}}} . \quad (2.41)$$

*Работа тихоходной СМПМ в режиме генератора
возвратно-поступательного движения*

Перспективы использования тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов (СГПМ) возвратно-поступательного движения в составе электротехнических комплексов связаны с созданием возобновляемых источников энергии, а именно: механического движения морских и речных волн, колебания, тряски, вибрации рабочих органов машин различного назначения или среды для выработки электрической энергии автономных потребителей энергии. Несмотря на значительный интерес

разработчиков и исследователей к развитию направления применения тихоходных СГПМ возвратно-поступательного движения детальная проработка конструктивных схем и режимов работы таких машин не отвечает современным требованиям для их проектирования, большинство исследований зарубежных авторов являются трудно доступными для широкого применения [183, 198, 201].

Для оптимизации параметров тихоходного СГПМ возвратно-поступательного движения (рис. 2.3, б) воспользуемся математической моделью линейного электромеханического преобразователя, описываемого системой уравнений, аналогичной (2.7), но с изменениями, относящимися к уравнению электрического равновесия для обмотки якоря

$$\begin{cases} m_{\text{я}} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = C_i - K \frac{dx(t)}{dt} - Q_{\text{в}}; \\ L \frac{di}{dt} + iR + u(t) = e_0(t), \end{cases} \quad (2.42)$$

где $u(t)$ - напряжение в нагрузке, $e(t)$ - ЭДС в обмотке якоря.

Разделение электромагнитных и механических процессов в тихоходном СГПМ в соответствии с описанным выше алгоритмом метода Шварца позволяет определить условия работы генератора с максимальным КПД, составив уравнение баланса мощности за период времени T

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_0(t) i dt = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d}{dt} \left[\frac{Li^2}{2} \right] dt + \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i dt. \quad (2.43)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения тождественно равно нулю.

С учетом (2.43) выражение для коэффициента полезного действия тихоходного СГПМ можно записать в виде

$$\eta_{\Gamma} = \left(1 + P_{\Gamma}^* \right)^{-1}, \quad (2.44)$$

где $P_r^* = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt}$ – относительные потери в генераторе.

Уравнение (2.44) позволяет составить функционал и исследовать его на экстремум

$$\frac{1}{T} \int_0^T [P_r^* u(t)i(t) - i^2(t)R] dt = 0. \quad (2.45)$$

Относительные потери P_r^* в функционале (2.45) могут рассматриваться как функция параметра t_k , который представляет собой корень уравнения

$$P_r^* u(t_k)i(t_k) - i^2(t_k)R = 0, \quad (2.46)$$

и могут исследоваться на экстремум согласно классическому равенству, а именно:

$$\frac{dP_r^*(t_k)}{dt_k} = 0. \quad (2.47)$$

Выполнение условия (2.47) приводит к дифференциальному уравнению для определения t_k

$$u(t_k)i'(t_k) - i(t_k)u'(t_k) = 0. \quad (2.48)$$

Из решения уравнения очевидно, что условие минимально возможных потерь $P_{r\text{опт}}^*$ в генераторе соответствует активной нагрузке, когда напряжение и ток в нагрузке совпадают по фазе, то есть $u(t) = Ki(t)$, где $K = \text{const}$.

При активной нагрузке минимально возможные потери в СГПМ при номинальных значениях напряжения $U_{\text{НОМ}}$ и тока $I_{\text{НОМ}}$ в нагрузке будут

$$P_{r\text{min}}^* = \frac{I_{\text{НОМ}}R}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{I_{\text{НОМ}}R}{u^* \cdot E_0}, \quad (2.49)$$

где u^* - относительное напряжение при нагрузке, E_0 - действующее значение ЭДС в обмотке якоря.

Введем в рассмотрение коэффициент использования k_u для расчета номинальной мощности тихоходного СГПМ при активной нагрузке

$$P_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} = k_u E_0 I_K, \quad (2.50)$$

где $I_K = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ - ток короткого замыкания, X - индуктивное сопротивление обмотки якоря.

Для определения коэффициента использования воспользуемся векторной диаграммой СГПМ для активной нагрузки (рис. 2.5), из которой следует

$$E_0 = \sqrt{(U + IR)^2 + (IX)^2}. \quad (2.51)$$

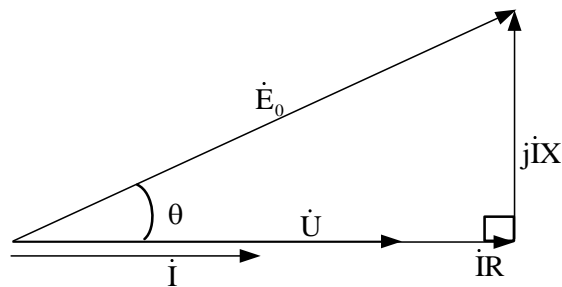


Рис. 2.5. Векторная диаграмма СГПМ при активной нагрузке

В номинальном режиме работы генератора выражение (2.51) принимает вид

$$E_0 = \sqrt{(U_{\text{НОМ}} + I_{\text{НОМ}} R)^2 + (I_{\text{НОМ}} X)^2}. \quad (2.52)$$

Решая уравнение (2.52) относительно тока, найдем

$$I_{\text{НОМ}} = I_K \left[-\frac{u^* R}{\sqrt{R^2 + X^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} X^2}{R^2 + X^2}} \right]. \quad (2.53)$$

После подстановки (2.53) в (2.50) получим выражение для коэффициента использования

$$k_u = u^* \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{u^{*2} Q_d^2}{1 + Q_d^2}} - \frac{u^*}{\sqrt{1 + Q_d^2}} \right], \quad (2.54)$$

где $Q_d = \frac{X}{R}$ - добротность обмотки якоря.

Анализ выражений (2.50) и (2.54) показывает, что от значения коэффициента использования зависит мощность тихоходного СГПМ и размеры его магнитной системы. Условие $\frac{dk_u}{du^*} = 0$ позволяет найти оптимальное значение $u_{\text{ОПТ}}^*$ в зависимости от добротности обмотки якоря, при которой мощность синхронного генератора максимальна (рис. 2.6).

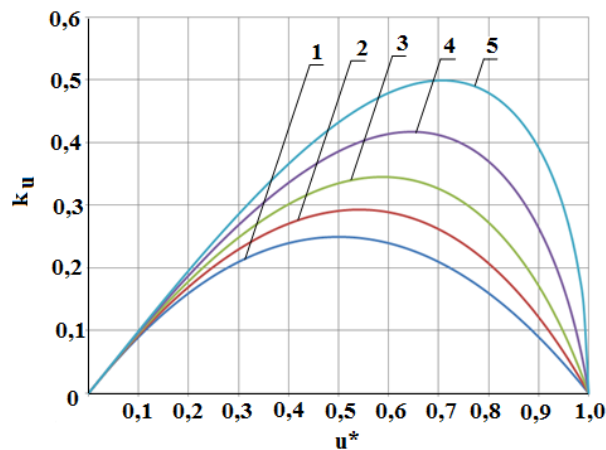


Рис. 2.6. К определению $u_{\text{ОПТ}}^*$ в зависимости от добротности обмотки якоря:

$$1 - Q_d = 0; 2 - Q_d = 1; 3 - Q_d = 2; 4 - Q_d = 5; 5 - Q_d \rightarrow \infty$$

Из графика видно, что оптимальное относительное напряжение при активной нагрузке с ростом добротности обмотки якоря увеличивается и достигает максимального значения $u_{\text{ОПТ}}^* = 1/\sqrt{2} = 0,707$ при $Q_d \rightarrow \infty$, то есть когда активное сопротивление обмотки $R = 0$.

С учетом значения $u_{\text{ОПТ}}^*$ и выражения (2.49) минимально возможные относительные потери в СГПМ возвратно-поступательного движения будут

$$P_{r \min}^* = \gamma_{\text{пр}}^{-1} \frac{\sqrt{2} J_{\text{доп}}}{u_{\text{опт}}^* B_{\text{ср}} k x_m \omega}. \quad (2.55)$$

Используя выражения (2.50) и (2.55), можно определить необходимую массу активной части витков обмотки тихоходного СГПМ, работающего с максимально возможным КПД при заданном значении номинальной мощности нагрузки $P_{\text{ном}}$, по формуле

$$m_{\text{обм.акт}} = V_{\text{обм.акт}} \cdot \gamma_{\text{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{\text{ном}} \cdot \gamma_{\text{обм}}}{u_{\text{опт}}^* B_{\text{ср}} \cdot J_{\text{доп}} \cdot k \cdot x_m \cdot \omega}. \quad (2.56)$$

*Работа тихоходного СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом
вращательного движения*

Математическая модель тихоходного СГПМ вращательного движения состоит из механической и электромагнитной частей. Математическое описание электромагнитной части зависит от характера распределения магнитного поля в воздушном зазоре. При синусоидальном распределении поля электромагнитная часть синхронной машины описывается системой дифференциальных уравнений в вращающихся координатах d, q [30, 128, 158]

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_a i_d + L_q p \omega i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_a i_q - L_d p \omega i_d - \psi p \omega \\ J_p \frac{d\omega}{dt} = M_M - F\omega - M_{\text{эм}} \\ M_{\text{эм}} = 1,5p \left[\psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \end{cases}, \quad (2.57)$$

где i_d, i_q - проекции тока статора на оси diq соответственно, u_d, u_q - проекции напряжений с зажимов генератора на оси diq соответственно, L_d, L_q - индуктивности фазы статора по продольной и поперечной оси соответственно,

p - число пар полюсов, ω - угловая частота вращения ротора, ψ - потокосцепление фазы статора; F - коэффициент, учитывающий трение в подшипниках, M_M - механический момент привода, J_p - приведенный к валу момент инерции машины, $M_{эм}$ - электромагнитный момент, R_a - активное сопротивление фазы статора.

Используем разделение электромагнитных и механических процессов в тихоходном СГПМ на основании описанного выше алгоритма метода Шварца. Для установившегося режима работы синхронного генератора уравнения электромагнитной части математической модели (2.57) можно представить в виде уравнения электрического равновесия фазы обмотки статора в комплексной форме записи

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + jX_q\dot{I}_q + jX_d\dot{I}_d, \quad (2.58)$$

где \dot{E}_0 - ЭДС от основного магнитного потока индуктора Φ_0 .

Построенная в соответствии с уравнением (2.58) векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора при активной нагрузке показана на рис. 2.7.

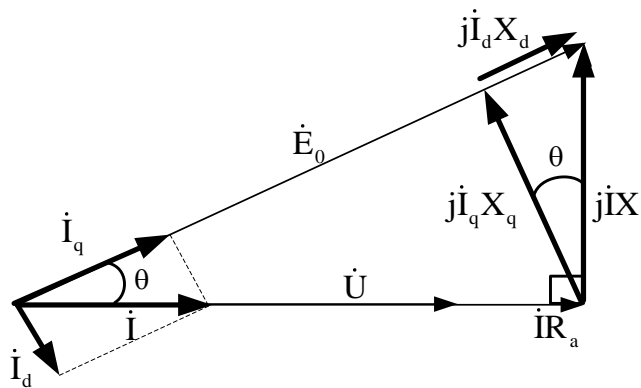


Рис. 2.7. Векторная диаграмма СГПМ для случая активной нагрузки

Согласно уравнению (2.58) магнитный поток реакции якоря Φ_a состоит из продольного потока Φ_{ad} по оси d и поперечного потока Φ_{aq} по оси q ,

каждый из которых наводит свою ЭДС реакции якоря в обмотке якоря. Для явнополюсного ротора СГПМ воздушный зазор по осям d и q не является равномерным, поэтому индуктивные сопротивления продольной X_d и поперечной X_q реакции якоря отличаются друг от друга, причем $X_d > X_q$. Для неявнополюсного ротора СГПМ воздушный зазор между внутренней поверхностью статора и ротором получается равномерным по всей окружности, поэтому индуктивные сопротивления $X_d = X_q$ и индуктивности фаз статора $L_d = L_q$ по продольной и поперечной оси соответственно равны. Поскольку магнитный поток рассеяния фазы обмотки статора незначителен, индуктивные сопротивления рассеяния обмотки якоря по осям d и q в уравнении (2.58) не учитываются.

На векторной диаграмме (рис. 2.7) сумму векторов напряжений на индуктивных сопротивлениях фаз статора по продольной и поперечной оси представим в виде результирующего вектора, учитывающего напряжение на эквивалентном индуктивном сопротивлении фазы обмотки статора

$$jX_q \dot{I}_q + jX_d \dot{I}_d = jX_a \dot{I}. \quad (2.59)$$

Тогда уравнение электрического равновесия обмотки статора для явнополюсной машины синхронного генератора можно записать иначе

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + jX_a \dot{I}. \quad (2.60)$$

Используя из векторной диаграммы соотношения

$$IX_a = \sqrt{(I_q X_q)^2 + (I_d X_d)^2}; I_d = I \sin \theta; I_q = I \cos \theta,$$

найдем эквивалентное индуктивное сопротивление явнополюсного синхронного генератора

$$X_a = \omega L_a = \sqrt{(X_q \cos \theta)^2 + (X_d \sin \theta)^2}. \quad (2.61)$$

Уравнение электромагнитного состояния фазы обмотки статора (2.57) для мгновенных значений напряжений, тока и ЭДС запишется в виде:

$$e_0 = u + iR_a + L_a \frac{di}{dt}. \quad (2.62)$$

С учетом (2.62) уравнение баланса мощности СГПМ на периоде T имеет одинаковую форму записи, не зависящую от конструктивного исполнения явнополюсного или неявнополюсного ротора машины

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_0(t) i dt = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_a dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d}{dt} \left[\frac{L_a i^2}{2} \right] dt + \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i dt. \quad (2.63)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (2.63) тождественно равно нулю.

Выражения (2.63) и (2.43) имеют одинаковую форму записи, поэтому максимально возможный КПД тихоходного синхронного генератора определяется из условия режима работы с активной нагрузкой, при которой минимально возможные относительные потери в СГПМ с номинальными значениями напряжения $U_{\text{НОМ}}$ и тока $I_{\text{НОМ}}$ в нагрузке

$$P_{r \min}^* = \frac{I_{\text{НОМ}} R_a}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{I_{\text{НОМ}} R_a}{u^* \cdot E_0}. \quad (2.64)$$

Номинальная мощность тихоходного СГПМ с явнополюсным ротором при активной нагрузке

$$P_{\text{НОМ}} = m U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} = m \cdot u^* E_0 I_{\text{НОМ}} = m \cdot k_u E_0 I_K, \quad (2.65)$$

где m – число фаз, $I_K = \frac{E_0}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}}$ – ток короткого замыкания.

Сопоставление векторных диаграмм синхронного генератора при активной нагрузке (рис. 2.5 и рис. 2.7) позволяет записать выражение для номинального тока обмотки статора для явнополюсного СГПМ аналогичным выражению (2.53), но с использованием эквивалентного индуктивного сопротивления фазы обмотки статора

$$I_{\text{НОМ}} = I_{\text{к}} \left[-\frac{u^* R_a}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} X_a^2}{R_a^2 + X_a^2}} \right]. \quad (2.66)$$

С учетом выражений (2.65) и (2.66) коэффициент использования для явнополюсного синхронного генератора принимает вид:

$$k_u = u^* \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{u^{*2} Q_d^2}{1 + Q_d^2}} - \frac{u^*}{\sqrt{1 + Q_d^2}} \right], \quad (2.67)$$

где $Q_d = \frac{X_a}{R_a}$ - добротность фазы обмотки статора.

Условие $\frac{dk_u}{du^*} = 0$ в выражении (2.67) позволяет определить максимум мощности тихоходного СГПМ с явнополюсным ротором в выражении (2.65) после подстановки в него оптимальное относительное напряжение $u_{\text{ОПТ}}^*$ при активной нагрузке. Принимая во внимание соотношение (2.61), график зависимости $k_u = k_u(u)$, показанный на рис. 2.6, приобретает дополнительный смысл о том, что оптимальное относительное напряжение $u_{\text{ОПТ}}^*$ при активной нагрузке зависит от соотношения индуктивных сопротивлений фазы обмотки статора по продольной и поперечной оси.

Действующее значение ЭДС фазы обмотки статора СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом

$$E_0 = 2B_{\delta} \alpha' l' w_{\text{ф}} \frac{\pi D_i n_{\text{НОМ}}}{60} k_{\text{ф}} k_{\text{об}}, \quad (2.68)$$

где $w_{\text{ф}}$ - число витков обмотки статора.

Минимально возможные относительные потери в синхронном генераторе в соотношении (2.64) можно определить, зная расчетный диаметр ротора D_i . Для этого произведем подстановку (2.68) в (2.65), используем в процессе

преобразования полученного выражения коэффициент $\lambda = \frac{\ell'}{D_1}$, определяющий

отношение активной длины сердечника к диаметру статора, и линейную

токовую нагрузку $A = \frac{mI_{\text{НОМ}}W_{\phi}}{\pi D_1}$, тогда получим:

$$D_1 = 3 \sqrt[3]{\frac{C_A P_{\text{НОМ}}}{2\lambda n_{\text{НОМ}} u_{\text{ОПТ}}^*}}, \quad (2.69)$$

где C_A - постоянная Арнольда, определяемая соотношением (2.1).

Минимально возможные относительные потери в синхронном генераторе согласно (2.63) определяются подстановкой выражения (2.68) в (2.64)

$$P_{\text{г. min}} = \frac{30}{\pi} \frac{J_{\text{доп}} \gamma_{\text{пр}}^{-1}}{u_{\text{ОПТ}}^* B_{\delta} \alpha' D_i n_{\text{НОМ}} k_{\phi} k_{\text{об}} k}, \quad (2.70)$$

где $k = \frac{\ell'}{\ell_{\text{ср}}}$ - отношение расчетной длины сердечника к средней длине витка

(секции) обмотки статора.

Номинальная мощность СГПМ

$$P_{\text{НОМ}} = 2m u_{\text{ОПТ}}^* B_{\delta} \alpha' \ell' \frac{\pi D_i n_{\text{НОМ}}}{60} k_{\phi} k_{\text{об}} S_{\text{обм. акт}} k_3 J_{\text{доп}}. \quad (2.71)$$

С учетом

$$S_{\text{обм. акт}} = \frac{Q_{\delta} p}{m \ell'} \delta_{\text{э}} \quad (2.72)$$

выражением (2.71) может быть записано в виде

$$P_{\text{НОМ}} = 2u_{\text{ОПТ}}^* B_{\delta} \alpha' \frac{\pi D_i n_{\text{НОМ}}}{60} k_{\phi} k_{\text{об}} Q_{\delta} \delta_{\text{э}} p k_3 J_{\text{доп}}. \quad (2.73)$$

Рабочий магнитный поток

$$\Phi_0 = B_{\delta} \alpha' Q_{\delta} = B_m Q_m \sigma_p. \quad (2.74)$$

Выражение для удельной мощности, приходящейся на единицу массы активной части магнитной системы СГПМ, будет

$$P_{\text{НОМ.уд.}} = \frac{2u_{\text{ОПТ}}^* B_r \frac{\lambda_{\delta}^*}{1 + \lambda_{\delta}^*} Q_m \sigma_p \frac{\pi D_1 n_{\text{НОМ}}}{60} k_{\phi} k_{\text{об}} \delta_{\text{э}} p k_3 J_{\text{доп}}}{m_{\text{обм.акт}} + m_{\text{М}}}, \quad (2.75)$$

где $B_m = B_r \frac{\lambda_{\delta}^*}{1 + \lambda_{\delta}^*}$ – значение магнитной индукции в нейтральном сечении

постоянного магнита; $\lambda_{\delta}^* = \frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_m} = \mu_0 \frac{H_c}{B_r} \frac{Q_{\delta}}{Q_m} \frac{d}{\delta_{\text{э}}}$ – относительная проводимость

воздушного зазора.

Необходимую массу активной части витков трехфазной обмотки тихоходного СГПМ, работающего с максимально возможным КПД при заданном значении номинальной мощности нагрузки $P_{\text{НОМ}}$ найдем, используя известные соотношения

$$m I_{\text{НОМ}} w_{\phi} = S_{\text{обм.акт}} k_3 J_{\text{доп}}, \quad m_{\text{обм.акт}} = 2m S_{\text{обм.акт}} \ell' k_3 \gamma_{\text{обм}}, \quad m_{\text{М}} = 2p Q_m d \gamma_{\text{М}} \quad (2.76).$$

В процессе преобразования выражения (2.76) с учетом (2.75) получим

$$m_{\text{обм.акт}} = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{P_{\text{НОМ}} \gamma_{\text{обм}}}{u_{\text{ОПТ}}^* B_{\delta} D_1 n_{\text{НОМ}} k_{\phi} k_{\text{обм}} \alpha' J_{\text{доп}}}. \quad (2.77)$$

Введем независимые переменные $k_{\text{М}} = \frac{m_{\text{обм.акт}}}{m_{\text{М}}}$ и $n = \frac{d}{\delta_{\text{э}}}$.

Тогда с учетом выражений (2.75)

$$k_{\text{М}} = \frac{Q_{\delta}}{Q_{\text{М}}} \frac{\delta_{\text{э}}}{d} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_{\text{М}}} k_3 \quad (2.78)$$

выражение (2.73) можно записать в виде

$$P_{\text{НОМ.уд.}} = \frac{u_{\text{ОПТ}}^* \mu_0 H_c k_{\text{М}} n \sigma_p \frac{\pi D_1 n_{\text{НОМ}}}{60} k_{\phi} k_{\text{об}} J_{\text{доп}}}{\left[1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_{\text{М}} n^2 \frac{\gamma_{\text{М}}}{\gamma_{\delta}} \frac{1}{k_3} \right] (1 + k_{\text{М}}) \gamma_{\text{обм}}}. \quad (2.79)$$

Для отыскания экстремума функции $P_{\text{ном.уд}}$ объединим условия

$\frac{\partial P_{\text{ном.уд}}}{\partial n} = 0$ и $\frac{\partial P_{\text{ном.уд}}}{\partial k_M} = 0$ в систему уравнений, решая которую получим

критериальные соотношения для двух независимых переменных

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_M} k_3}; \quad k_M = 1. \quad (2.80)$$

Подстановка соотношений (2.80) в выражение (2.79) позволяет записать выражение максимума удельной номинальной (выходной) мощности

$$P_{\text{ном.уд. max}} = \frac{u_{\text{опт}}^*}{120} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{max}} k_3}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_M}} \sigma_r \pi D_i n_{\text{ном}} k_{\phi} k_{\text{об}} J_{\text{доп}}. \quad (2.81)$$

Работа тихоходного СГПМ модульного типа вращательного движения

Переход к конструктивной схеме тихоходного СГПМ модульного типа вращательного движения в составе ветроэнергетической установки связан с обоснованными рисками разработчиков в необходимости увеличения воздушного зазора и средней длины витка обмотки статора, приводящих к повышению массогабаритных показателей машины. Вместе с тем, конструктивная схема тихоходного СГПМ модульного типа (рис. 2.8) позволяет рассматривать каждый модуль статора, изготовленный в виде подковообразного электромагнита (ЭМ), как самостоятельный источник ЭДС, которая индуцируется в обмотках ЭМ магнитным потоком, создаваемым двумя параллельными рядами полюсов постоянных магнитов с продольно и поперечно чередующейся полярностью. Электромагниты расположены попарно напротив друг друга и имеют две катушки с последовательно встречным направлением намотки обмоточного провода. Для усиления ЭДС в катушках ЭМ, противоположные полюса постоянных магнитов,

расположенные один под другим на подвижном роторе, замыкаются между собой ферромагнитными пластинами.

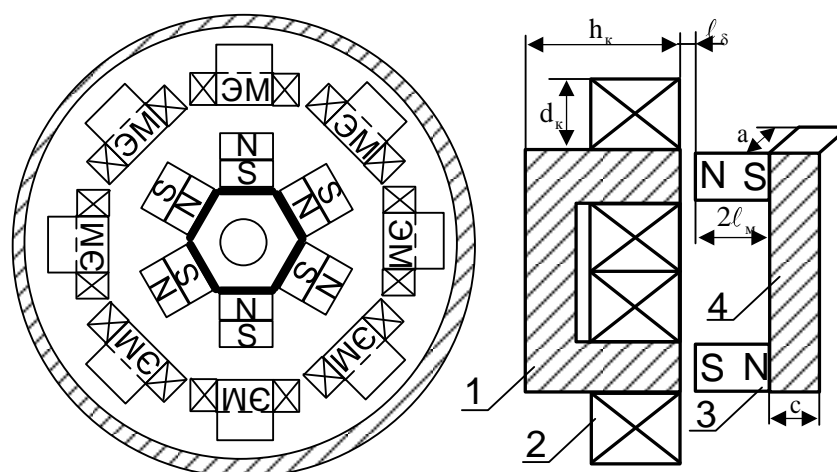


Рис. 2.8. Конструктивная схема однофазного СГПМ модульного типа:

- 1- магнитопровод ЭМ; 2 - катушка ЭМ; 3 - постоянный магнит;
4 - ферромагнитная пластина.

Отсутствие общего магнитопровода в конструкции тихоходного СГПМ модульного типа создает преимущество различных вариантов компоновки эквивалентного генератора из нескольких независимых генераторов (модулей), позволяя варьировать напряжение и силу тока в нагрузке или напряжение и токи в нескольких нагрузках одновременно. Различные варианты регулирования мощности тихоходного СГПМ модульного типа в составе ветроэнергетической установки дают возможность легко подстроиться под изменчивость силы и скорости ветра во времени, тогда как в СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом при сильном ветре возникает опасность получить в нагрузке высокое напряжение, способное вывести из строя электротехническое оборудование. Чтобы компенсировать этот недостаток производители тихоходных СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом выставляют предельные значения для напряжения или занижают его до уровня, когда он может функционировать только при рабочей и начальной силе ветра [19, 65]. При использовании тихоходного СГПМ модульного типа в

составе ВЭУ можно наилучшим образом приспособиться к изменяющейся ветровой нагрузке. При низкой скорости ветра обмотки ЭМ соединяют последовательно, что увеличивает напряжение и снижает силу тока в нагрузке. При усилении ветра обмотки ЭМ соединяются параллельно, что при сильном ветре обеспечивает более высокий КПД синхронного генератора. При этом электрическая энергия синхронного генератора не тратится на компенсацию торможения ротора.

Для снижения момента страгивания в однофазном СГПМ модульного типа количество полюсов постоянных магнитов в одном ряду выбирается равным $n = 6 + 2 \cdot k$, где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$, а количество ЭМ соответственно $N = n \pm 2$ [101]. При этом необходимо обеспечить условие, чтобы полюса одной из пар диаметрально противоположных друг другу ЭМ находились напротив одноименных полюсов постоянных магнитов. Это позволяет при изменении схемы подключения обмоток ЭМ синхронного генератора предотвратить воздействие радиальных электромагнитных сил, вызывающих биение ротора.

В конструкции трехфазного СГПМ модульного типа число ЭМ должно быть кратным шести, причем полюса трех ЭМ, расположенные относительно друг друга под углом 120 электрических градусов, должны находиться напротив одноименных полюсов постоянных магнитов (рис. 2.9).

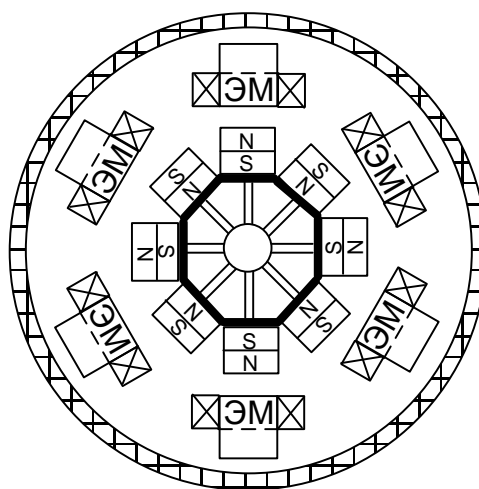


Рис. 2.9. Конструктивная схема трехфазного СГПМ модульного типа.

Математическая модель тихоходного СГПМ модульного типа описывается системой уравнений его электрической и механической частей

$$\begin{cases} J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_M - F\omega - M_{\text{ЭМ}} \\ L_{\text{э}} \frac{di}{dt} + iR_{\text{э}} + u(t) = e_0(t), \end{cases} \quad (2.82)$$

где $J_{\text{пр}}$ - приведенный момент инерции, $M_{\text{ЭМ}}$ - результирующий тормозящий электромагнитный момент на валу ротора, определяемый действием всех самостоятельных источников ЭДС, включенных в электрическую цепь нагрузки, $R_{\text{э}}$ - эквивалентное активное сопротивление СГПМ модульного типа, $e_0(t)$ - эквивалентная ЭДС синхронного генератора, определяемая различными вариантами компоновки самостоятельных источников ЭДС.

Применение итеративного метода Шварца к решению системы уравнений (2.82) позволяет отдельно рассмотреть физические процессы в электрической и механической частях синхронного генератора, работающего на заданную нагрузку.

Коэффициент полезного действия тихоходного СГПМ модульного типа

$$\eta_{\Gamma} = \left(1 + P_r^*\right)^{-1}, \quad (2.83)$$

где $P_r^* = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_{\text{э}} dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt}$ – относительные потери в синхронном генераторе.

Уравнение (2.83) позволяет составить функционал, где оптимизируются две функции $u(t)$ и $i(t)$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left[P_r^* u(t) i(t) - i^2(t) R_{\text{э}} \right] dt = 0. \quad (2.84)$$

Так как относительные потери P_r^* в функционале представляют собой число, то условие минимально возможных потерь $P_{r \min}^*$ соответствует работе синхронного генератора при активной нагрузке.

Минимально возможные относительные потери в тихоходном СГПМ модульного типа при номинальных значениях напряжения $U_{\text{ном}}$ и тока $I_{\text{ном}}$ в нагрузке рассчитываются по формуле

$$P_{r \min}^* = \frac{I_{\text{ном}} R_{\text{э}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{I_{\text{ном}} R_{\text{э}}}{u_{\text{опт}}^* \cdot E_0}. \quad (2.85)$$

Определение ЭДС синхронного генератора E_0 в выражении (2.85) зависит от числа и схемы соединения катушек ЭМ (рис. 2.10, а, б).

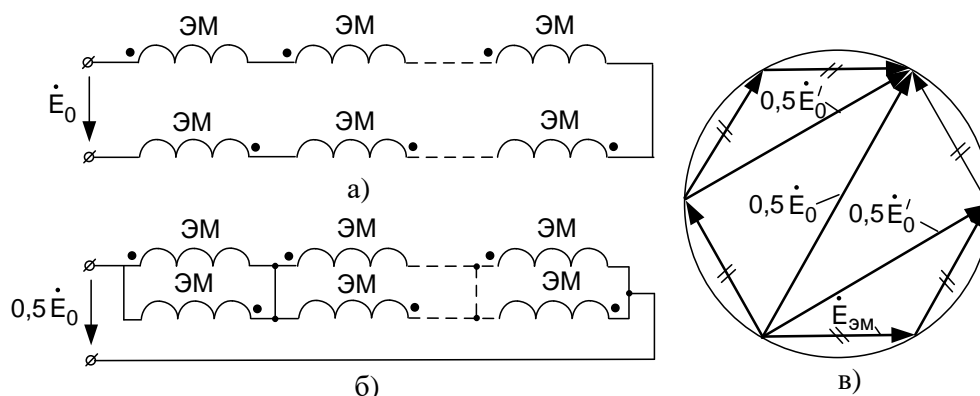


Рис. 2.10. Однофазный СГПМ модульного типа: а, б - электрические схемы соединения обмоток ЭМ; в - векторная диаграмма ЭДС генератора.

Из векторной диаграммы синхронного генератора (рис. 2.10, в) очевидно, что эквивалентная ЭДС однофазного СГПМ модульного типа представляет собой удвоенное значение результирующей ЭДС обмоток ЭМ, входящих в одну группу. При сложении векторов ЭДС обмоток ЭМ, принадлежащих разным группам, на векторной диаграмме образуется правильный многоугольник с диаметром описанной окружности, равным в масштабе напряжений половине модуля эквивалентной ЭДС синхронного генератора

$$E_0 = \frac{2E_{\text{ЭМ}}}{\sin \frac{\pi}{N}}, \quad (2.86)$$

где N – число ЭМ.

Принцип ступенчатого регулирования ЭДС на зажимах синхронного СГПМ модульного типа заключается в изменении числа попарно соединенных ЭМ в каждой группе, о чем свидетельствует изменение длины вектора E'_0 на векторной диаграмме (рис. 2.10, в)

$$E'_0 = E_0 \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.87)$$

где $\alpha = [0^\circ, 180^\circ]$ – угол, изменяемый с шагом $\frac{180^\circ}{N_1}$; $N_1 = \frac{N}{2}$ – число ЭМ в одной группе.

Для попарно параллельного соединения обмоток ЭМ (рис. 2.10, б) действующие значения генерируемой ЭДС на зажимах синхронного генератора будут в два раза меньше, чем полученные для попарно последовательного соединения обмоток ЭМ. Из формулы (2.87) следует, что ступенчатое регулирование ЭДС однофазного СГПМ модульного типа подчиняется закону синуса, который необходимо учитывать при разработке схем управления (рис. 2.11).

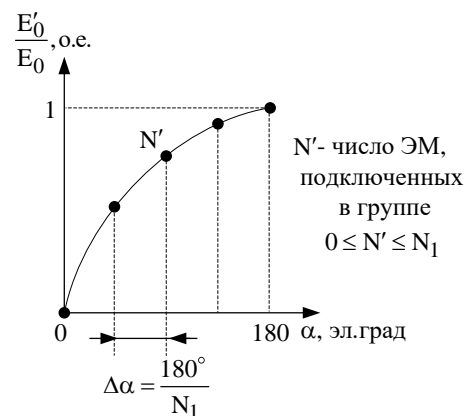


Рис. 2.11. Ступенчатое регулирование ЭДС однофазного СГПМ модульного типа.

В выражении (2.86) ЭДС в обмотке ЭМ

$$E_{\text{ЭМ}} = 4k_{\phi}\alpha_{\delta}B_{\delta}S_{\delta}fw_{\text{ЭМ}}, \quad (2.88)$$

где $w_{\text{ЭМ}}$ – число витков обмотки ЭМ, B_{δ} – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, S_{δ} – площадь воздушного зазора; $\alpha_{\delta} < 1$ – коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению меньшего к большему числу (ПМ/ЭМ); $k_{\phi} = 1.11$ – коэффициент формы.

Вывод расчетных соотношений параметров СГПМ рассмотрим на примере конструкции индуктора с ПМ, изготовленными в форме диска, имеющими аксиальное направление намагничивания. Круглая форма полюса позволяет более качественно выбрать опытные образцы ПМ с одинаковой объемной намагниченностью, упростив технологию изготовления индуктора и уменьшить биение вала [92].

На основе полученного аналитического решения индуктированной ЭДС в витке, находящемся в магнитном поле ПМ, совершающем круговое движение соотношение (2.88) можно записать иначе [145]:

$$E_{\text{ЭМ}} = \sqrt{2}B_{\delta}R \frac{\pi D_a n}{60} \alpha_{\delta} w_{\text{ЭМ}}, \quad (2.89)$$

где R – радиус ПМ.

Приравняв между собой выражения (2.88) и (2.89), можно вывести формулу для определения площади воздушного зазора

$$S_{\delta} = \frac{R}{\sqrt{2}k_{\phi}} \left(\frac{\pi D_a}{2p} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}k_{\phi}} \left(\frac{k_a D_a \sin \frac{\pi}{2p}}{2} \right) \left(\frac{\pi D_a}{2p} \right) = \tau_a^l k_a k_p, \quad (2.90)$$

где D_a – диаметр якоря; $k_a = 0.65 \div 0.75$ – коэффициент, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению $\tau = \pi D_a / 2p$; p – число пар полюсов; k_p – поправочный коэффициент, учитывающий типоразмеры постоянных магнитов, выпускаемых серийно.

Для СГПМ модульного типа введение геометрического фактора $\lambda = \ell_a / D_a = 0.5 \div 0.8$ в выражение (2.90) и учет $k_\phi = \pi / 2\sqrt{2} = 1,11$ позволяет получить формулу для расчета поправочного коэффициента

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2p}}{\pi \lambda} \quad (2.91)$$

Расчетная мощность тихоходного СГПМ модульного типа

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi} = U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} = u^* E_0 I_{\text{НОМ}} = k_{\text{И}} E_0 I_{\text{К}}, \quad (2.92)$$

где $k_{\text{И}} = u^* \left[-\frac{u^* (\cos \varphi + Q_{\text{Д}} \sin \varphi)}{\sqrt{1 + Q_{\text{Д}}^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} (\sin \varphi - Q_{\text{Д}} \cos \varphi)}{1 + Q_{\text{Д}}^2}} \right]$ – коэффициент

использования, $I_{\text{К}} = \frac{E_0}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}}$ – ток короткого замыкания, $Q_{\text{Д}} = \frac{X_a}{R_a}$ –

добротность обмотки якоря, R_a – активное сопротивление обмотки якоря, учитывающее потери в обмотке и стали, X_a – индуктивное сопротивление обмотки якоря с учетом потока реакции якоря.

На рис. 2.12 приведен график зависимости коэффициента использования от относительного напряжения в нагрузке при $\cos \varphi = 0.8$.

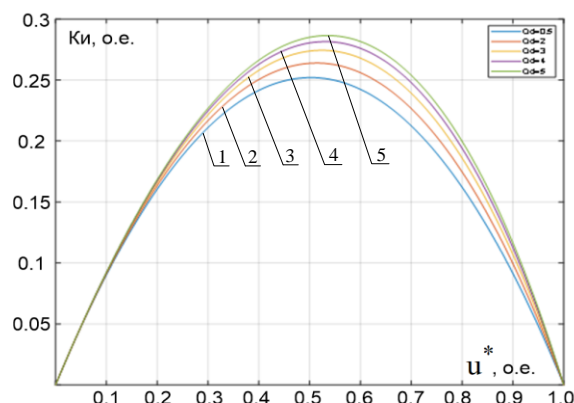


Рис. 2.12. К определению $u_{\text{ОПТ}}^*$ в зависимости от добротности обмотки якоря:

1 - $Q_{\text{Д}} = 0,5$; 2 - $Q_{\text{Д}} = 2$; 3 - $Q_{\text{Д}} = 3$; 4 - $Q_{\text{Д}} = 4$; 5 - $Q_{\text{Д}} = 5$.

Расчет диаметра якоря по окружности воздушного зазора D_a и его длины l_a связан с выводом основного уравнения электрической машины

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C_A S_{\text{НОМ}} N \sin \frac{\pi}{N}}{8 u^* n \lambda k_d k_a k_p}}, \quad (2.93)$$

где $C_a = 60 / (\pi^2 B_\delta A \alpha_\delta k_\phi)$ – постоянная Арнольда, $S_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi$ – полная мощность, A – линейная нагрузка, $u^* = U_{\text{НОМ}} / E_0 = 0.7 \div 0.8$ – относительное напряжение в нагрузке, $n = 60 \cdot f / p$ – частота вращения индуктора, $k_d = 0.7 \div 0.8$ – расчетный коэффициент, учитывающий реакцию якоря.

Намагничивающая сила обмотки ЭМ

$$I_{\text{НОМ}} w_{\text{ЭМ}} = \frac{\pi D_a A k_a k_d}{N}. \quad (2.94)$$

С учетом соотношений (2.86), (2.88) и (2.92) выражение полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа преобразуем к виду

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{u^* 2\sqrt{2} B_\delta R \frac{\pi D_a n}{60} \alpha_\delta w_{\text{ЭМ}} I_{\text{НОМ}}}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}. \quad (2.95)$$

При определении магнитной индукции B_m в нейтральном сечении постоянного магнита S_m примем $B_m S_m = B_\delta S_\delta$, тогда из расчета магнитной цепи СГПМ

$$B_\delta = \frac{B_m S_m}{S_\delta} = B_r \frac{\lambda_\delta^*}{1 + \lambda_\delta^*} \cdot \frac{S_m}{S_\delta}, \quad (2.96)$$

где $\lambda_\delta = \mu_0 \frac{S_\delta}{\delta}$, $\lambda_m = \frac{B_r S_m}{H_c d}$ – соответственно магнитные проводимости воздушного зазора и ПМ, приходящиеся на один полюс, δ – воздушный зазор, d – высота ПМ.

Намагничивающую силу обмотки ЭМ с учетом реакции якоря выразим через допустимую плотность тока J_d , площадь поперечного сечения катушки $S_{\text{кат}}$ и коэффициент заполнения k_3

$$Iw_{\text{ЭМ}} = 2J_d S_{\text{кат}} k_3 k_d. \quad (2.97)$$

После подстановки соотношений (2.96) и (2.97) в (2.95) получим выражение полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа в зависимости от расчетного радиуса ПМ

$$S_{\text{НОМ}} = u^* 4\sqrt{2} \frac{\mu_0 H_c R S_{\text{кат}} J_d \alpha_\delta k_3 k_d}{\left(1 + \mu_0 \frac{H_c S_\delta d}{B_r S_m \delta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \left(\frac{\pi D_a n}{60}\right) \left(\frac{d}{\delta}\right). \quad (2.98)$$

Геометрические размеры ПМ и другие оптимальные параметры магнитной системы определим, исходя из условий достижения максимума удельной полной мощности

$$S_{\text{НОМ.уд}} = u^* 4\sqrt{2} \frac{\mu_0 H_c R S_{\text{кат}} J_d \alpha_\delta k_3 k_d}{\left(1 + \mu_0 \frac{H_c S_\delta d}{B_r S_m \delta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) (1 + k_M) m_M} \left(\frac{\pi D_a n}{60}\right) \left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (2.99)$$

где $k_M = \frac{m_{\text{обм}}}{m_M}$ – отношение массы обмоточного провода к массе ПМ,

$m_{\text{обм}} = 2NS_{\text{кат}} \ell_{\text{ср}} k_3 \gamma_{\text{обм}}$, $m_M = 4pdS_m \gamma_M$, $\ell_{\text{ср}}$ – средняя длина витка,

$\gamma_{\text{обм}}$ – плотность меди, γ_M – плотность материала постоянного магнита.

Для этого преобразуем выражение (2.99), представив его в виде функционала с двумя независимыми переменными $k_M = \frac{m_{\text{обм}}}{m_M}$ и $k_\chi = \frac{d}{\delta}$

$$S_{\text{НОМ.уд}} = \frac{A_1 k_M k_\chi}{\left(1 + A_2 k_M k_\chi^2\right) (1 + k_M)} = A_1 F(k_M, k_\chi), \quad (2.100)$$

где A_1 и A_2 – постоянные коэффициенты

$$A_1 = u^* \frac{\sqrt{2}\pi}{30} \mu_0 H_c \frac{RJ_d D_{an}}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_\delta k_d}{\gamma_{обм} \ell_{cp}}, \quad A_2 = \mu_0 \frac{H_c}{B_r} \frac{2p}{N} \frac{1}{k_3} \frac{\gamma_M}{\gamma_{обм}} k_\ell.$$

При выводе функционала (2.100) поправочный расчетный коэффициент, учитывающий соотношение объемов обмотки якоря и воздушного зазора $k_\ell = S_\delta \delta / S_{кат} \ell_{cp}$, находится методом последовательных приближений. В начале итерационного процесса значение $k_\ell = 1$.

Для отыскания экстремума функционала приравняем нулю его частные производные и решим систему уравнений для определения неизвестных

$$\frac{\partial S_{ном.уд}}{\partial k_\chi} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial S_{ном.уд}}{\partial k_M} = 0. \quad (2.101)$$

При записи корней системы можно убедиться, что система уравнений в положительной полуплоскости пространства определена и имеет единственное решение (рис. 2.13)

$$k_{\chi \text{ опт}} = \frac{d}{\delta} = \sqrt{\frac{1}{A_2}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{N}{2p} \frac{\gamma_{обм}}{\gamma_M} \frac{k_3}{k_\ell}}, \quad k_{M \text{ опт}} = \frac{m_{обм}}{m_M} = 1. \quad (2.102)$$

Подставляя корни системы $k_{\chi \text{ опт}}$ и $k_{M \text{ опт}}$ в функционал (2.100) получим выражение максимума удельной полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа

$$S_{ном.уд.макс.} = \sqrt{2} u^* \left(\frac{\pi D_{an}}{60} \right) \frac{RJ_d}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_\delta k_d}{\ell_{cp}} \sqrt{\frac{\mu_0 (HB)_{макс}}{\gamma_M \gamma_{обм}} \frac{N}{2p} \frac{k_3}{k_\ell}}, \quad (2.103)$$

где $(HB)_{макс}$ – максимальное энергетическое произведение.

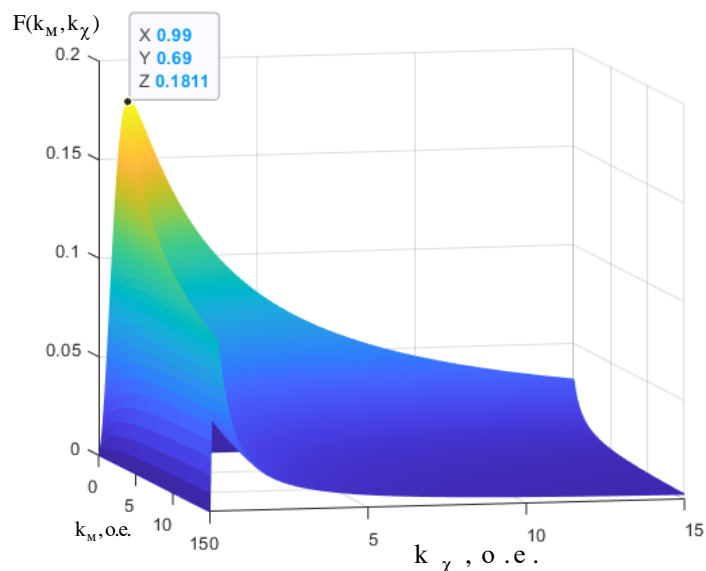


Рис. 2.13. Нахождение максимума функционала $F(k_\chi, k_M) \equiv S_{\text{ном.уд}}$ путем перебора значений переменных.

Входящая в выражение (2.103) величина средней длины витка катушки ЭМ $\ell_{\text{ср}} \approx 2\pi(R + 0,5b_K)$ определяется методом последовательных приближений. При этом оптимальное соотношение размеров сечения катушки высотой h_K и шириной b_K можно определить из условия минимума массы активных материалов ЭМ

$$n_{\text{опт}} = \frac{h_K}{b_K}, \quad (2.104)$$

$$n_{\text{опт}} = 4 \frac{S_{\text{кат}} k_3 \gamma_{\text{обм}}}{S_c k_c \gamma_c}, \quad (2.105)$$

где S_c – площадь сечения полюса ЭМ, γ_c – плотность стали, k_c – коэффициент заполнения стали.

Соотношения (2.85) – (2.104) положены в основу оптимизационного расчета магнитной системы тихоходного СГПМ модульного типа, которая на предварительной стадии заключается в определении основных размеров магнитной системы на основе аналитического расчета магнитной цепи с введением поправочных коэффициентов учета магнитного потока рассеяния

на роторе, реакции якоря и др. На стадии поверочных расчетов на основе построенной математической модели СГПМ модульного типа в пакете ANSYS Maxwell 16.0 уточняются значения плотности тока в сечении катушек ЭМ, линейная нагрузка, истинная конфигурация магнитной системы и обмоточные данные, тепловые потери (сталь, медь) элементах конструкции синхронного генератора.

2.3. Определение связи между энергетическими показателями работы электротехнических комплексов и конструктивными параметрами тихоходных СМПМ, устанавливаемыми решением задачи оптимизации.

Электропривод тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора на основе СДПМ возвратно-поступательного движения

Длинноходовые тихоходные одноступенчатые поршневые компрессоры являются перспективным направлением развития в компрессоростроении. По сравнению с известными одноступенчатыми и многоступенчатыми конструкциями малорасходных поршневых компрессоров их отличает значительно большая возможность сжатия газа, например, аммиака до давления 2 МПа в одной ступени при гарантировано низких температурах нагнетания за счёт длительного времени цикла и интенсивного внешнего охлаждения цилиндра. Отношение хода поршня к диаметру цилиндра такого типа компрессора принимается не менее 10, а время рабочего цикла составляет не менее 0,5 с [151, 174], тогда как общепринятые рекомендации по конструированию известных конструкций одноступенчатых поршневых компрессоров устанавливают среднюю скорость поршня в диапазоне 1,0...7,0 м/с, частоту вращения коленчатого вала 7,5...50,0 об/с и отношение хода поршня к диаметру цилиндра 0,35...0,8, причем время рабочего цикла составляет 0,133...0,02 с [106, 177].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в Омском государственном техническом университете и АО Научно-технический комплекс "Криогенная техника" (г. Омск) показывают, что эффективное применение длинноходовых тихоходных одноступенчатых поршневых компрессоров взамен известных конструкций многоступенчатых малорасходных поршневых компрессоров зависит от определения диапазона их конструктивных и режимных параметров [24, 25, 174, 176]. Очевидно, что решение этой задачи должно устанавливать возможный диапазон конструктивных и режимных параметров тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин, использование которых в качестве привода представляется более целесообразным по массогабаритным показателям и КПД в сравнении с традиционными приводами, например, гидроприводами возвратно-поступательного движения.

Решение задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ для двигательного режима в виде выражений (2.13) - (2.18), (2.21) - (2.31) позволяет вывести уравнения связи между энергетическими показателями работы электропривода тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора с конструктивными параметрами СДПМ.

Для удобства анализа магнитной системы СДПМ (рис. 2.14), предназначенной для электропривода тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, представим кривую $B = B(H)$ размагничивания ПМ из материала NdFeB, магнитную проницаемость, намагничивающую силу обмотки и магнитную проводимость в относительных единицах [26].

Пренебрегая насыщением магнитной цепи, координаты точки А пересечения прямой размагничивания ПМ и луча (рис. 2.15), соответствующего относительной проводимости воздушного зазора λ_{δ}^* можно найти из решения системы уравнений

$$\begin{cases} b = 1 + h \\ b = -\lambda_{\delta}^* h \end{cases} \quad (2.106)$$

где $b = B/B_r$ и $h = H/H_c$ - соответственно относительная индукция и напряженность магнитного поля, например для сплава NdFeB марки N40 остаточная индукция $B_r = 1.1$ Тл, а коэрцитивная сила $H_c = 955$ кА/м

[124]; $\lambda_{\delta}^* = \frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_M} = \mu_0 \frac{H_c Q_{\delta} d}{B_r Q_M \delta}$ - приведенная относительная магнитная

проводимость воздушного зазора; Q_{δ} , Q_M - соответственно площади воздушного зазора и полюса; d - длина ПМ; δ - длина воздушного зазора.

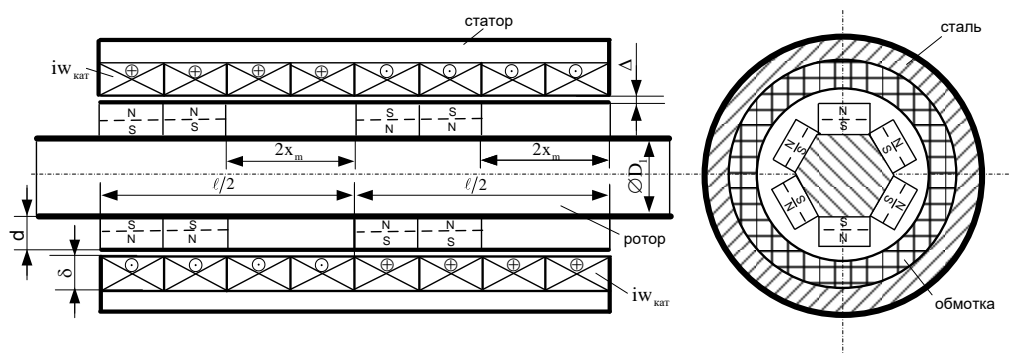


Рис. 2.14. Магнитная система СДПМ привода длинноходового тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора, где $2x_m$ - ход поршня.

Решение системы (2.106) позволяет определить относительное значение индукции в нейтральном сечении ПМ при отсутствии размагничивающего действия намагничивающей силы обмотки СДПМ

$$b_m = \frac{\lambda_{\delta}^*}{1 + \lambda_{\delta}^*}. \quad (2.107)$$

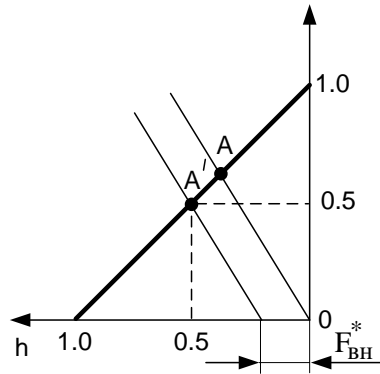


Рис. 2.15. Учет размагничивающего действия намагничивающей силы обмотки СДПМ для ПМ с внешней цепью.

С учетом наличия ампервитков обмотки СДПМ рабочая точка A' состояния магнитной цепи СДПМ перемещается на прямой размагничивания ПМ ниже точки A . Перенос луча из начала координат через точку A происходит параллельно самому себе вдоль оси абсцисс (рис. 2.15) на величину относительного значения намагничивающей силы обмотки, приходящейся на одну пару полюсов

$$F_{BH}^* = I_m w_a / (2H_c \ell_{cp}), \quad (2.108)$$

где ℓ_{cp} - средняя длина витка обмотки.

С учетом F_{BH}^* система уравнений (2.106) принимает вид

$$\begin{cases} b = 1 + h \\ b = -\lambda_{\delta}^* (h + F_{BH}^*) \end{cases} \cdot \quad (2.109)$$

Решение системы уравнений (2.109) имеет вид

$$b_m = \frac{\lambda_{\delta}^* (1 - F_{BH}^*)}{1 + \lambda_{\delta}^*}. \quad (2.110)$$

Выражение (2.108) позволяет определить намагничивающую силу обмотки СДПМ при номинальной нагрузке тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора для случая достижения максимума внешней энергии,

развиваемой ПМ, когда положение рабочей точки A' соответствует относительному значению индукции $b_m = 0,5$ (рис. 2.15).

Получение высоких давлений нагнетания газа в тихоходных длинноходовых одноступенчатых поршневых компрессорах возвратно-поступательного движения связано с достижением максимального значения электромагнитной силы, приложенной к поршню компрессора. Исходя из этого, определим максимум удельной электромагнитной силы, действующей на поршень компрессора

$$F_{\text{эм.уд}} = \frac{F_{\text{эм.м}}}{m_{\text{обм.акт}} + m_{\text{м}}}, \quad (2.111)$$

где $F_{\text{эм.м}} = B_{\delta} l_{\text{ср}} k I_{\text{м}} w_{\text{а}}$ - амплитудное значение электромагнитной силы;
 $m_{\text{обм.акт}} = 2Q_{\delta} \delta \gamma_{\text{обм}} k_3$ - масса активной части витков обмотки якоря;
 $m_{\text{м}} = 2Q_{\text{м}} d \gamma_{\text{м}}$ - масса ПМ; k_3 - коэффициент заполнения по меди.

Преобразуем выражение (2.108), используя решение уравнения (2.110) и соотношения для определения основного магнитного потока ПМ

$$\Phi_{\text{осн}} = B_{\delta} Q_{\delta} = B_{\text{м}} Q_{\text{м}}, \quad (2.112)$$

амплитудного значения активной части ампервитков обмотки

$$I_{\text{м}} w_{\text{а}} = \sqrt{2} S_{\text{обм.акт}} k_3 J_{\text{доп}}, \quad (2.113)$$

площади поперечного сечения активной части витков обмотки

$$S_{\text{обм.акт}} = \delta l_{\text{а}} \quad (2.114)$$

площади поперечного сечения воздушного зазора

$$Q_{\delta} = \frac{k l_{\text{ср}} l_{\text{а}}}{2}. \quad (2.115)$$

После преобразования выражения (2.111) получим

$$F_{\text{эм.уд}} = \frac{2\sqrt{2} B_{\text{г}} \frac{\lambda_{\delta}^* (1 - F_{\delta}^*)}{1 + \lambda_{\delta}^*} Q_{\text{м}} \delta k_3 J_{\text{доп}}}{m_{\text{обм.акт}} + m_{\text{м}}}. \quad (2.116)$$

Для определения максимума удельной электромагнитной силы представим ее как функцию двух независимых переменных

$$k_M = \frac{m_{\text{обм.акт}}}{m_M}, \quad k_\chi = \frac{d}{\delta}. \quad (2.117)$$

Тогда можно записать

$$F_{\text{эм.уд.}} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 H_c J_{\text{доп}}}{\gamma_{\text{обм}}} \frac{k_M k_\chi}{1+k_M} \cdot \frac{(1-F_\delta^*)}{\left[1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_M k_\chi^2 \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}} k_3}\right]}. \quad (2.118)$$

Необходимое условие максимума функции $F_{\text{эм.уд.макс}}$ связано с решением системы уравнений, соответствующей процедуре приравнивания нулю ее частных производных первого порядка

$$\begin{cases} \frac{\partial F_{\text{эм.уд.}}}{\partial k_M} = 0; \\ \frac{\partial F_{\text{эм.уд.}}}{\partial n} = 0. \end{cases} \quad (2.119)$$

Корни системы (2.119) определяют критериальные соотношения

$$k_{M\text{опт.}} = 1, \quad k_{\chi\text{опт.}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_M} k_3} \quad (2.120)$$

при которых максимум удельной электромагнитной силы

$$F_{\text{эм.уд.макс}} = \frac{J_{\text{доп}} (1-F_\delta^*)}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}} k_3}{\gamma_M \gamma_{\text{обм}}}}, \quad (2.121)$$

где $(BH)_{\text{макс}} = \frac{B_r H_c}{4}$ - магнитная энергия ПМ.

При этом максимальное среднее значение удельной механической мощности двигателя будет

$$P_{\text{мех.уд.макс}} = \frac{1}{2} F_{\text{эм.уд.макс}} \cdot v_m = \frac{J_{\text{доп}} X_m \omega (1-F_\delta^*)}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}} k_3}{\gamma_M \gamma_{\text{обм}}}}. \quad (2.122)$$

По заданному среднему значению механической мощности на валу компрессора, используя выражение (2.28), можно получить формулу для расчета средней длины витка обмотки

$$\ell_{\text{ср}} = \pi D_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{P_{\text{мех}}}{\sqrt{2} B_{\delta} \lambda k A x_{\text{mf}}}}, \quad (2.123)$$

где A - линейная токовая нагрузка, λ - коэффициент, учитывающий отношение активной длины ротора к среднему диаметру обмотки.

Электротехнический комплекс на основе возобновляемого источника энергии в виде тихоходного СГПМ возвратно-поступательного движения

Высокотехнологичный электротехнический комплекс возобновляемого источника энергии для электропитания маломощных потребителей может быть реализован на основе различных конструктивных схем тихоходных синхронных генераторов возвратно-поступательного движения. Структурная схема комплекса приведена на рис. 2.16. Анализ структурной схемы показывает, что определяющее значение на выходные характеристики электротехнического комплекса оказывают непосредственно параметры тихоходного СГПМ ВПД.

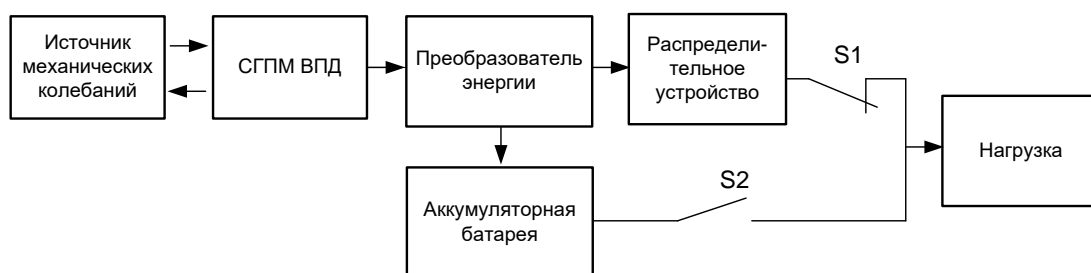


Рис. 2.16. Структурная схема возобновляемого источника энергии.

Решение задачи оптимизации параметров СМПМ для генераторного режима в виде выражений (2.43) - (2.56) позволяет вывести уравнения связи

между энергетическими показателями работы с конструктивными параметрами.

Для конструктивной схемы СГПМ возвратно-поступательного движения (рис. 2.3, б) выражение удельной электрической мощности, представленное через две независимые переменные, имеет вид:

$$P_{\text{эл.уд.}} = \frac{u_{\text{опт}} \mu_0 x_m \omega H_c J_{\text{доп}} k_M k_\chi}{\sqrt{2} \gamma_{\text{обм}}} \cdot \frac{(1 - F_\delta^*)}{1 + k_M} \cdot \left[1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_M k_\chi^2 \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}} k_3} \right]. \quad (2.124)$$

Необходимое условие наличия максимума функции $P_{\text{эл.уд}}$ приводит к критериальным соотношениям, тождественным (2.120). После подстановки $k_{\text{Мопт.}}$ и $u_{\text{опт}}$ в (2.124) максимум удельной электрической мощности генератора будет

$$P_{\text{эл.уд.макс}} = \frac{u_{\text{опт}} x_m \omega J_{\text{доп}} (1 - F_\delta^*)}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}} k_3}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_M}}. \quad (2.125)$$

Система автономного электроснабжения на основе тихоходного синхронного ветрогенератора на постоянных магнитах.

Система автономного электроснабжения малой мощности (до 100 кВт) с применением тихоходных СГПМ обладает повышенной энергетической эффективностью по сравнению с альтернативными вариантами построения других аналогичных по функциональным возможностям систем электроснабжения [12, 65, 79]. Оставляя за скобками создание комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, требующими решения самостоятельной научной проблемы управления процессами энергопреобразования и распределения энергии в изолированных энергетических системах с генерирующими установками различной физической природы, а также создание гибридных

автономных систем электроснабжения, требующих решения проблемы согласования режимов производства и потребления энергии [20, 64], основными компонентами автономной системы электроснабжения на основе тихоходного СГПМ являются (рис. 2.17): многолопастное ветроколесо, преобразующее энергию набегающего ветрового потока в механическую энергию вращения оси турбины; ветрогенератор на постоянных магнитах, ротор которого связан с турбиной соединительной муфтой; полупроводниковый выпрямитель; двунаправленный импульсный преобразователь; инвертор; аккумуляторная батарея; блок балластных нагрузок, нагрузка.

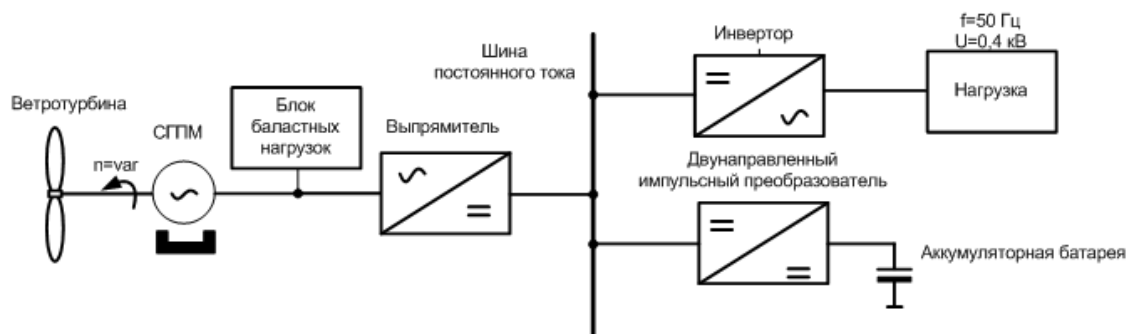


Рис. 2.17. Блок-схема автономной СЭС на основе тихоходного СГПМ.

Использование в автономной СЭС тихоходного СГПМ преобразователя частоты на основе инвертора тока устраняет сложности регулирования и стабилизации выходного напряжения при изменяющейся частоте вращения ротора синхронного генератора на постоянных магнитах и обеспечивает выработку качественной электроэнергии при изменении сопротивления нагрузки и скорости ветра, высокую ремонтпригодность, удобство монтажа, транспортировки и эксплуатации электрооборудования [40, 87, 88, 165].

Найденные из решения задачи оптимизации выражения (2.62) - (2.69) позволяют вывести уравнения связи между энергетическими показателями работы ветрогенератора с максимально возможным КПД и его конструктивными параметрами.

Для конструктивной схемы СДПМ с цилиндрическим магнитопроводом выражение удельной электрической мощности, представленное через две независимые переменные (2.120) и расчетный диаметр D_1 статора (2.69), имеет вид

$$P_{\text{эл.уд.}} = \frac{\pi}{120p} \frac{\mu_{\text{опт}} \mu_0 H_c J_{\text{доп}} D_1 n_0}{\gamma_{\text{обм}}} \frac{k_M n}{1 + k_M} \frac{(1 - F_\delta^*) k_\phi k_{\text{об}} \alpha_\delta}{\left[1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_M n^2 \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}} k_z} \right]}. \quad (2.126)$$

Поиск максимума удельной электрической мощности приводит к соотношениям $k_{\text{Мопт}}$ и $n_{\text{опт}}$, тождественным (2.120), после их подстановки в выражение (2.126) получим

$$P_{\text{эл.уд.макс}} = \frac{\pi}{240p} \frac{\mu_{\text{опт}} J_{\text{доп}} D_1 n_0 (1 - F_\delta^*) k_\phi k_{\text{об}} \alpha_\delta}{\gamma_{\text{обм}}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}} k_z}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_M}}. \quad (2.127)$$

Схема алгоритма проектирования оптимальных конструкций магнитных систем СДПМ

Проведенные исследования позволяют представить методологическую схему (рис. 2.1) в виде алгоритма, позволяющего реализовать предварительный и поверочный этап проектирования. Блок-схема алгоритма предложенной методологии проектирования для СДПМ в составе привода поршневого компрессора приведена на рис. 2.18. На первоначальной стадии предварительного расчета конструкции СДПМ определяется условие, при котором достигается предельный, теоретически обоснованный КПД (минимум удельных относительных потерь).

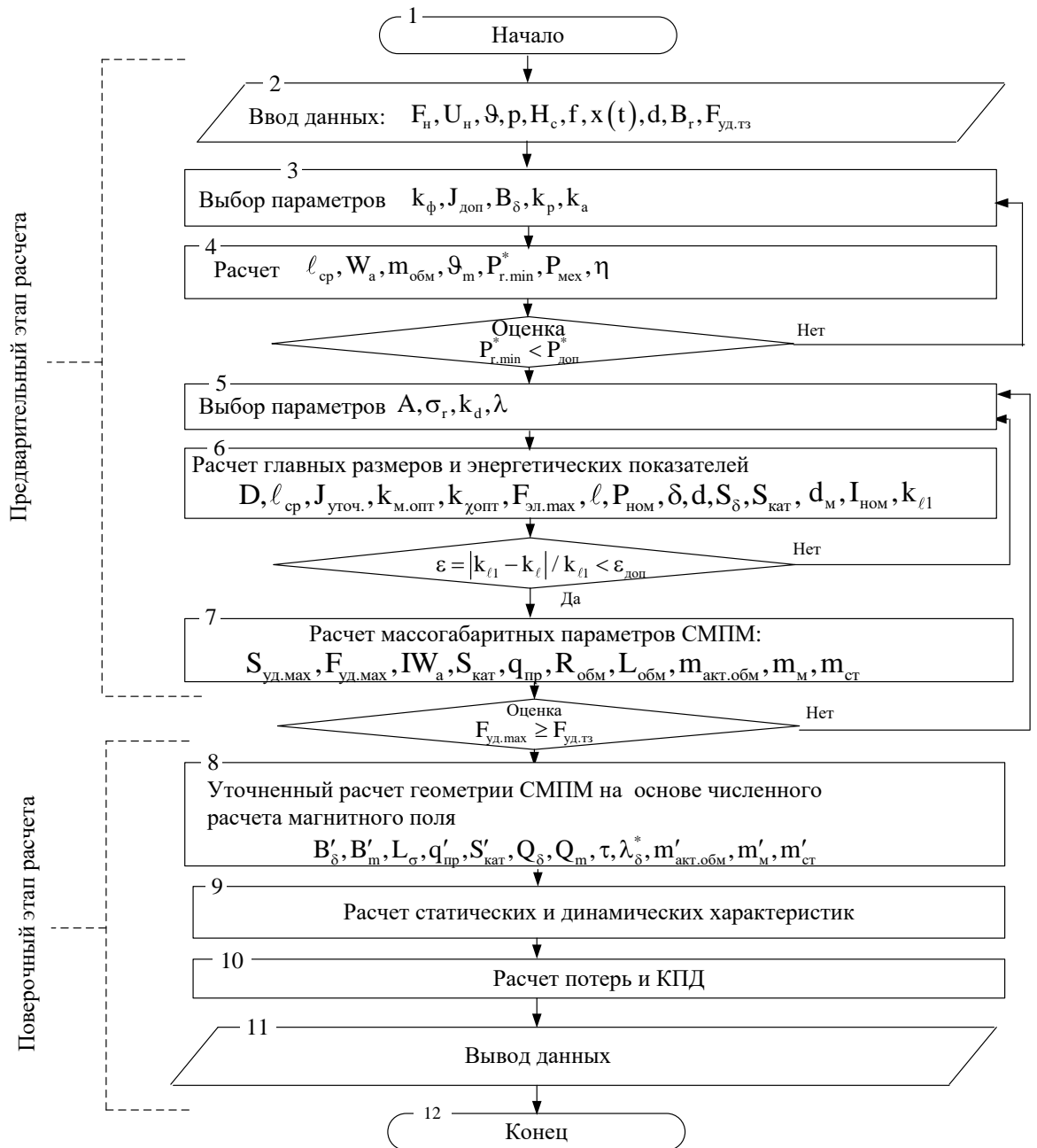


Рис. 2.18. Блок-схема алгоритма проектирования магнитной системы тихоходного СДПМ в составе привода одноступенчатого поршневого компрессора.

На блок-схеме этому этапу соответствуют блоки 3 и 4: заданные техническим заданием исходные данные (блок 2) дополняются следующими параметрами: k_{ϕ} – коэффициент формы; $J_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока (определяет тепловой режим); u^* – относительное напряжение в нагрузке;

B_δ – значение модуля вектора магнитной индукции в воздушном зазоре;
 k_p — расчетный коэффициент, зависящий от формы постоянного магнита и направления намагничивания; k_d – расчетный коэффициент, учитывающий реакцию якоря, k_a – коэффициент, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению.

Указанные коэффициенты могут быть уточнены в ходе итерационного расчета после определения полезной механической мощности, КПД в соответствии с заданным законом движения механической подсистемы.

В блоках 5,6 реализуется методика расчета базовых размеров магнитной системы и энергетических показателей в соответствии с критерием оптимальности по максимуму удельной полезной мощности, который для СДПМ может быть преобразован в максимум удельного тягового электромагнитного усилия. При выбранных значениях A – линейной токовой нагрузки, σ_p – коэффициента рассеяния магнитного потока, $\lambda = l_a / D_a$ – геометрического фактора определить оптимальное значение независимых переменных $k_{\chi \text{ опт}} = \frac{d}{\delta}$, $k_{M \text{ опт}} = \frac{m_{\text{обм}}}{m_M}$, зная которые можно определить остальные массогабаритные и энергетические показатели магнитной системы (блок 7).

Уточнение и проверка принятых в расчете коэффициентов, значений индукции в воздушном зазоре, индуктивности обмотки, а также теплового режима (уточнение допустимой плотности тока) выполняется на этапе поверочных расчетов, который может проводится как средствами стороннего прикладного программного обеспечения (например, ANSYS или ELCUT) так и на основе собственных разработанных методик.

Успешным выполнением этапа поверочных расчетов является соответствие массогабаритных показателей, а также энергетических

характеристик определенной конструкции тихоходной СМППМ требованиям технического задания.

2.4. Выводы

1. Представлена методология и общий подход к оптимальному проектированию тихоходных СМППМ в составе ВЭТК, на основе разделения математической модели на две части: уравнений движения и электрического состояния СМППМ.

2. Выполнена формулировка задачи оптимизации параметров СМППМ путем построения математической модели СМППМ в составе ВЭТК.

3. Использован итерационный метода Шварца для разделения полученной системы уравнений электрической и механической частей и исследование энергетических уравнений на заданный закон движения подвижной части машины.

4. Построен функционал для оптимизации параметров СМППМ на заданный закон движения подвижной части машины с определением минимально возможных относительных потерь или максимума КПД электромеханического преобразования энергии.

5. Представлено решение задачи оптимизации для тихоходных СГППМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом, определены соотношения между электромагнитными параметрами и выходными характеристиками СМППМ, которые максимизируют критерий оптимальности (КПД) при ограничениях определяющих физическую реализуемость магнитной системы СГППМ.

6. На основе выбранного критерия оптимальности минимума удельных потерь дано обоснование базовым конструкциям СГППМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ.

7. На основе выбранных критериев оптимальности минимума удельных потерь и максимума тягового электромагнитного усилия дано обоснование базовым конструкциям тихоходных СМППМ в составе ЛМЭП.

8. Представлено решение задачи оптимизации для тихоходной СМППМ, определены соотношения между электромагнитными параметрами и выходными характеристиками ЛМЭП, которые максимизируют критерий оптимальности (КПД и тяговое электромагнитное усилия) и минимуме массы используемых в магнитной системе активных материалов при ограничениях определяющих физическую реализуемость магнитной системы СМППМ.

9. Показана актуальность решения задачи уточнения конструктивных и электромагнитных параметров тихоходных СМППМ полученных на основе численного расчета магнитного поля.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПО КРИТЕРИЮ ОДИНАКОВОЙ ОБЪЕМНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ.

3.1. Решение осесимметричной краевой задачи для стационарного магнитного поля СМППМ в цилиндрической системе координат.

Разработка ВЭТК, включающие в свой состав тихоходные синхронные магнитоэлектрические машины, жестко подчиненные требованиям технического задания сопряжена с расчетом магнитного поля [23, 36, 38, 39, 46, 66, 81–83, 109, 133, 159, 160, 171, 203]. Как правило, конструкция синхронной тихоходной магнитоэлектрической машины включает в себя следующие компоненты магнитной системы: магнитопровод (сердечник), катушки (обмотки), постоянные магниты, кроме этого магнитная система содержит воздушные промежутки (в том числе рабочий зазор).

Краевая задача сводится к нахождению распределения квазистатического магнитного поля по области моделирования S [2, 159, 178, 202]. Система уравнений магнитного поля в магнитной системе, где наряду с постоянными магнитами присутствуют токи проводимости, имеет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J}, \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0, \\ \bar{B} &= \mu \bar{H} + \mu_0 \bar{M}_0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где \bar{J} – вектор плотности тока проводимости; $\mu = \mu_0 \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость; \bar{B} , \bar{H} – соответственно векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля; \bar{M}_0 – вектор остаточной намагниченности.

Введем в рассмотрение векторный магнитный потенциал \bar{A} , удовлетворяющий уравнениям

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{A} &= \bar{B} \\ \operatorname{div} \bar{A} &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

тогда согласно (3.1) можно записать:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \bar{A}) = \mu \operatorname{rot} \bar{H} + \mu_0 \operatorname{rot} \bar{M}_0 \quad (3.3)$$

Для расчетной модели синхронной тихоходной магнитоэлектрической машины примем следующие допущения:

- магнитное поле осесимметрично;
- в силу осевой симметрии поля будем рассматривать половину моделируемой области S ;
- обмотка с током в модели заменяется прямоугольной зоной с равномерно распределенной плотностью тока;
- относительная магнитная проницаемость стальных элементов конструкции магнитопровода при фиксированных положениях подвижной части постоянна;
- намагниченное состояние цилиндрических систем постоянных магнитов, в модели от угла поворота θ не зависит;
- объемные токи намагниченности в постоянном магните отсутствуют;
- при описании постоянного магнита учитываются только поверхностные токи, вследствие наличия линейного участка на кривой размагничивания и высокого значения магнитной твердости магнитов из РЗМ.

Последнее допущение справедливо для высокоэнергетических постоянных магнитов. Намагниченность таких магнитов можно считать постоянной по всему объему.

Поверхностные токи намагниченности определяют скачкообразное изменение тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля на

границе постоянного магнита и воздушной окружающей среды. Средняя плотность поверхностных токов намагниченности записывается в виде:

$$i_M = \text{rot } \bar{M}_0 = [\bar{n}, \bar{M}_{02} - \bar{M}_{01}], \quad (3.4)$$

где \bar{n} - нормаль (единичный вектор) к границе раздела двух сред с различными магнитными свойствами; $\bar{M}_{01}, \bar{M}_{02}$ - соответственно векторы намагниченности сред.

Для воздушной окружающей среды вектор намагниченности $\bar{M}_{02} = 0$, поэтому справедливо выражение

$$i_M = [\bar{n} - \bar{M}_{01}] = [\bar{M}_{01}, \bar{n}] = [\bar{M}_0, \bar{n}]. \quad (3.5)$$

Среднюю плотность поверхностных токов намагниченности можно также записать через вектор остаточной намагниченности \bar{M}_0 . По аналогии с записью выражения объемной плотности тока намагничивания

$$\bar{J}_M = \text{rot } \frac{\mu_0 \bar{M}_0}{\mu} \quad (3.6)$$

плотность поверхностного тока намагничивания i_M будет

$$i_M = \text{rot } \frac{\mu_0 \bar{M}_0}{\mu}. \quad (3.7)$$

Для магнитных систем с высокоэнергетическими постоянными магнитами, имеющими осевую симметрию, плотность поверхностного тока намагничивания i_M имеет одну составляющую. При радиальном направлении намагничивания постоянного магнита плотность поверхностного тока i_M в цилиндрической системе координат направлена вдоль угла θ . При совпадении вектора намагниченности \bar{M}_0 с осью r выражение (3.7) можно преобразовать к виду:

$$i_M = M_0 \cos(\bar{n} \wedge \bar{r}) \quad (3.8)$$

Также одну составляющую будут иметь вектор плотности тока проводимости $\bar{J} = \bar{i}_\varphi J_\varphi = \text{rot } H$ и векторный магнитный потенциал $\bar{A} = \bar{i}_\varphi A_\varphi$.

С учетом принятых допущений уравнение (3.3) в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} r \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \frac{1}{\mu} \frac{A}{r^2} = -J - i_M. \quad (3.9)$$

В осесимметричном поле легко перейти от векторного магнитного потенциала поля $A(r, z)$ к функции магнитного потока, которую можно трактовать как магнитный поток сквозь сектор, центральный угол которого равен единице [160, 187]:

$$\psi(r, z) = \frac{\Phi}{2\pi} = rA(r, z). \quad (3.10)$$

Условие $\psi(r, z) = rA(r, z) = \text{const}$ определяет уравнение силовой линии осесимметричного поля, при этом составляющие вектора магнитной индукции в любой точке силовой линии определяются выражениями

$$B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad B_\varphi = 0. \quad (3.11)$$

Уравнение Пуассона в кусочно-однородной области S ЛМЭП с учетом (3.10) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -J - i_M. \quad (3.12)$$

На внешней кусочно-гладкой границе M кусочно-однородной расчетной области S зададим нулевые граничные условия: вследствие осевой симметрии магнитного поля на оси модели функция магнитного потока $\psi = 0$; на внешней границе магнитопровода также выполняется условие $\psi = 0$;

Разобьем моделируемую область S на однородные зоны. Для каждой из этих зон можно записать уравнение Лапласа - Пуассона.

В зоне магнитопровода уравнение (3.12) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_c} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_c} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0, \quad (3.13)$$

где μ_c - магнитная проницаемость магнитопровода.

В зоне обмоток с током поверхностная плотность тока намагниченности постоянного магнита $J_M = 0$; и магнитная проницаемость среды $\mu = \mu_0$, поэтому уравнение Пуассона будет

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -\mu_0 J, \quad (3.14)$$

где $J = \frac{IW}{S_{\text{обм}} k_3}$; IW - намагничивающая сила обмотки на пару полюсов;

$S_{\text{обм}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{обм}_i}$ - суммарная площадь обмоток на пару полюсов.

В зонах постоянного магнита и окружающей воздушной среды уравнение (3.12) принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -\mu_0 i_M, \quad (3.15)$$

причем средняя поверхностная плотность тока намагниченности $i_M \neq 0$ только на границе постоянного магнита, в других точках $i_M = 0$. Для постоянных магнитов из РЗМ обычно примем $\mu_r = 1$.

Уравнения (3.12) – (3.15) дополняются внешними нулевыми граничными условиями (на границе M функция магнитного потока $\psi = 0$) и условиями сопряжения на внутренних границах расчетной области S . Наличие поверхностного тока намагниченности на границе зон постоянного магнита и среды с магнитной проницаемостью μ_0 (окружающая воздушная среда и обмотки) учитывается скачком тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля $H_{1\tau}$, $H_{2\tau}$ на границе раздела сред:

$$H_{1\tau} - H_{2\tau} = \frac{B_r}{\mu_0} = M_0, \quad (3.16)$$

По методу Галеркина [73, 76, 125, 162] преобразуем уравнение (3.12) к виду:

$$\int_V \left(\frac{1}{\mu_r} \right) [N_m]_r^T \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] dV + \int_V [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) dV = 0. \quad (3.17)$$

Выражение, стоящее под знаком первого интеграла уравнения (3.17) можно упростить, если воспользоваться соотношениями:

$$[N_m]_r^T \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right\} - \frac{\partial [N]_m^T}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right), \quad (3.18)$$

$$[N_m]_r^T \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial [N]_m^T}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right). \quad (3.19)$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned} & \int_V \left(\frac{1}{\mu_r} \right) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right\} \right] dV - \\ & - \int_V \left(\frac{1}{\mu_r} \right) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] dV + \int_V [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) dV = 0. \end{aligned} \quad (3.20)$$

По теореме Остроградского – Гаусса первый интеграл уравнения (3.20) представим в виде [62]:

$$\begin{aligned} & \int_V \left(\frac{1}{\mu_r} \right) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [N_m]_r^T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right\} \right] dV = \\ & = 2\pi \oint_M \left(\frac{1}{\mu_r} \right) [F_r \cos(\bar{n} \bar{r}) + F_z \cos(\bar{n} \bar{z})] r dM, \end{aligned} \quad (3.21)$$

где \bar{n} – внешняя нормаль к поверхности, ограничивающей объем V ; проекции вектора F на оси r и z

$$F_r = [N_m]_r^T \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} ; \quad F_z = [N_m]_r^T \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (3.22)$$

С учетом выражения (3.21) уравнение (3.20) будет

$$\begin{aligned}
& 2\pi \oint_M \left(\frac{1}{\mu_r} \right) [F_r \cos(\bar{n} \bar{r}) + F_z \cos(\bar{n} \bar{z})] r dM - \\
& - 2\pi \int_S \left(\frac{1}{\mu_r} \right) \left[\frac{1}{r} \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] r dS + \\
& + 2\pi \int_S [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) r dS = 0.
\end{aligned} \quad (3.23)$$

Величина первого интеграла уравнения (3.23) определяется граничными условиями. На внешней границе M моделируемой области S заданы нулевые краевые условия, поэтому значение интеграла равно нулю. С учетом принятых граничных условий уравнение (3.23) преобразуется к виду:

$$\int_S \left(\frac{1}{\mu_r} \right) \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] dS - \int_S [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) r dS = 0. \quad (3.24)$$

Представим в соответствии с МКЭ [125] решение для функции магнитного потока аппроксимирующим полиномом

$$\psi = \lambda_1 + \lambda_2 r + \lambda_3 z. \quad (3.25)$$

Коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в выражении (3.25) определим через координаты вершин треугольного элемента i, j, k , используя матричную форму записи системы уравнений

$$\begin{Bmatrix} \psi_i \\ \psi_j \\ \psi_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_k & z_k \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{Bmatrix}. \quad (3.26)$$

В сокращенной форме записи

$$\{\psi\} = [A] \{\lambda\}, \text{ отсюда } \{\lambda\} = [A]^{-1} \{\psi\}; \quad (3.27)$$

$$\det[A] = \begin{vmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_k & z_k \end{vmatrix} = 2S_e,$$

где $2S_e$ – площадь треугольного элемента с вершинами в точках $(r_i, z_i), (r_j, z_j)$ и (r_k, z_k) .

Применяя правило вычисления обратной матрицы $[A]^{-1}$, получим уравнение (3.27) в развернутом виде:

$$\begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2S_e} \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \\ a_j & b_j & c_j \\ a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_i \\ \psi_j \\ \psi_k \end{Bmatrix}, \quad (3.28)$$

где коэффициенты матрицы определяются из соотношений

$$\begin{aligned} a_i &= r_j z_k - r_k z_j; & a_j &= r_k z_i - r_i z_k; & a_k &= r_i z_j - r_j z_i; \\ b_i &= z_j - z_k; & b_j &= z_k - z_i; & b_k &= z_i - z_j; \\ c_i &= r_k - r_j; & c_j &= r_i - r_k; & c_k &= r_j - r_i. \end{aligned}$$

Функция магнитного потока на конечном элементе с учетом уравнения (3.28) может быть представлена следующим образом:

$$\psi_m = (N_i \psi_i + N_j \psi_j + N_k \psi_k)_r = [N_m]_r [\psi_m]_r, \quad (3.29)$$

где $N_m = \frac{(a_m + b_m r + c_m z)}{2S_e}$ – функция формы; $m = i, j, k$.

Выражение (3.29) функции формы $[N_m]_r$ на конечном элементе позволяет выполнить операцию интегрирования по треугольнику i, j, k в уравнении (3.24). Последовательность действий вычисления интегралов в уравнении (3.24) может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^p \int_{S_e} \frac{1}{\mu_r} \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] dS - \int_{S_e} [N_m]_r^T \mu_0 J_r dS - \\ \left. - \int_{\ell} [N_m]_r^T \mu_0 i_M r d\ell \right\} = 0, \quad (3.30) \end{aligned}$$

где $i_M = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \cos(n \wedge z)$ - средняя плотность поверхностного тока намагниченности; n - единичный вектор, перпендикулярный граничной поверхности p - число треугольных конечных элементов, на которые разбита расчетная область s ; q - число узлов расчетной триангуляционной сети; $m = 1, 2, \dots, q$.

Подстановка выражений (3.28), (3.29) в уравнение (3.30) позволяет составить систему линейных алгебраических уравнений для определения функции магнитного потока в узлах расчетной триангуляционной сети:

$$\sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [B_m]_r^T [B_m]_r \{\psi_m\}_r - \frac{1}{2S_e} \sum_{r=1}^p \int_r \frac{1}{\mu_r} \cos(n \wedge z) \begin{bmatrix} L_1 c_i & L_1 c_j & L_1 c_k \\ L_2 c_i & L_2 c_j & L_2 c_k \\ L_3 c_i & L_3 c_j & L_3 c_k \end{bmatrix} \{\psi_m\}_r dr -$$

$$-\mu_0 J \frac{S_e}{12} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2r_i + r_j + r_k \\ r_i + 2r_j + r_k \\ r_i + r_j + 2r_k \end{bmatrix} = 0. \quad (3.31)$$

В выражении (3.31) $[B_m]_r$ и $[B_m]_r^T$ имеют вид

$$[B_m]_r = \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}; \quad [B_m]_r^T = \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Значение интеграла, находящегося под знаком суммы в выражении (3.31), определяется граничными условиями.

После сокращения множителя $(1/4S_e)$ в уравнении (3.31) окончательно получим:

$$4S_e \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [B_m]_r^T [B_m]_r \{\psi_m\}_r - 2 \sum_{r=1}^p \int_r \frac{1}{\mu_r} \cos(n \wedge z) \begin{bmatrix} L_1 c_i & L_1 c_j & L_1 c_k \\ L_2 c_i & L_2 c_j & L_2 c_k \\ L_3 c_i & L_3 c_j & L_3 c_k \end{bmatrix} \{\psi_m\}_r dr -$$

$$-\mu_0 J \frac{S_e^2}{3} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2r_i + r_j + r_k \\ r_i + 2r_j + r_k \\ r_i + r_j + 2r_k \end{bmatrix} = 0. \quad (3.33)$$

С целью максимальной автоматизации формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для определения функции магнитного потока в узлах q сети введем понятие «регулярного элемента» на регулярной триангуляционной сети, используемое для исследования плоскопараллельных магнитных полей [6, 8]. С его помощью можно исключить этап формирования матриц жесткости и связи и перейти к составлению глобальной СЛАУ

$$[u] \cdot \{\psi\} = \{F\}, \quad (3.34)$$

где $[u]$ - есть ленточная матрица коэффициентов u_{ms} , $m = 1, 2, \dots, q$; $s = 1, 2, \dots, q$; $\{\psi\}$ - матрица – столбец узловых значений искомой функции магнитного потока ψ_m ; $\{F\}$ - матрица-столбец свободных членов. Рекуррентные соотношения для формирования глобальной СЛАУ (3.34) имеют вид:

$$u_{ms} = \frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r1)} b_s^{(r1)} + c_m^{(r1)} c_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(b_m^{(r2)} b_s^{(r2)} + c_m^{(r2)} c_s^{(r2)} \right) + u'_{ms},$$

$$u'_{ms} = h \left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(c_m^{(r1)} + c_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(c_m^{(r2)} + c_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge z) \text{ при } m \neq s; \quad (3.35)$$

$$u_{mm} = \sum_{r=1}^6 \frac{1}{\mu_r} \left(b_m^{(r)} b_m^{(r)} + c_m^{(r)} c_m^{(r)} \right) + u'_{mm},$$

$$u'_{mm} = h \sum_{r=1}^6 \frac{1}{\mu_r} \left(c_m^{(r)} + c_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge z) \text{ при } m = s, \quad (3.36)$$

где r_1, r_2 - номера конечных элементов с узлами m и s .

В качестве примера для пояснения структуры глобальной СЛАУ рассмотрим «регулярный элемент» на равномерной триангуляционной сети (рис. 3.1).

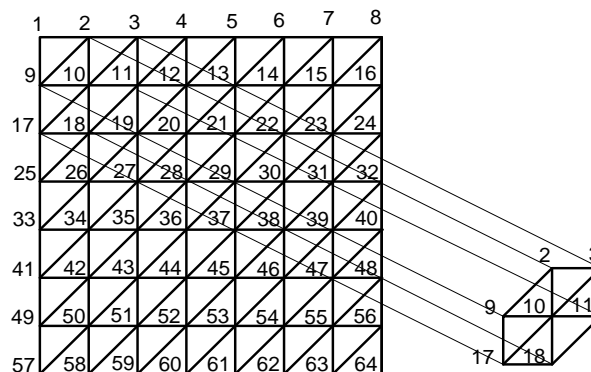


Рис. 3.1. Равномерная триангуляционная сеть.

Запишем уравнение для 10 узла «регулярного элемента»:

$$\begin{aligned}
 &u_{10,9}\Psi_9 + u_{10,10}\Psi_{10} + u_{10,2}\Psi_2 + u_{10,3}\Psi_3 + u_{10,11}\Psi_{11} + \\
 &+ u_{10,18}\Psi_{18} + u_{10,17}\Psi_{17} = F_{10}
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

Из уравнения (3.37) видно, что решением глобальной СЛАУ при заданных граничных и начальных условиях являются значения функции магнитного потока $\{\Psi_m\}$ в узлах триангуляционной сети магнитной системы СМПМ, представленной на рис. 3.1 [55, 144, 154]. Для отыскания решения глобальной СЛАУ могут быть использованы метод Гаусса, итерационный метод последовательной верхней релаксации и другие [46, 48, 111, 125, 167, 169].

Построенная математическая модель магнитного поля СМПМ с полученными рекуррентными выражениями для отыскания значений функции магнитного потока в узлах расчетной области позволяет выполнить ее программную реализацию на ПК. Она является составной частью математического моделирования ВЭТК и при необходимости может использоваться самостоятельно для исследования магнитных полей магнитоэлектрических устройств, имеющих осевую симметрию.

3.2. Решение трехмерной краевой задачи для стационарного магнитного поля в прямоугольной системе координат

Для конструкции магнитных систем синхронных магнитоэлектрических машин характерны однородные элементы - объем, входящие в состав отдельных компонентов: стального магнитопровода, катушки, постоянных магнитов.

Для каждого из этих однородных элементов можно записать уравнение Лапласа-Пуассона:

- для стального магнитопровода

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_c} \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_c} \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_c} \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.38)$$

- для объема занятого обмоткой с током плотность тока намагничивания постоянного тока $\bar{J} = 0$, магнитная проницаемость равна μ_0 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) = -\mu_0 \bar{J} \quad (3.39)$$

где $\bar{J} = \frac{IW}{V_{обм} k_z}$ - модуль вектора; $V_{обм} = V_{обм1} + V_{обм2} + \dots + V_{обми}$ - суммарный объем обмоток на пару полюсов.

- для постоянного магнита и воздушного пространства уравнение Пуассона можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) = \mu_0 \bar{J}'_M, \quad (3.40)$$

причем плотность тока намагниченности $\bar{J}'_M \neq 0$ только на границе постоянного магнита. В остальных случаях $\bar{J}'_M = 0$.

Для решения краевой задачи уравнения (3.38-3.40) необходимо дополнить внешними нулевыми граничными условиями и условиями сопряжения на внутренних гранях расчетного объема V .

В уравнении (3.40) вектор плотности поверхностного тока намагниченности

$$\bar{J}'_M = \text{rot}\bar{H}_c, \quad (3.41)$$

\bar{H}_c – вектор коэрцитивной силы.

В прямоугольной системе координат уравнения (3.38-3.40) с учетом (3.41) можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu} \Delta A_x = -J_x + J'_{MX} \\ \frac{1}{\mu} \Delta A_y = -J_y + J'_{MY} \\ \frac{1}{\mu} \Delta A_z = -J_z + J'_{MZ} \end{cases}, \quad (3.42)$$

где $\bar{A} = \bar{i}A_x + \bar{j}A_y + \bar{k}A_z$, $\bar{H}_c = \bar{i}H_{cx} + \bar{j}H_{cy} + \bar{k}H_{cz}$ – соответственно составляющие векторного потенциала магнитного поля и вектора коэрцитивной силы.

Составляющие вектора плотности поверхностного тока намагниченности

$$\bar{J}'_M = \bar{i}J'_{MX} + \bar{j}J'_{MY} + \bar{k}J'_{MZ}$$

$$J_{MX} = \frac{\partial H_{cz}}{\partial y} - \frac{\partial H_{cy}}{\partial z}, J_{MY} = \frac{\partial H_{cx}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial x}, J_{MZ} = \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \quad (3.43)$$

являются постоянными величинами в пределах каждого из блоков модели.

Система уравнений (3.42) с учетом выражений (3.43) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \right) = -J_x + \left(\frac{\partial H_{cz}}{\partial y} - \frac{\partial H_{cy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) = -J_y + \left(\frac{\partial H_{cx}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) = -J_z + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \end{cases}. \quad (3.44)$$

Представим уравнение Лапласа-Пуассона для трехмерного конечного элемента, изображенного на рис. 3.2.

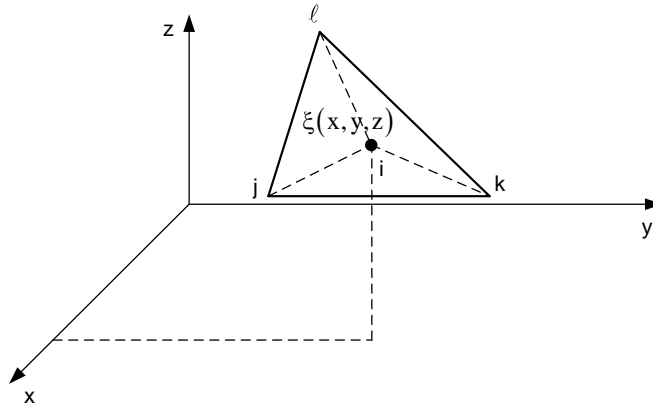


Рис. 3.2. Трехмерный конечный элемент.

Уравнение Лапласа-Пуассона в однородном отдельном объеме V имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) = -\bar{J} + \bar{J}'_M. \quad (3.45)$$

На внешней грани расчетного объема V заданы нулевые граничные условия.

Наличие поверхностного тока намагниченности на границе зон постоянного магнита и среды с магнитной проницаемостью μ_0 определяется скачком тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля $H_{1\tau}, H_{2\tau}$ на гранях раздела сред

$$H_{1\tau} - H_{2\tau} = \frac{B_r}{\mu_0} = M_0 \quad (3.46)$$

Проекция вектора F на оси координат

$$F_x = [N_m]_r^T \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial x}; \quad F_y = [N_m]_r^T \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial y}; \quad F_z = [N_m]_r^T \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial z}. \quad (3.47)$$

Используя уравнения (3.47) уравнение (3.45) может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned}
& 2\pi\oint_V \frac{1}{\mu_r} \left[F_x \cos(nx) + F_y \cos(ny) + F_z \cos(nz) \right] dV - \\
& - 2\pi \int_V \frac{1}{\mu_r} \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial x} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial x} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial y} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial y} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial z} \right] dV + \quad (3.48) \\
& + 2\pi \int_V [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) dV = 0
\end{aligned}$$

Так как на внешней грани S моделируемого объема V заданы нулевые краевые условия значение первого интеграла равно нулю.

Тогда

$$\begin{aligned}
& \int_V \frac{1}{\mu_r} \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial x} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial x} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial y} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial y} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial \{A_m\}_r}{\partial z} \right] dV + \quad (3.49) \\
& + \int_V [N_m]_r^T \mu_0 (J + i_m) dV = 0
\end{aligned}$$

В соответствии с МКЭ [44, 125] используем трехмерный симплекс-элемент, который содержит константу и линейные члены. Число коэффициентов в таком полиноме на единицу больше размерности координатного пространства.

Интерполяционный полином для тетраэдра в декартовой системе координат

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z. \quad (3.50)$$

Интерполяционный полином для тетраэдра в цилиндрической системе координат:

$$\varphi = \lambda_1 + \lambda_2 r + \lambda_3 \theta + \lambda_4 z \quad (3.51)$$

Для симплекс-элемента характерны два свойства:

- функция φ изменяется линейно между двумя любыми узлами;
- любая линия вдоль, которой φ принимает одинаковые значения, есть

прямая, пересекающаяся две стороны элемента.

Коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ определяются через координаты вершин тетраэдра i, j, k, ℓ .

$$\begin{Bmatrix} \Psi_i \\ \Psi_j \\ \Psi_k \\ \Psi_\ell \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

В сокращенной форме записи

$$\{\Psi\} = [A]\{\lambda\}, \text{ следовательно,} \quad (3.53)$$

$$\{\lambda\} = [A]^{-1}\{\Psi\} \quad (3.54)$$

$$\det[A] = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix} = 6V_e \quad (3.55)$$

Выполним расчет обратной матрицы $[A]^{-1}$, тогда получим

$$\begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{6V_e} \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i & d_i \\ a_j & b_j & c_j & d_j \\ a_k & b_k & c_k & d_k \\ a_\ell & b_\ell & c_\ell & d_\ell \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \Psi_i \\ \Psi_j \\ \Psi_k \\ \Psi_\ell \end{Bmatrix}. \quad (3.56)$$

После преобразований коэффициенты матрицы представим в виде:

$$a_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \quad a_j = \begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_k & y_k & z_k \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \quad a_k = \begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_\ell & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \quad a_\ell = \begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \end{vmatrix}$$

$$a_i = x_j(y_k z_\ell - y_\ell z_k) - y_j(x_k z_\ell - x_\ell z_k) + z_j(x_k y_\ell - x_\ell y_k),$$

$$a_j = x_i(y_k z_\ell - y_\ell z_k) - y_i(x_k y_\ell - x_\ell y_k) + y_i(x_k z_\ell - x_\ell z_k),$$

$$a_k = x_i(y_j z_\ell - y_\ell z_j) - y_i(x_j z_\ell - x_\ell z_j) + z_i(x_j y_\ell - x_\ell y_j),$$

$$a_\ell = x_i(y_j z_k - y_k z_j) - z_i(x_j z_k - x_k z_j) + z_i(x_j y_k - x_k y_j),$$

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{x}_i \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{b}_j = \mathbf{x}_j \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{b}_k = \mathbf{x}_k \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{b}_\ell = \mathbf{x}_\ell \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{x}_j \left[(y_k z_\ell - y_\ell z_k) - y_j (z_\ell - z_k) + z_j (y_\ell - y_k) \right],$$

$$\mathbf{b}_j = \mathbf{x}_j \left[(y_k z_\ell - y_\ell z_k) - y_i (z_\ell - z_k) + z_i (y_\ell - y_k) \right],$$

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{x}_k \left[(y_j z_\ell - y_\ell z_j) - y_i (z_\ell - z_j) + z_i (y_\ell - y_j) \right],$$

$$\mathbf{b}_\ell = \mathbf{x}_\ell \left[(y_j z_k - y_k z_j) - y_i (z_k - z_j) + z_i (y_k - y_j) \right],$$

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{y}_i \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{c}_j = \mathbf{y}_j \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{c}_k = \mathbf{y}_k \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_\ell & z_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{c}_\ell = \mathbf{y}_\ell \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{y}_i \left[(x_k z_\ell - x_\ell z_k) - x_j (z_\ell - z_k) + z_j (x_\ell - x_k) \right],$$

$$\mathbf{c}_j = \mathbf{y}_j \left[(x_k z_\ell - x_\ell z_k) - x_i (z_\ell - z_k) + z_i (x_\ell - x_k) \right],$$

$$\mathbf{c}_k = \mathbf{y}_k \left[(x_j z_\ell - x_\ell z_j) - x_i (z_\ell - z_j) + z_i (x_\ell - x_j) \right],$$

$$\mathbf{c}_\ell = \mathbf{y}_\ell \left[(x_j z_k - x_k z_j) - x_i (z_k - z_j) + z_i (x_k - x_j) \right],$$

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{z}_i \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_\ell & y_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{d}_j = \mathbf{z}_j \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_\ell & y_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{d}_k = \mathbf{z}_k \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_\ell & y_\ell \end{vmatrix}, \mathbf{d}_\ell = \mathbf{z}_\ell \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{z}_i \left[(x_k y_\ell - x_\ell y_k) - x_j (y_\ell - y_k) + y_j (x_\ell - x_k) \right],$$

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{z}_j \left[(x_k y_\ell - x_\ell y_k) - x_i (y_\ell - y_k) + y_i (x_\ell - x_k) \right],$$

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{z}_k \left[(x_j y_\ell - x_\ell y_j) - x_i (y_\ell - y_j) + y_i (x_\ell - x_j) \right],$$

$$\mathbf{d}_\ell = \mathbf{z}_\ell \left[(x_j y_k - x_k y_j) - x_i (y_k - y_j) + y_i (x_k - x_j) \right].$$

Векторный магнитный потенциал для конечного элемента может быть представлена в виде:

$$\tilde{A} = [N_m]_r [A_m]_r, \quad (3.57)$$

где $N_m = \frac{a_m + b_m x + c_m y + d_m z}{6V_e}$ - функция формы, m принимает значения i, j, k, ℓ - наименование вершин тетраэдрического конечного элемента.

Указанное выражение функции формы $[N_m]_r$ на конечном элементе позволяет выполнить операцию интегрирования по объему:

$$\sum_{r=1}^p \int_{V_e} \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial x} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial x} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial y} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial y} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial z} \right] dV - \int_{V_e} [N_m]_r^T \mu_0 J dV + \int_S [N_m]_r^T \mu_m \bar{i}_m dS = 0, \quad (3.58)$$

где \bar{i}_m составляющие $i_{mx} = \frac{1}{\mu_m} \left(\frac{\partial A_m}{\partial x} \cos(n \wedge x) \right)$, $i_{my} = \frac{1}{\mu_m} \left(\frac{\partial A_m}{\partial y} \cos(n \wedge y) \right)$, $i_{mz} = \frac{1}{\mu_m} \left(\frac{\partial A_m}{\partial z} \cos(n \wedge z) \right)$, n - единичный вектор, перпендикулярный

поверхности, p - число тетраэдров в расчетном объеме модели, q - число узлов трехмерной сети; $m = 1, 2, \dots, q$.

Расчетное значение для узла

$$[B_m]_r = \begin{bmatrix} a_i & a_j & a_k & a_\ell \\ b_i & b_j & b_k & b_\ell \\ c_i & c_j & c_k & c_\ell \\ d_i & d_j & d_k & d_\ell \end{bmatrix}, \quad [B_m]_r^T = \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i & d_i \\ a_j & b_j & c_j & d_j \\ a_k & b_k & c_k & d_k \\ a_\ell & b_\ell & c_\ell & d_\ell \end{bmatrix}. \quad (3.59)$$

После подстановки (3.59) в (3.58) и преобразования получим:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{12V_e} \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - \frac{1}{6V_e} \times \\
& \times \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 b_i & L_1 b_j & L_1 b_k & L_1 b_\ell \\ L_2 b_i & L_2 b_j & L_2 b_k & L_2 b_\ell \\ L_3 b_i & L_3 b_j & L_3 b_k & L_3 b_\ell \\ L_4 b_\ell & L_4 b_j & L_4 b_k & L_4 b_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dx - \\
& -\mu_0 J \frac{V_e}{12} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2x_i + x_j + x_k + x_\ell \\ x_i + 2x_j + x_k + x_\ell \\ x_i + x_j + 2x_k + x_\ell \\ x_i + x_j + x_k + 2x_\ell \end{bmatrix} = 0, \\
& \frac{1}{12V_e} \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - \frac{1}{6V_e} \times \\
& \times \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 c_i & L_1 c_j & L_1 c_k & L_1 c_\ell \\ L_2 c_i & L_2 c_j & L_2 c_k & L_2 c_\ell \\ L_3 c_i & L_3 c_j & L_3 c_k & L_3 c_\ell \\ L_4 c_\ell & L_4 c_j & L_4 c_k & L_4 c_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dy - \\
& -\mu_0 J \frac{V_e}{12} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2y_i + y_j + y_k + y_\ell \\ y_i + 2y_j + y_k + y_\ell \\ y_i + y_j + 2y_k + y_\ell \\ y_i + y_j + y_k + 2y_\ell \end{bmatrix} = 0, \\
& \frac{1}{12V_e} \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - \frac{1}{6V_e} \times \\
& \times \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 d_i & L_1 d_j & L_1 d_k & L_1 d_\ell \\ L_2 d_i & L_2 d_j & L_2 d_k & L_2 d_\ell \\ L_3 d_i & L_3 d_j & L_3 d_k & L_3 d_\ell \\ L_4 d_\ell & L_4 d_j & L_4 d_k & L_4 d_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dz - \\
& -\mu_0 J \frac{V_e}{12} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2z_i + z_j + z_k + z_\ell \\ z_i + 2z_j + z_k + z_\ell \\ z_i + z_j + 2z_k + z_\ell \\ z_i + z_j + z_k + 2z_\ell \end{bmatrix} = 0.
\end{aligned} \tag{3.60}$$

После сокращения на $\frac{1}{12V_e}$ получим

$$\begin{aligned}
& \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - 2 \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 b_i & L_1 b_j & L_1 b_k & L_1 b_\ell \\ L_2 b_i & L_2 b_j & L_2 b_k & L_2 b_\ell \\ L_3 b_i & L_3 b_j & L_3 b_k & L_3 b_\ell \\ L_4 b_i & L_4 b_j & L_4 b_k & L_4 b_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dx - \\
& -\mu_0 J \frac{V_e}{12} \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2x_i + x_j + x_k + x_\ell \\ x_i + 2x_j + x_k + x_\ell \\ x_i + x_j + 2x_k + x_\ell \\ x_i + x_j + x_k + 2x_\ell \end{bmatrix} = 0, \\
& \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - 2 \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 c_i & L_1 c_j & L_1 c_k & L_1 c_\ell \\ L_2 c_i & L_2 c_j & L_2 c_k & L_2 c_\ell \\ L_3 c_i & L_3 c_j & L_3 c_k & L_3 c_\ell \\ L_4 c_i & L_4 c_j & L_4 c_k & L_4 c_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dy - \quad (3.61) \\
& -\mu_0 J \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2y_i + y_j + y_k + y_\ell \\ y_i + 2y_j + y_k + y_\ell \\ y_i + y_j + 2y_k + y_\ell \\ y_i + y_j + y_k + 2y_\ell \end{bmatrix} = 0, \\
& \sum_{r=1}^p \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{B}_m]_r^T [\mathbf{B}_m]_r \{A_m\}_r - 2 \sum_{r=1}^p \int \frac{1}{\mu_r} \begin{bmatrix} L_1 d_i & L_1 d_j & L_1 d_k & L_1 d_\ell \\ L_2 d_i & L_2 d_j & L_2 d_k & L_2 d_\ell \\ L_3 d_i & L_3 d_j & L_3 d_k & L_3 d_\ell \\ L_4 d_i & L_4 d_j & L_4 d_k & L_4 d_\ell \end{bmatrix} \{A_m\}_r dz - \\
& -\mu_0 J \sum_{r=1}^p \begin{bmatrix} 2z_i + z_j + z_k + z_\ell \\ z_i + 2z_j + z_k + z_\ell \\ z_i + z_j + 2z_k + z_\ell \\ z_i + z_j + z_k + 2z_\ell \end{bmatrix} = 0.
\end{aligned}$$

При составлении глобальной СЛАУ

$$[\mathbf{U}]\{\mathbf{A}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.62)$$

где $\{A\}$ – матрица – столбец узловых значений векторного магнитного потенциала.

Рекуррентные соотношения для формирования глобальной СЛАУ:

$$\begin{aligned}
 u_{ms} &= \frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r1)} b_s^{(r1)} + c_m^{(r1)} c_s^{(r1)} + d_m^{(r1)} d_s^{(r1)} \right) + \\
 &+ \frac{1}{\mu_{r2}} \left(b_m^{(r2)} b_s^{(r2)} + c_m^{(r2)} c_s^{(r2)} + d_m^{(r2)} d_s^{(r2)} \right) + u'_{ms} \\
 u'_{ms} &= h \left[\left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r1)} + b_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(b_m^{(r2)} + b_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge x) + \text{при } m \neq s \quad (3.63) \right. \\
 &\left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(c_m^{(r1)} + c_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(c_m^{(r2)} + c_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge y) + \\
 &\left. \left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(d_m^{(r1)} + d_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(d_m^{(r2)} + d_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge z) \right] \\
 u_{mm} &= \sum_{r=1}^{20} \frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r)} b_m^{(r)} + c_m^{(r)} c_s^{(r)} + d_m^{(r)} d_s^{(r)} \right) + u'_{mm} \\
 u'_{mm} &= h \sum_{r=1}^6 \left(\frac{1}{\mu_r} \left(b_m^{(r)} + b_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge x) + \right. \\
 &\left. + \left(c_m^{(r)} + c_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge y) \right. \\
 &\left. + \left(d_m^{(r)} + d_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge z) \right) \quad \text{при } m = s \quad (3.64)
 \end{aligned}$$

где r_1, r_2 - номера конечных элементов с узлами m и s .

В качестве примера для пояснения структуры глобальной СЛАУ рассмотрим «регулярный элемент» (рис. 3.3, а) на равномерной триангуляционной сети (рис. 3.3, б).

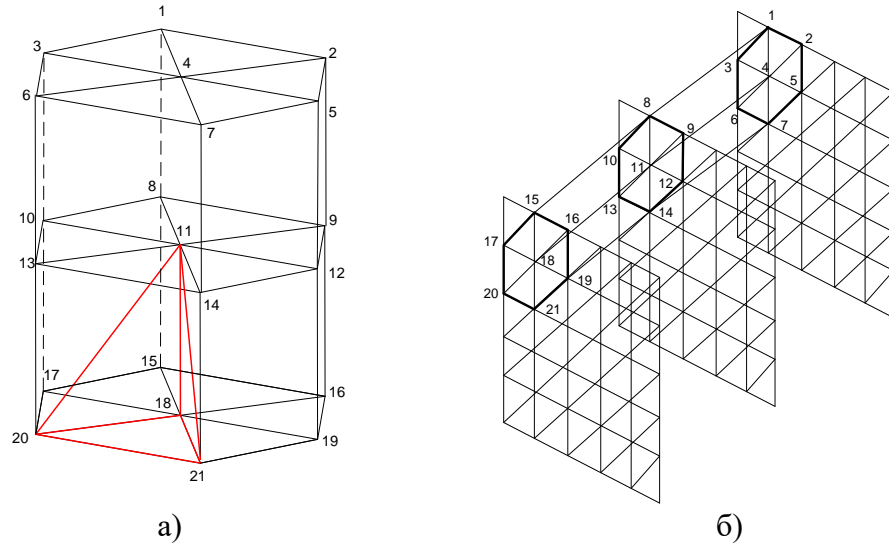


Рис. 3.3. Трехмерный «регулярный элемент» (а) и его расположение в регулярной триангуляционной сети (б)

Запишем уравнение для 11 узла «регулярного элемента»:

$$\begin{aligned}
 & u_{11,10}A_{10} + u_{11,11}A_{11} + u_{11,8}A_8 + u_{11,9}A_9 + u_{11,12}A_{12} + u_{11,13}A_{13} + u_{11,14}A_{14} + \\
 & + u_{11,16}A_{16} + u_{11,18}A_{18} + u_{11,15}A_{15} + u_{11,19}A_{19} + u_{11,21}A_{21} + u_{11,20}A_{20} + \\
 & + u_{11,17}A_{17} + u_{11,3}A_3 + u_{11,4}A_4 + u_{11,6}A_6 + u_{11,7}A_7 + u_{11,5}A_5 + \\
 & + u_{11,2}A_2 + u_{11,1}A_1 = F_{11}
 \end{aligned} \tag{3.65}$$

Из уравнения (3.65) видно, что решением глобальной СЛАУ при заданных граничных и начальных условиях являются значения векторного магнитного потенциала $\{A_m\}$ в узлах триангуляционной сети, представленной на рис. 3.3.

Программная реализация предложенного метода расчета трехмерного поля выполнена на языке Java для тестовой задачи, приведенной на рис. 3.4.

Результаты расчета в нейтральном сечении магнита приведены на рис. 3.5.

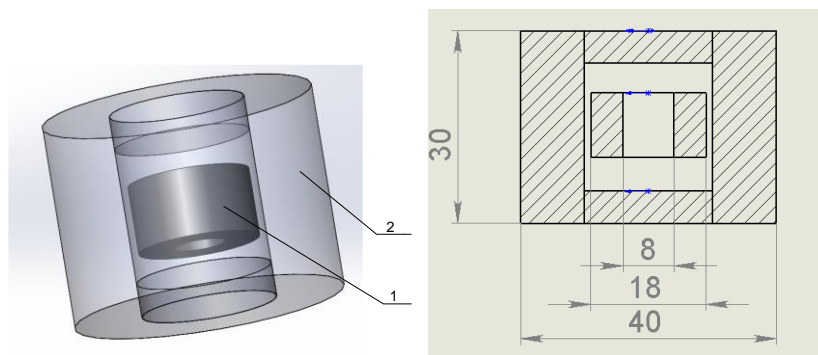


Рис. 3.4. Внешний вид тестовой магнитной системы: 1 – постоянный магнит, 2- стальной магнитопровод.

В качестве решателя СЛАУ использовался открытый параллельный код метода Гаусса [193].

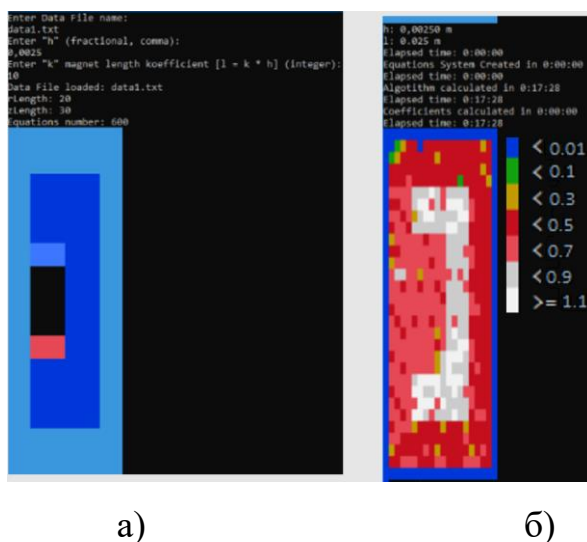


Рис. 3.5. Представление магнитной системы в расчетной области (а) и результат расчета.

Следовательно, предлагаемый метод формирования глобальной СЛАУ может быть алгоритмизирован и на его основе может быть выполнена программная реализация.

3.3. Методика идентификации параметров высококоэрцитивных постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности.

При изготовлении электротехнических комплексов с ПМ часто возникает необходимость проведения процедуры идентификации постоянных магнитов. Как правило, эта процедура проводится перед установкой постоянных магнитов, имеющих одинаковую геометрию и форму, изготовленных из одной и той же марки сплава, в рабочий узел электротехнического устройства [37, 42, 217]. Традиционный метод идентификации с одновременной отбраковкой постоянных магнитов в опытной партии сводится к измерению магнитной индукции на поверхности полюса постоянного магнита и при удалении от него на разные расстояния датчиком Холла [18], входящего в комплект поставки миллитесламетра. При этом используемая процедура идентификации ПМ имеет ряд существенных недостатков обусловленных локальностью результатов измерений магнитной индукции в отдельных точках на поверхности полюса постоянного магнита и за его пределами. Известно, что магнитное поле постоянного магнита не является однородным, при этом на результаты измерений магнитной индукции на поверхности полюса постоянных магнитов разных конфигураций и размеров могут оказывать существенное влияние геометрические размеры самого датчика Холла. Исключение процедуры идентификации постоянных магнитов перед их установкой в узел того или иного электротехнического устройства сопровождается негативными последствиями. Например, при создании индуктора синхронной электрической машины с использованием постоянных магнитов, как указывалось ранее, наблюдается биение вала, повышенная вибрация подвижных частей, отклонение от заданных техническими условиями энергетических показателей работы изделия.

Научный и практический интерес представляет задача разработки методики идентификации опытных образцов постоянных магнитов,

основанная на удовлетворении их критерию одинаковой объемной намагниченности, которая учитывается среднеквадратичным отклонением экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими опытными образцами постоянных магнитов (для каждого в отдельности) с магнитным отражателем.

Объектами проводимого исследования являлись две группы ПМ, изготовленных из сплава неодим-железо-бор (NdFeB) марки N38 с параметрами: остаточной индукцией 1,2 Тл, коэрцитивной силой 955 кА/м, магнитной энергией 300 кДж/м.

Устройство для определения намагниченности постоянных магнитов в виде испытательного стенда (рис. 3.6) включает в себя основание стенда 1, настольные электронные весы 2, светодиодный дисплей с сенсорными кнопками управления 3, стальную стойку, закрепленную в основании стенда 4, контейнер из немагнитного материала, внутри которого перемещается опытный образец постоянного магнита 5, имеющий вертикальную прорезь для визуализации зазора между взаимодействующими объектами, опытный образец постоянного магнита 6, магнитный отражатель для противодействия сближению с опытным образцом постоянного магнита 7, 8 –линейку из немагнитного материала, подставку с направляющей 9, обеспечивающей устойчивость контейнера и равномерное распределение силовой нагрузки на платформу весов, подвижный шток в виде стального сердечника 10, предназначенный для закрепления опытного образца постоянного магнита внутри контейнера и осевой центровки приложения внешнего усилия, регулировочный винт для изменения зазора между взаимодействующими объектами 11. В зависимости от формы и заявленных магнитных свойств опытного образца постоянного магнита 6 выбирается магнитный отражатель 7, а также форма и размер немагнитного контейнера [103, 105].

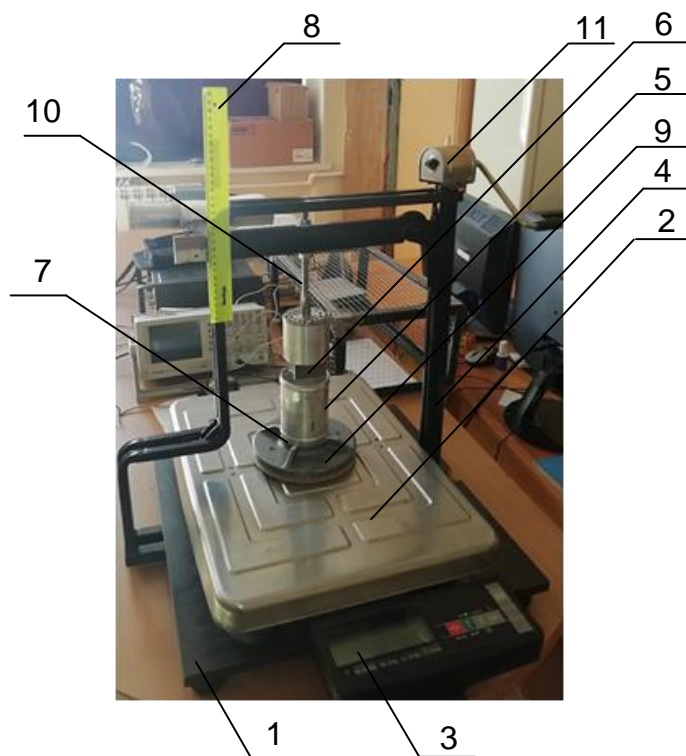


Рис. 3.6. Испытательный стенд для исследования постоянных магнитов 50x50x25 мм.

Методика идентификации опытных образцов высококоэрцитивных постоянных магнитов сводится к выполнению последовательности следующих шагов:

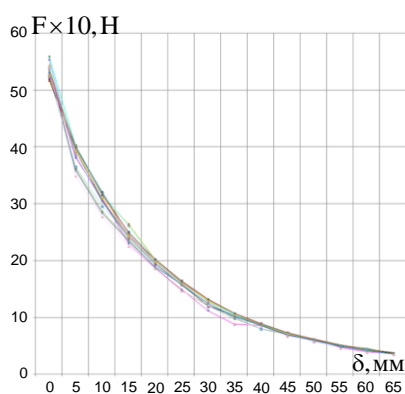
- осмотр постоянных магнитов на наличие дефектов;
- формирование группы испытуемых образцов постоянных магнитов с присвоением порядкового номера, имеющих одинаковую геометрию, форму и марку сплава NdFeB;
- измерение магнитной индукции на поверхности полюсов испытуемых образцов постоянных магнитов датчиком Холла с помощью цифрового миллитесламетра исполнения ТПУ;
- установка цилиндрического контейнера вместе с испытуемым образцом постоянного магнита и магнитным отражателем на платформу настольных электронных весов с фиксацией массы установленного оборудования (тары);

– калибровка весов, таким образом, чтобы компенсировать установленную на платформе массу;

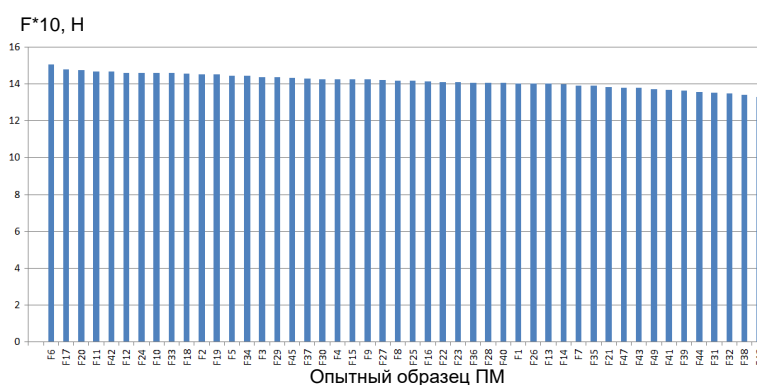
– измерение электромагнитной силы взаимодействия опытного образца постоянного магнита и магнитного отражателя при различных расстояниях между ними, устанавливаемого вращением ручки регулировочного винта, передающим внешнее усилие на испытуемый образец постоянного магнита;

– построение экспериментальных кривых электромагнитной силы взаимодействия испытуемых образцов постоянных магнитов в зависимости от расстояния до магнитного отражателя;

– расчет среднеквадратичных отклонений экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими испытуемыми образцами постоянных магнитов и магнитным отражателем.



а)



б)

Рис. 3.7. Экспериментальные кривые зависимости электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими объектами (прямоугольная призма 50x50x25) (а); среднеквадратичное отклонение электромагнитной силы опытных образцов ПМ (б).

Разработанная методика идентификации постоянных магнитов на испытательном стенде косвенно учитывает объемную намагниченность

опытных образцов постоянных магнитов по магнитной силе отталкивания их от магнитного отражателя на различных расстояниях между ними.

Установлено, что ПМ в каждой опытной партии имеют существенные отклонения по рассмотренным показателям, характеризующим их магнитные свойства, достигающим 15%, что может отразиться на работоспособности создаваемых с их применением ВЭТК.

Результаты расчета, представленные на рис. 3.7 используются для выбора постоянных магнитов в систему линейного двигателя для привода поршневого компрессора.

3.4. Выводы

1. Развитие теории расчета магнитного поля СМПМ путем внедрения трехмерного «регулярного элемента» позволяет максимально автоматизировать процесс составления глобальной СЛАУ в проекционно-сеточном методе Галеркина в сочетании с МКЭ, минуя этап построения элементных систем уравнений.

2. Получены рекуррентные соотношения для формирования численного проекционно-сеточного алгоритма осесимметричной и трехмерной модели магнитного поля, которые могут быть использованы для СМПМ в составе ВЭТК на основе решения системы Лапласа-Пуассона относительно функции магнитного потока (2D) и векторного магнитного потенциала (3D).

3. Разработанная математическая модель трехмерного магнитного поля позволяет выполнить ее программную реализацию на ПК и провести на основе исследования магнитного поля уточняющий расчет параметров СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП.

4. Предложенный метод расчета трехмерных магнитных полей может использоваться самостоятельно для исследования магнитоэлектрических устройств, не имеющих осевой симметрии.

5. Предложена методика идентификации ПМ по критерию одинаковой объемной намагниченности, обеспечивающая качественный отбор опытных образцов постоянных магнитов на основе РЗМ для создания тихоходных СМПМ.

6. Установлено, что ПМ на основе РЗМ в опытной партии имеют существенные отклонения по критерию одинаковой объемной намагниченности, характеризующей их магнитные свойства, достигающие 15%, что может отразиться на работоспособности создаваемых с их помощью электромагнитных систем.

ГЛАВА 4. ТИХОХОДНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ В СОСТАВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

4.1. Синхронные генераторы модульного типа: конструкция, моделирование и экспериментальное исследование эксплуатационных и аварийных режимов

Основными критериями, которыми следует руководствоваться для оптимального выбора конструкций СГПМ, являются: незначительный пусковой момент, самостоятельный старт синхронного генератора при малых ветрах, низкий уровень автоколебаний, ограничение частоты вращения ротора, технологичность изготовления конструкции, монтажа, ремонта и обслуживания синхронного генератора, повышение надежности, удельных энергетических показателей, снижение габаритов и массы активных материалов по сравнению с конструкциями прототипов.

Указанным критериям в модельном ряду ВЭУ мощностью 0,1–100 кВт соответствуют конструкции тихоходных СГПМ, предложенные в патентах на изобретение [92–94, 100; 101].

На основе результатов расчетов оптимальной геометрии магнитной системы модульного СГПМ разработана базовая конструкция, состоящая из 6 пар полюсов (12 постоянных магнитов) и 8 электромагнитов. Магнитная система опытного образца тихоходного СГПМ модульного типа показана на рис. 4.1, а внешний вид макетного образца – на рис. 4.2. Методика оптимального проектирования СГПМ приведена в Приложении 4 [114, 147].

Электромагниты СГПМ представляют собой независимые модули, в обмотке которых наводится ЭДС при вращении ротора с постоянными магнитами.

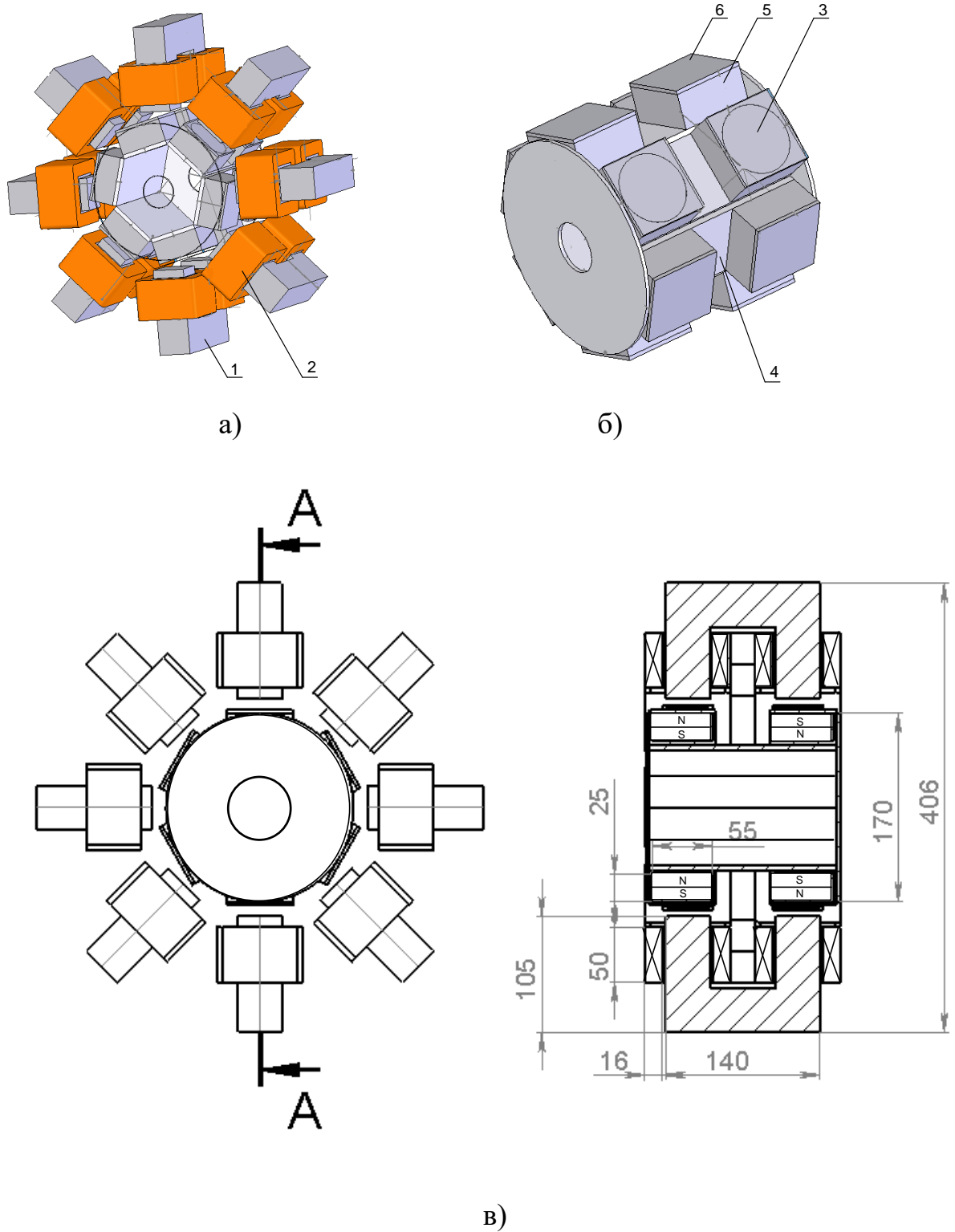


Рис. 4.1. Магнитная система тихоходного СГПМ модульного типа в собранном виде (а) и конструкция ротора/индуктора (б), конструкция (в).

Статор тихоходного СГПМ содержит электромагниты, каждый из которых имеет П-образный шихтованным магнитопровод (1) и снабжен двумя

катушками (2). Ротор СГПМ (подвижная часть) с постоянными магнитами представляет собой индуктор. На роторе находятся двенадцать постоянных магнитов (3) с продольно-поперечной чередующейся полярностью, которые размещены в алюминиевых стаканах (5), снабженных крышками (6). Для создания замкнутого магнитного потока от двух постоянных магнитов, расположенных один под другим, алюминиевые стаканы объединены стальной пластиной (4) [92, 100, 101].

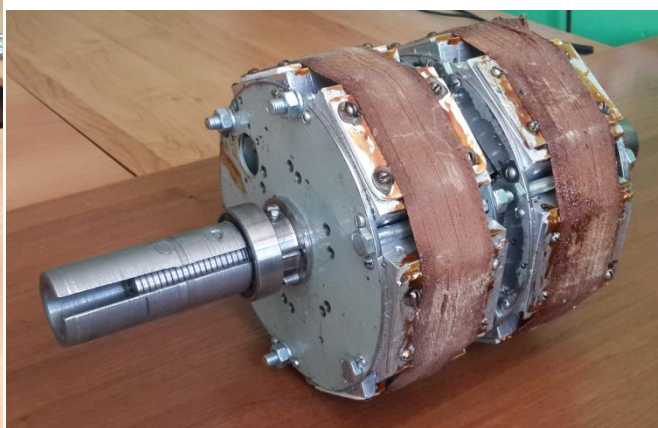
Представленная конструкция СГПМ обладает рядом преимуществ по сравнению с конструкциями генераторов, имеющих общий цилиндрический магнитопровод:

- закон изменения ЭДС в обмотке синусоидальный и частота совпадает с частотой вращения ротора;
- независимость отдельных модулей определяет возможность различных схем соединения их обмоток с целью регулирования напряжения, уменьшения пускового момента;
- возможность регулирования зазора между статором и ротором СГПМ в зависимости от характера нагрузки, скорости вращения ротора с целью снижения реакции якоря;
- высокая технологичность сборки, ремонтпригодность обуславливают высокую надежность ветроэнергетической установки в целом.

Исследуемый образец предложенной конструкции тихоходного СГПМ характеризуется следующими параметрами: номинальная мощность $S_H = 500 \text{ ВА}$, номинальное напряжение на зажимах обмотки якоря $U_H = 220 \text{ В}$, номинальная частота вращения $n = 400 \text{ об/мин}$, номинальная частота тока $f = 20 \text{ Гц}$, число фаз $m=1$, число пар полюсов $p=3$, число электромагнитов с П-образным шихтованным магнитопроводом $N=8$. Обмотка выполнена проводом ПЭТВ-2.



а)



б)



в)

Рис. 4.2. Макетный образец СГПМ модульного типа: а) статор, б) ротор, в) СГПМ в сборе.

На каждом сердечнике электромагнита находятся две катушки с числом витков $W = 300$. В конструкции СГПМ используются высококоэрцитивные постоянные магниты, изготовленные из сплава NdFeB марки N = 38 в форме диска диаметром 55 мм и высотой 25 мм, имеющие аксиальное направление намагничивания, остаточную индукцию $B_r = 1.2$ Тл, коэрцитивную силу $H_c = 955$ кА/м и магнитную энергию $W_{H_{max}} \approx 300$ кДж/м³. Удельное сопротивление и плотность материала постоянного магнита равны соответственно $\rho_M = 1.4 - 1.45$ Ом·м, $\gamma_M = 7500$ кг/м³.

Используя решение задачи оптимизации по максимуму удельной полной мощности СГПМ модульного типа на предварительном этапе проектирования разработана методика расчета главных размеров его магнитной системы (Приложение 4).

Распределение магнитного поля в магнитной системе тихоходного СГПМ оказывает существенное влияние на значение ЭДС в витках катушек электромагнитов и реакцию якоря. В связи с этим целесообразным является проведение математического моделирования магнитной системы тихоходного СГПМ на ПК с использованием программного пакета ANSYS/Maxwell 16.0. [139, 140, 142]. На рис. 4.3 представлена модель магнитной системы СГПМ модульного типа в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0.

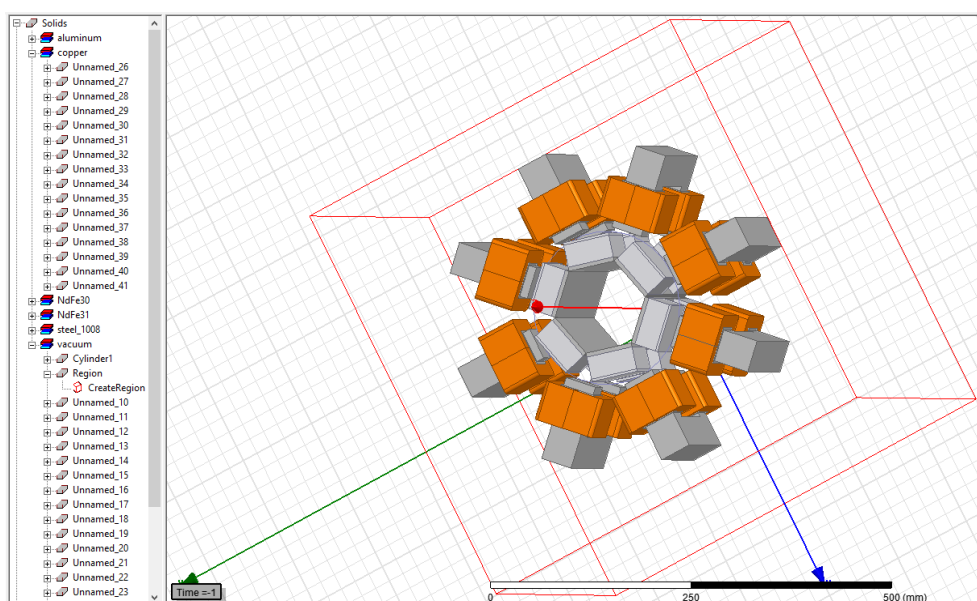


Рис. 4.3. Модель тихоходного СГПМ модульного типа в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0.

В качестве исходных данных для расчета магнитного поля использовались геометрические размеры магнитной системы исследуемой конструкции СГПМ. Коэффициент заполнения по меди равен 0,4. Скорость вращения ротора в модели принята 400 об/мин. На этапе подготовке модели принято, что обмотка якоря СГПМ состоит из 16 последовательно соединенных катушек, расположенных на сердечниках электромагнитов. При этом мгновенное значение ЭДС обмотки якоря равна сумме мгновенных значений ЭДС,

индуктируемых в катушках электромагнитов. Последовательное соединение катушек электромагнитов выполнено в программном модуле ANSYS Maxwell 16.0 Circuit Editor (рис. 4.4).

Имитационная модель в ANSYS Maxwell 16.0 обладает следующими допущениями и особенностями:

- тип решения (Solution Type) в ANSYS Maxwell 16.0 выбран переходный процесс (Transient). Этот тип решения используется при расчете динамических характеристик модели;
- расчетная область ограничена объемом, значение векторного магнитного потенциала на границе которого принято равным нулю;
- электромагнитное поле нестационарное и не обладает симметрией;
- в виду отсутствия симметрии в расчетной области представлена полная трехмерная твердотельная модель СГПМ (модель импортирована из SolidWorks 2017);
- обмотки с током представлены в виде параллелепипедов со скругленными боковыми ребрами и имеющими вырез для закрепления на П-образном магнитопроводе;
- относительная магнитная проницаемость шихтованных из электротехнической стали П-образных магнитопроводов определяется в соответствии с кривой намагничивания;
- рассматривается установившийся режим вращения индуктора с постоянной угловой скоростью;
- объемная намагниченность постоянных магнитов одинаковая;
- для задания граничных условий трехмерная модель СГПМ помещена в параллелепипед (Region), размер которого по осям x , y , z превышает размер модели в 2 раза;

- на внешней поверхности моделируемой области модели Region принято граничное условие – тангенциальная составляющая функции магнитного потока Φ_τ равна нулю.

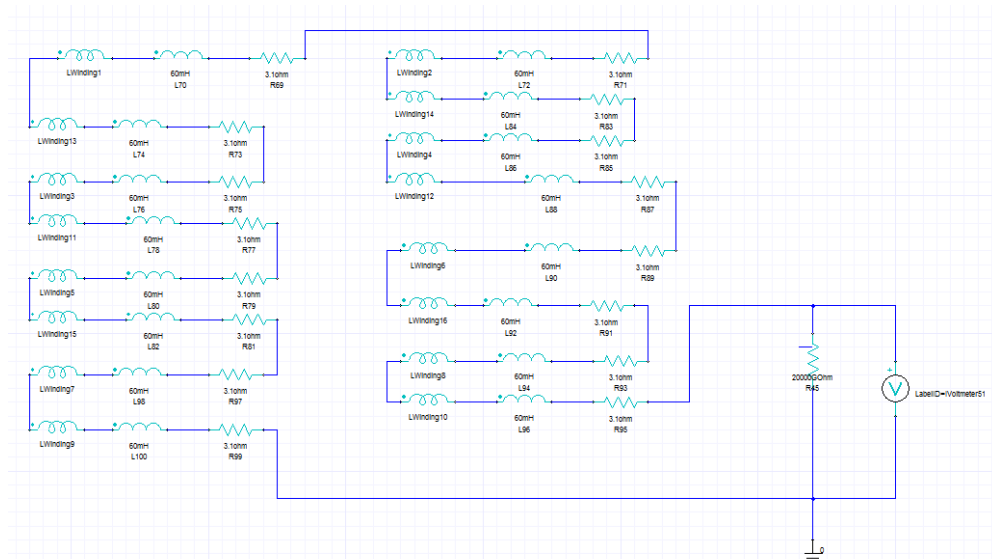
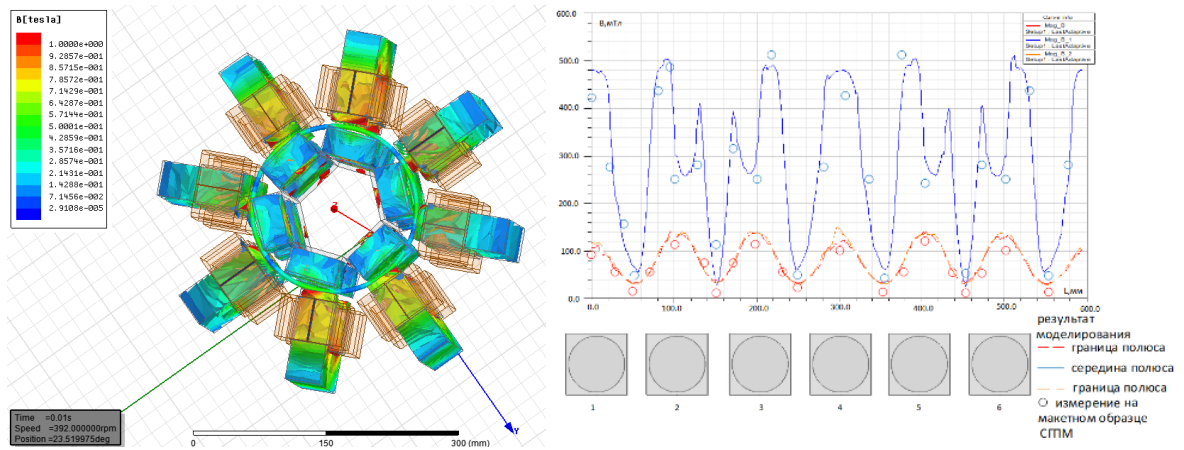


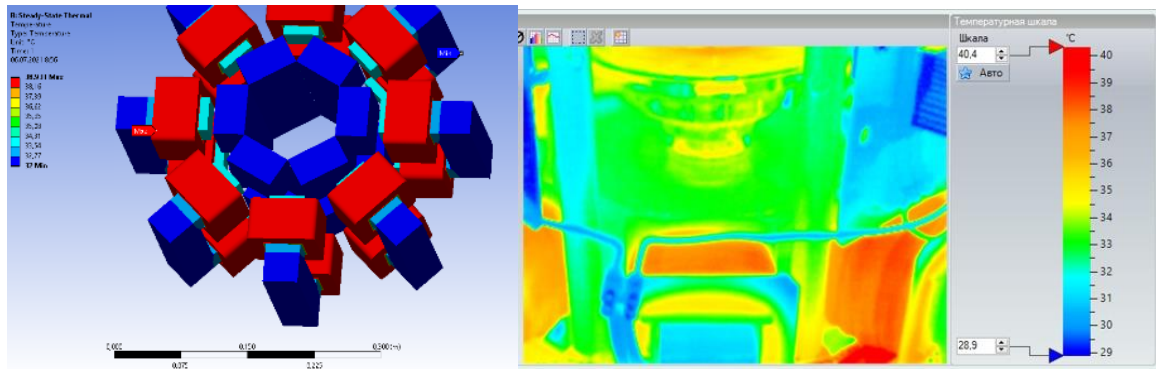
Рис. 4.4. Схема соединения обмотки якоря тихоходного СГПМ модульного типа.

Результаты математического моделирования предложенной конструкции тихоходного СГПМ в программном обеспечении ANSYS Maxwell 2019 R3 (рис. 4.5) сопоставлены с результатами экспериментального исследования его опытного образца на испытательном стенде. На стенде регулирование угловой скорости вращения вала тихоходного СГПМ осуществлялось с помощью частотного управления асинхронным двигателем, вал которого связан с валом синхронного генератора втулочной муфтой. Измерение скорости вращения вала производилось цифровым контактным тахометром. Снятие временных диаграмм напряжений на выводах обмотки якоря СГПМ и резистивном датчике тока сопротивлением $R_{III} = 1 \text{ Ом}$ выполнено с помощью двухканального USB осциллографа, работающего в режиме самописца и щупом для осциллографа с делителем 1:10.



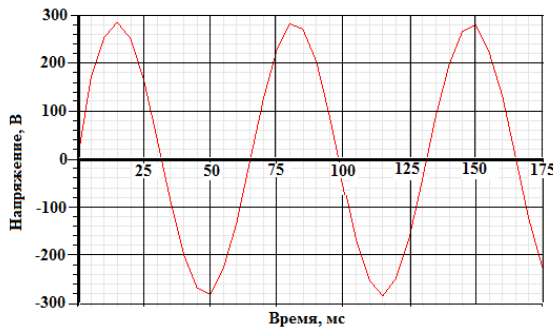
а)

б)

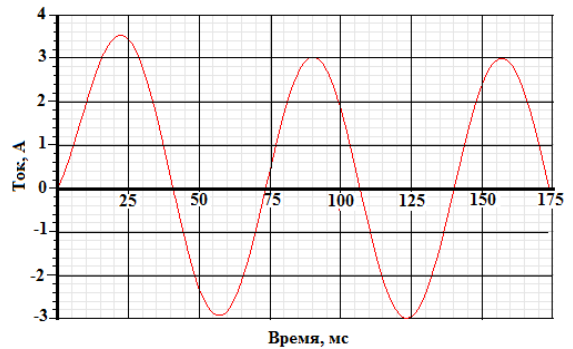


в)

г)



д)



е)

Рис. 4.5. Результаты расчета имитационной модели (а, в, д, е) и

экспериментального исследования СГПМ модульного типа (б, г):

а, б – распределение магнитной индукции; в, г – температура отдельных элементов магнитной системы (моделирование и тепловизионная съемка);

д, е – расчетные временные зависимости напряжения на обмотке якоря в режиме холостого хода и тока в режиме внезапного короткого замыкания.

Обеспечение заданной скорости вращения индуктора СГПМ осуществляется приводным асинхронным двигателем при помощи преобразователя частоты. Скорость вращения во всех режимах испытаний СГПМ поддерживалась 400 об/мин. Экспериментальные временные зависимости напряжения и тока в обмотке якоря СГПМ в режимах холостого хода и короткого замыкания показаны на рис. 4.6.

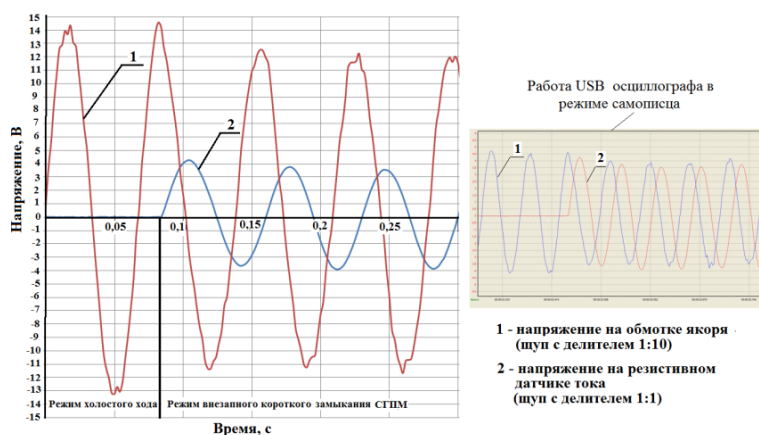


Рис. 4.6. Осциллограммы напряжений одной половины обмотки якоря и напряжения на резистивном датчике тока в режиме холостого хода и внезапного короткого замыкания СГПМ.

Сопоставление результатов экспериментального исследования осциллограмм и математического моделирования СГПМ модульного типа при холостом ходе, под нагрузкой путем изменения сопротивления $R_{нагр}$ нагрузочного реостата и коротком замыкании показано на рис. 4.7.

Внешние характеристики СГПМ модульного типа, полученные в результате имитационного моделирования и экспериментального исследования показаны на рис. 4.8.

Расхождение результатов моделирования и эксперимента находится в пределах допустимой погрешности (среднеквадратичное отклонение в относительных единицах составляет менее пяти процентов).

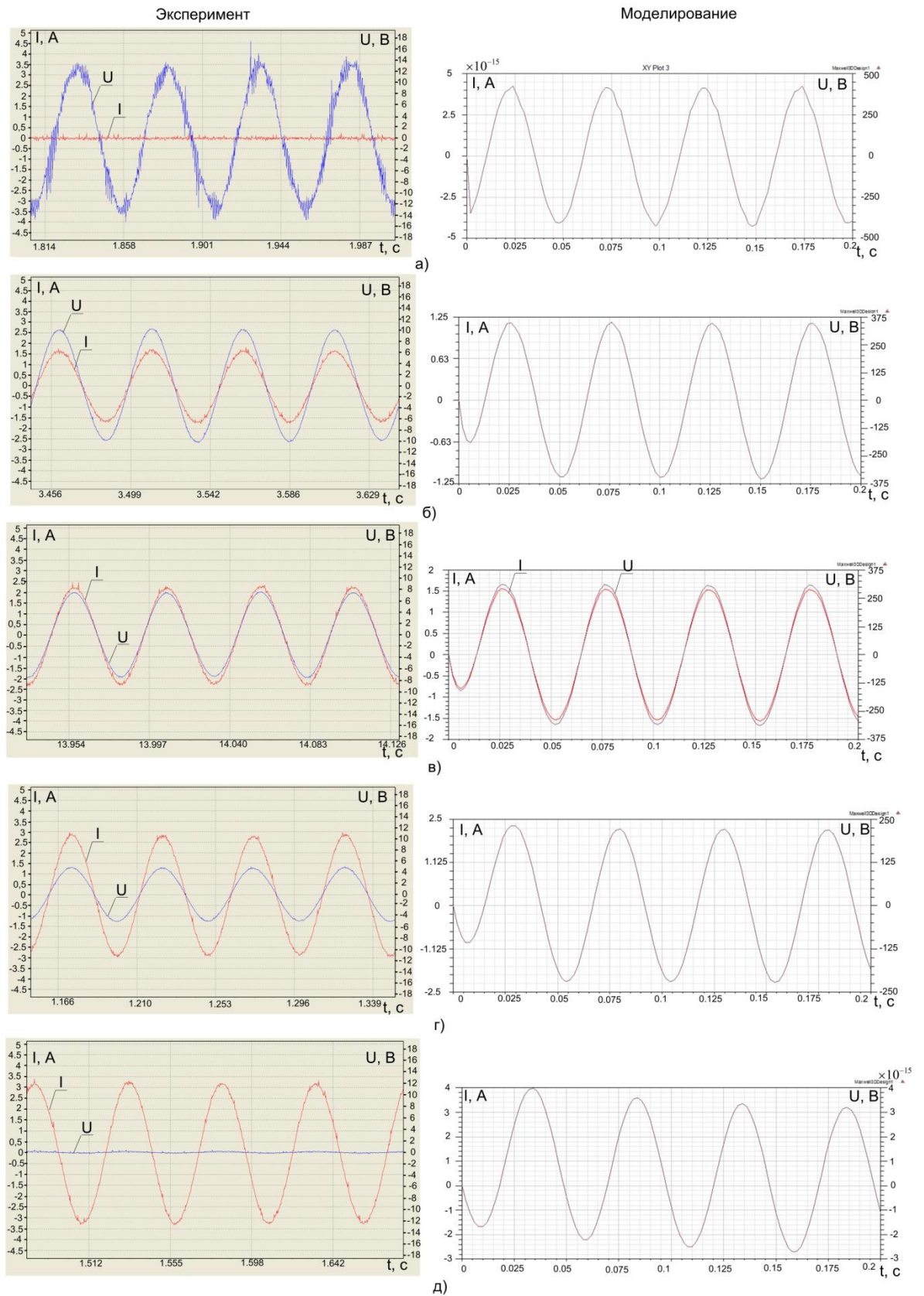


Рис. 4.7. Осциллограммы экспериментальных испытаний и имитационного моделирования СГПМ: а – холостой ход, б – $R_{нагр} = 300 \text{ Ом}$; в – $R_{нагр} = 200 \text{ Ом}$; г – $R_{нагр} = 100 \text{ Ом}$; д – короткое замыкание.

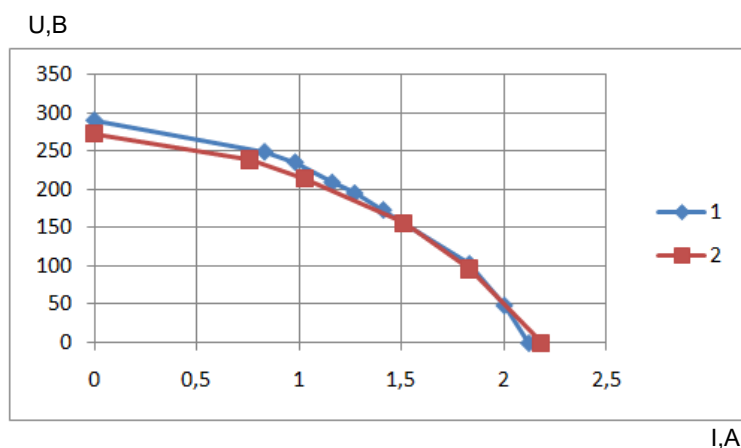


Рис. 4.8. Исследование тихоходного СГПМ модульного типа:
1- результаты моделирования; 2- результаты эксперимента.

Указанное обстоятельство делает возможным проведение дальнейших исследований по влиянию конструктивных особенностей СГПМ модульного

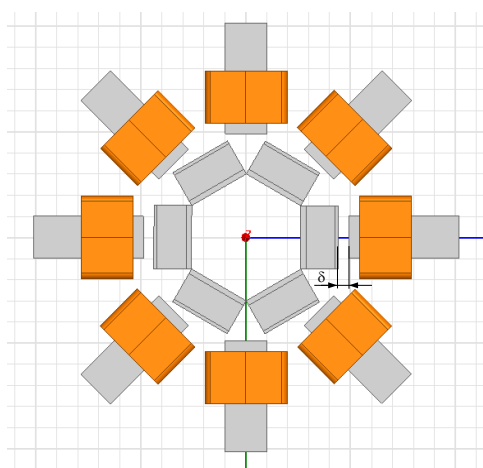


Рис. 4.9. Изменение величины воздушного зазора между индуктором и якорем на имитационной модели СГПМ модульного типа.

типа на энергетические характеристики электротехнического комплекса в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0 на имитационной модели.

Варьирование величины зазора δ между индуктором и якорем на имитационной модели СГПМ модульного типа показано на рис. 4.9. Величина зазора изменялась от 10 до 20 мм с шагом 5 мм.

На рис. 4.10 представлены внешние характеристика СГПМ модульного типа при различных значениях воздушного зазора.

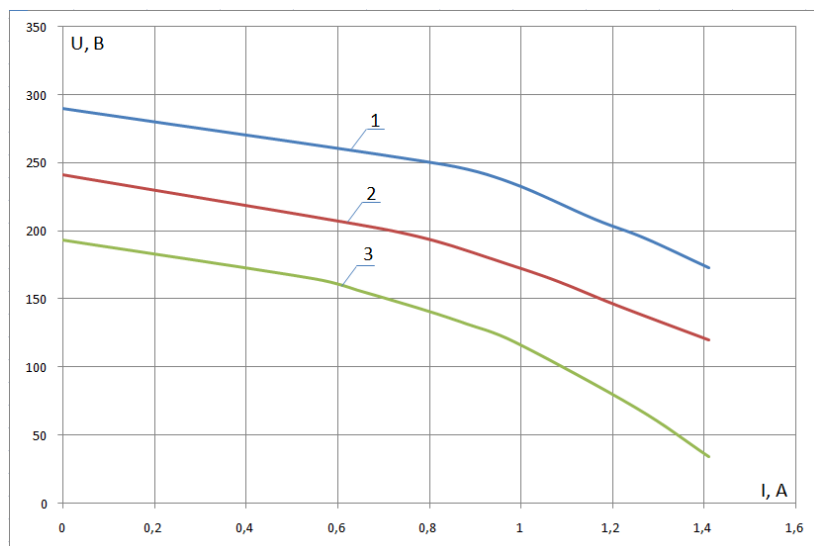


Рис. 4.10. Внешняя характеристика СГПМ при различной величине воздушного зазора: 1 - 10 мм; 2 - 15 мм; 3 - 20 мм

Зависимость полной мощности СГПМ модульного типа от величины воздушного зазора приведена на рис. 4.11.

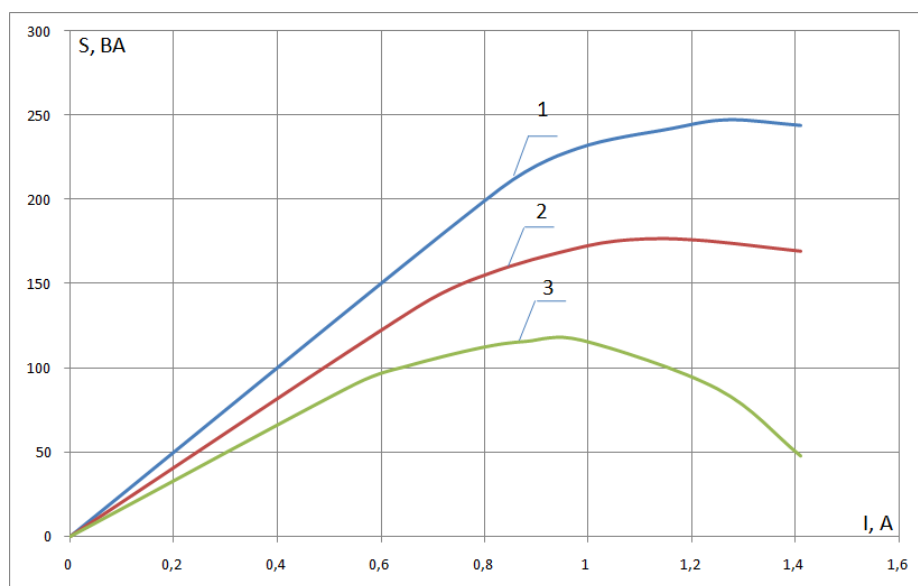
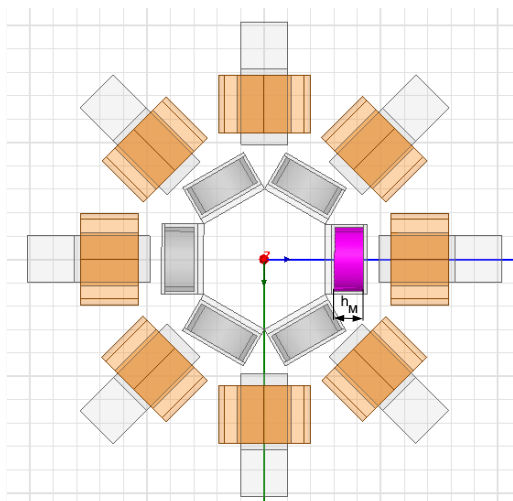


Рис. 4.11 Полная мощность СГПМ в зависимости от величины воздушного зазора и тока нагрузки: 1 - 10 мм; 2 - 15 мм; 3 - 20 мм.

Анализ полученных результатов моделирования указывает, что величина воздушного зазора существенно влияет на энергетические характеристики СГПМ и электротехнического комплекса в целом. Увеличение воздушного зазора более чем в два раза приводит к уменьшению жесткости внешней

характеристики генератора, снижению напряжения на выходе СГПМ и мощности более чем на 60%. Необходимо отметить, что уменьшение воздушного зазора приведет к увеличению индукции в зазоре, однако, вместе с тем возрастет реакция якоря, а также начнут более остро проявляться вибрации, связанные с различной объемной намагниченностью постоянных магнитов.

Таким образом, уменьшение воздушного зазора не является очевидным решением оптимизации магнитной системы СГПМ, что делает задачу поиска соотношения величины воздушного к высоте постоянного магнита во многом исследовательской, связанной с определением максимальной энергии отдаваемой постоянным магнитом.



На рис. 4.12 показано изменение высоты постоянного магнита на имитационной модели СГПМ модульного типа.

Изменение высоты постоянного магнита проведем в имитационной модели для следующих значений высоты постоянного магнита h_M : 25 мм, 20 мм, 15 мм, 10 мм, 5 мм.

Исследование влияния высоты постоянного магнита СГПМ модульного типа на внешнюю характеристику и полную мощность показано на рис. 4.13.

Результаты моделирования магнитной системы СГПМ с различной высотой магнита указывают на значительные ухудшения энергетических параметров при уменьшении высоты постоянного магнита более чем на 40 %, при этом уменьшение высоты магнита до указанного значения приводит к незначительному снижению выходных характеристик СГПМ и может быть скомпенсировано за счет других факторов, например, увеличения числа ампервитков катушек или уменьшения воздушного зазора.

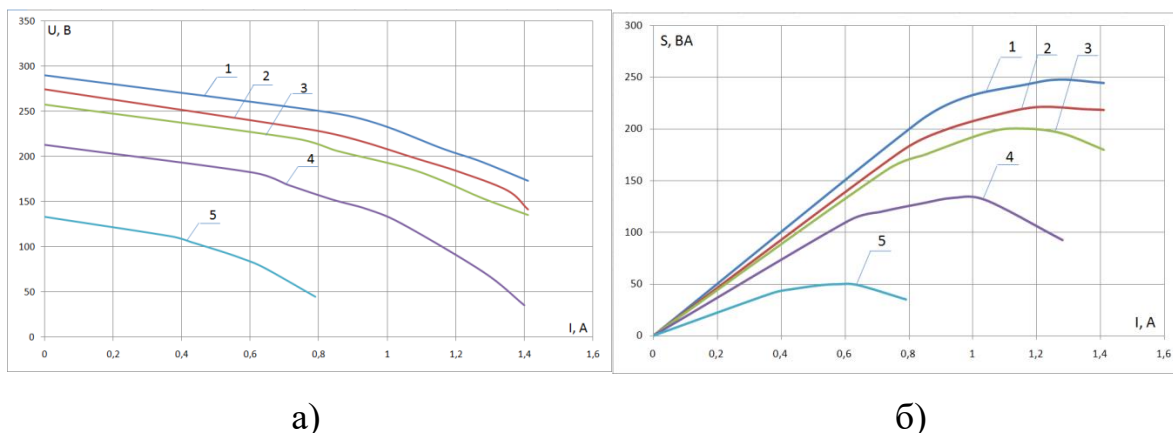


Рис. 4.13. Внешняя характеристика (а) и мощность на выходе СГПМ модульного типа при различной высоте постоянного магнита: 1 - 25 мм; 2 - 20 мм; 3 - 15 мм; 4 - 10 мм; 5 - 5 мм.

Расчет потерь в независимых магнитопроводах СМПМ модульного типа выполнен с использованием разработанной имитационной модели. Коэффициенты учитывающие потери от вихревых токов k_B , от перемагничивания k_T , дополнительных $k_{доп}$ рассчитываются в соответствии с методикой приведенной в [216]. Расчет коэффициентов потерь выполнен на основе характеристик стали магнитопровода (рис. 4.14). Результаты расчета потерь приведены на рис. 4.15.

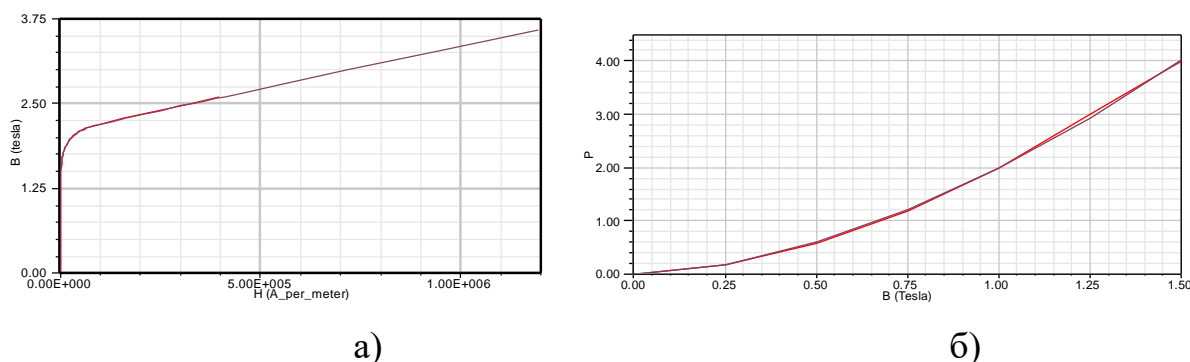


Рис. 4.14. Основная кривая намагничивания и кривая потерь для стали 2211.

Расчетные значения коэффициентов для частоты 50 Гц и толщине стальной пластины 0.6 мм: $k_B = 2.36$; $k_T = 17.88$; $k_{\text{доп}} = 25.38$.

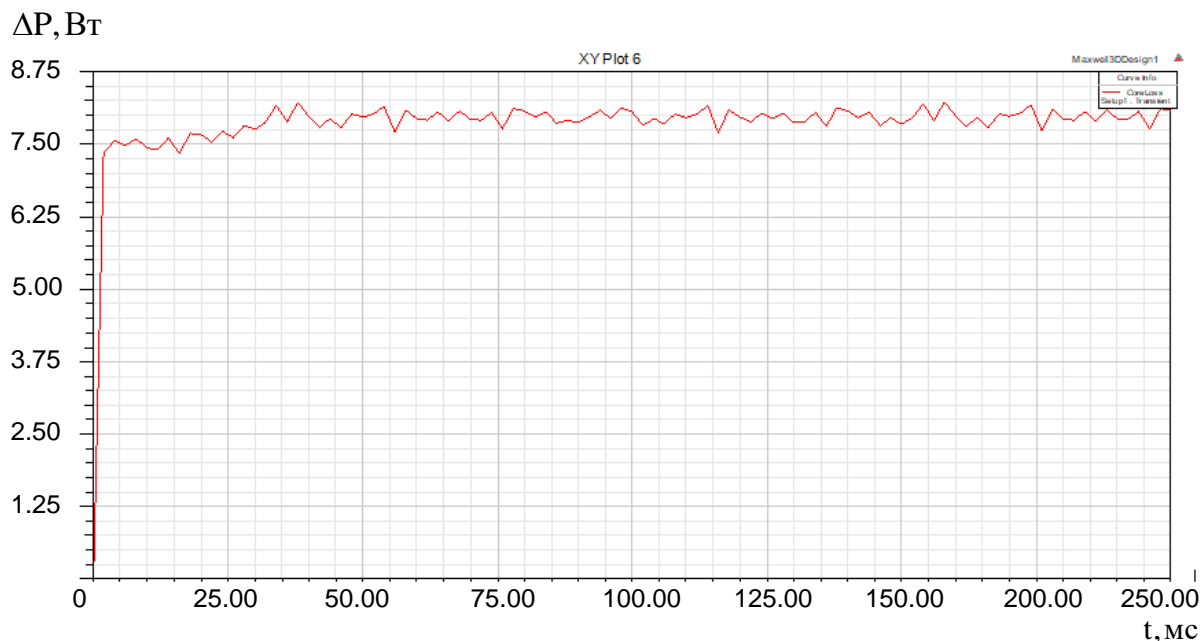


Рис. 4.15. Значение потерь в магнитопроводе с учетом перемагничивания и влияния вихревых токов.

Следовательно, при номинальной скорости вращения СГПМ модульного типа суммарные потери в стальных деталях конструкции магнитной системы не превышают 1.5% от установленной мощности.

4.2. Синхронные генераторы с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ветроэнергетических установок: конструкция, моделирование и экспериментальное исследование.

В настоящее время в ВЭУ малой мощности широко применяются СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом [19, 152]. Типовыми техническими решениями при их проектировании являются увеличение числа полюсов синхронного генератора, использование редуктора для увеличения скорости вращения, увеличение лопасти ветроколеса. Вместе с тем, прогресс в

области создания высококоэрцитивных постоянных магнитов обуславливает научный интерес по улучшению пусковых и эксплуатационных режимов синхронных генераторов [52, 108, 171, 211].

Среди многих конструкций СГПМ можно выделить класс СГПМ построенных на базе асинхронных электрических машин переменного тока. Хорошо проработанные методики исследования и надежные технологии изготовления обуславливают удобство применения асинхронных электрических машин переменного тока в качестве базовой магнитной системы синхронного генератора.

Задача расчета плоскопараллельного магнитного поля синхронного генератора сводится к решению уравнений нелинейной магнитостатики относительно векторного магнитного потенциала.

Статор рассматриваемого СГПМ содержит типичный для электрической машины цилиндрический пакет на основе асинхронного двигателя 5АИ90L6У2, набранный из листов электротехнической стали, на внутренней поверхности которого расположены пазы для размещения обмотки якоря. Вместо короткозамкнутого ротора используется ферромагнитный цилиндр с размещенными на нем постоянными магнитами [95, 96].

Основные параметры СГПМ, необходимые для расчета магнитного поля, приведены в таблице 4.1.

На рис. 4.16 представлена конструкция магнитной системы синхронного генератора в форме имитационной модели. Магнитная система синхронного генератора состоит из неподвижного статора 1, подвижный индуктор 2, на котором закреплены постоянные магниты 3, в пазах 4 расположена трехфазная обмотка 5. Имитационное моделирование синхронного генератора выполнено в режимах холостого хода, внезапного короткого замыкания, при значениях активной нагрузки сопротивлением 23 Ом, 5 Ом, 0.5 Ом.

Основные параметры СГПМ с общим магнитопроводом

Параметры	Величина
Номинальная мощность P_n , кВт	1.0
Номинальное напряжение U_n , В	220
Номинальный ток I_n , А	4,5
Частота вращения n , об/мин	500
Внешний диаметр статора D_a , мм	133
Внутренний диаметр статора D_i , мм	90
Длина статора $L_{ст}$, мм	155
Число пазов Z_1	36
Полюсное деление τ	9
Число параллельных ветвей a	1
Число пазов на полюс и фазу q	2
Число пар полюсов $2p$	6

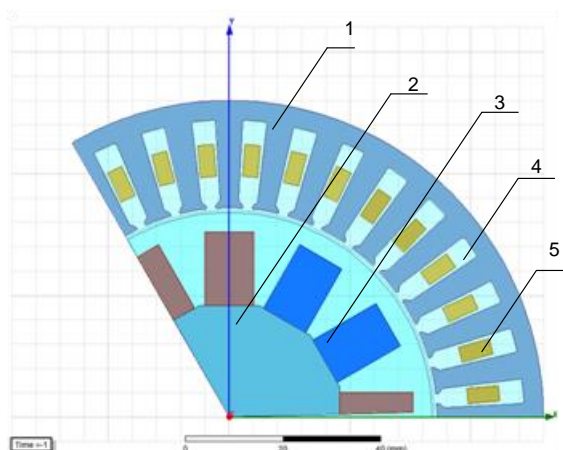


Рис. 4.16. Конструкция магнитной системы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в программном обеспечении ANSYS Maxwell 2016.

Разработанный макетный образец СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом приведен на рис. 4.17. Экспериментальное исследование СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом проведено, на испытательном стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 4.18

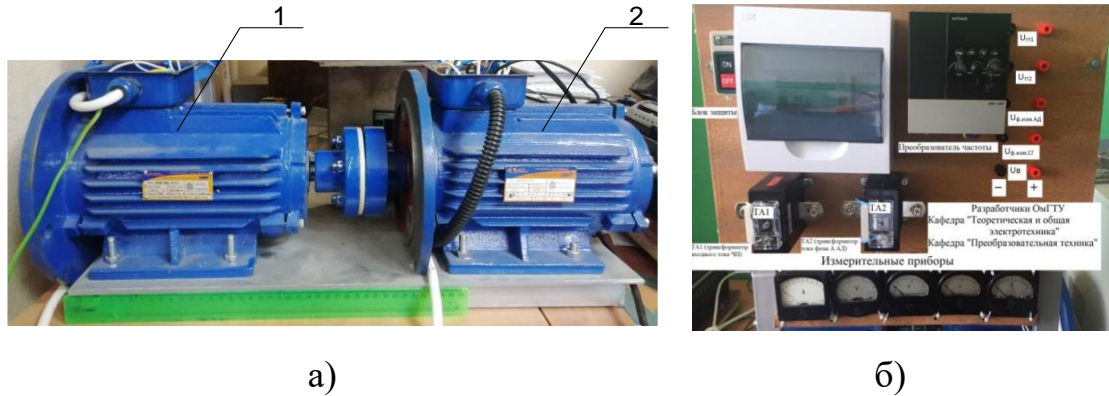


Рис. 4.17 Приводной двигатель (1) и макетный образец СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (2) (а), стенд для испытания СГПМ (б).

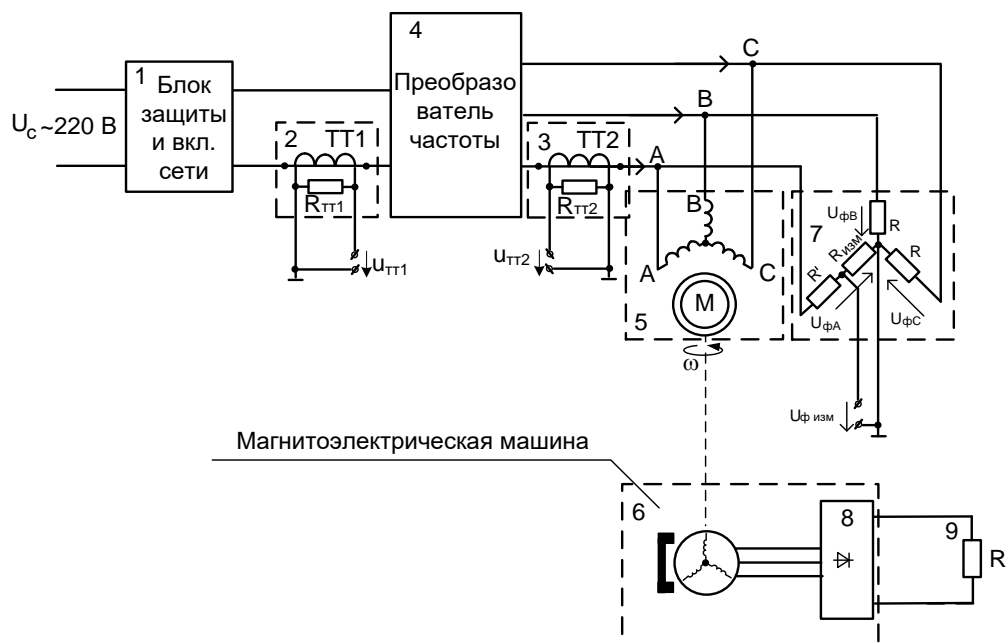


Рис. 4.18. Функциональная схема для испытания СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом.

В состав разработанного лабораторного стенда для испытания выходных характеристик ВЭТК ВЭУ входит:

- блок защиты и включения сети (1); трансформаторы тока (2, 3);

- частотный преобразователь (ЧП) для регулирования скорости вращения ротора асинхронного двигателя (4);
- электромеханическая система, состоящая из асинхронного двигателя (5) и СГПМ (6), соединенных муфтой;
- резистивная цепочка для измерения фазного напряжения АД (7).
- трехфазный выпрямитель (В) (8);
- нагрузочное сопротивление (Н) (9).

Внешняя характеристика СГПМ показана на рис. 4.19.

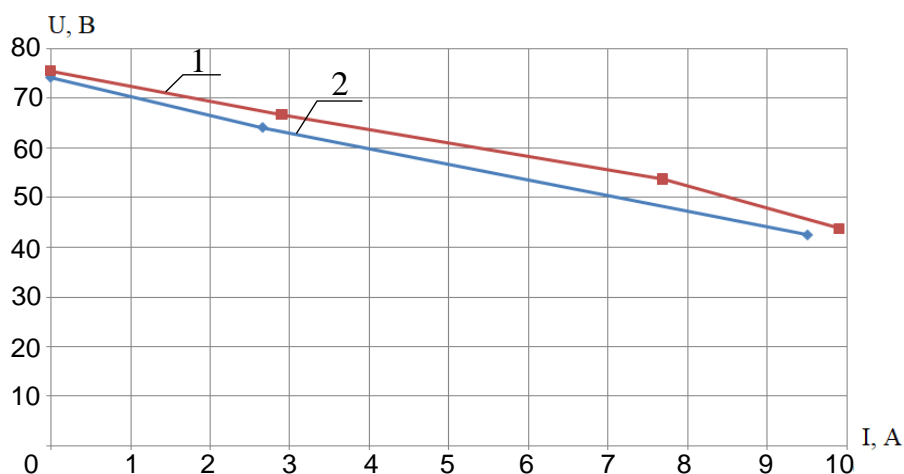


Рис. 4.19 Внешняя характеристика СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом: 1 - имитационное моделирование; 2- эксперимент.

Расхождение результатов имитационного моделирования и результатов, полученных при экспериментальных испытаниях СГПМ не превышает 5%, что позволяет использовать полученную имитационную модель при исследовании динамической устойчивости ветроэнергетической установки малой мощности в различных нагрузках.

Внешняя характеристики СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в относительных единицах показана на рис. 4.20.

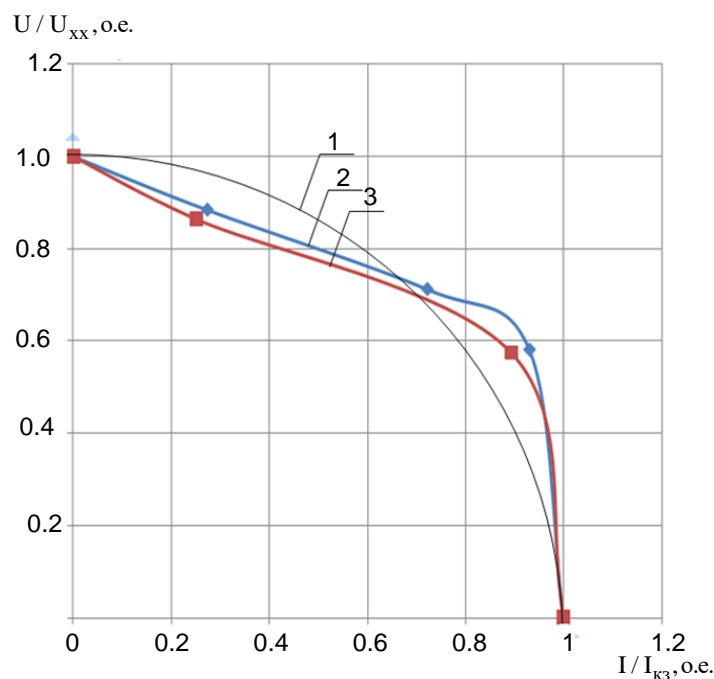


Рис. 4.20. Внешняя характеристика СГПМ в относительных единицах: 1 – теоретическая кривая в виде окружности; 2 – расчет численной модели СГПМ в программном пакете ANSYS Maxwell 16.0; 3 – эксперимент.

Решение задачи проектирования СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом связан с расчетом температуры элементов магнитной системы, их перегрев приводит к ухудшению энергетических показателей высококоэрцитивных постоянных магнитов, старению изоляции обмотки, снижает КПД и сокращает срок службы СГПМ.

Применение специализированных программ позволяет рассчитать тепловые потери в синхронном генераторе, однако сложность тепловых расчетов и учет большого числа взаимовлияющих факторов требует анализа тепловых процессов с использованием экспериментальных данных, полученных в результате исследования тепловых режимов разработанных макетных образцов, что приводит к дополнительным временным и материальным затратам. Особую актуальность приобретает исследование теплового режима СГПМ на этапе предварительных расчетов массогабаритных показателей магнитной системы, когда основные

геометрические и энергетические параметры определены, что позволит оценить тепловые потери и внести соответствующие корректировки в расчетные коэффициенты методики проектирования.

Приведенные в [50] уравнения тепловой модели могут быть использованы для расчета тепловой подсистемы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом

$$\begin{cases} P_c = c_c m_c \frac{d\theta_c}{dt} + \alpha_c S_1 (\theta_c - \theta_{\text{окр.ср}}) \\ P_m = c_m m_m \frac{d\theta_m}{dt} + \alpha_m S_m (\theta_m - \theta_{\text{окр.ср}}) \end{cases}, \quad (4.1)$$

где P_c, P_m – потери в стальном статоре и медной обмотке соответственной, Вт; $\theta_c, \theta_m, \theta_{\text{окр.ср}}$ – средняя температура магнитопровода и обмотки якоря и окружающей среды соответственно, К; α_c – коэффициент теплоотдачи статора и обмотки, Вт / (м²К); c_c, c_m – удельная теплоемкость сердечника и обмотки, Дж / (кг К); m_c, m_m – масса магнитпровода и обмотки якоря, кг; S_1, S_m – площади соприкасающихся поверхностей статора и обмотки соответственно, м².

При расчете используются следующие допущения:

- между обмотками статора и железом магнитопровода, а также между ротором с постоянными магнитами циркулирует воздух;
- температура окружающей среды остается постоянной;
- тепловыделения, возникающие в результате трения в механической подсистеме не учитываются.

Принятые допущения обуславливают источник теплоты в магнитной системе: нагрев магнитопровода статора в связи с переманчиванием и влиянием вихревых токов, а также тепловыделение в обмотке в результате протекания тока.

Потери в стали статора

$$P_c = k_{\text{и}} P_{\text{уд}} V_c \left(\frac{f}{f_{\text{пер}}} \right)^{1/3}, \quad (4.2)$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования магнитного потока, о.е.; $P_{\text{уд}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вих}}$ – удельные потери мощности, Вт/м³; P_{Γ} – удельные гистерезисный потери, Вт/м³; $P_{\text{вих}}$ – удельные потери, обусловленные вихревыми токами, Вт/м³; $V_c = m_c / \gamma_c$ – объем активной части статора, м³; γ_c – плотность стали статора, кг/м³, f – частота тока в обмотке СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом, Гц; $f_{\text{пер}}$ – частота перемагничивания, Гц.

При этом удельные гистерезисные потери мощности

$$P_{\Gamma} = \frac{2fS_f B^2}{\mu_c}, \quad (4.3)$$

где S_f – коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, о.е.; B – среднее значение индукции в магнитопроводе статора, Тл; $\mu_c = \mu_0 \mu'_c$ – магнитная проницаемость стали, Гн/м; μ'_c – относительная магнитная проницаемость стали, о.е.

Потери, обусловленные действием вихревых токов

$$P_{\text{вих}} = \frac{\pi^2 f^2 q_n B^2}{6\rho_c}, \quad (4.4)$$

где q_n – площадь поперечного сечения пластины шихтованного статора, м²; ρ_c – удельное электрическое сопротивление стали магнитопровода статора, Ом·мм²/м.

Тепловые потери, обусловленные протеканием тока в обмотке

$$P_M = m I_{\Phi}^2 \frac{w \ell_{\text{ср}}}{q_{\text{пр}}} \left(1 + 0.004 (\theta_M - \theta_{\text{окр.ср}}) \right), \quad (4.5)$$

где m – количество фаз СГПМ; I_{ϕ} – действующее значение фазного тока, А; W – число проводников в пазу статора; ℓ_{cp} – средняя длина витка обмотки, м; $Q_{пр}$ – площадь поперечного сечения медного провода, которым выполнена обмотка, m^2 .

Параметры тепловой модели (4.1) могут быть получены из предварительного расчета базовой конструкции магнитной системы СГПМ в соответствии с методикой расчетов, приведенных в [14, 113, 143]. Массу активных частей магнитопровода статора и обмотки, а также площадь соприкасающихся поверхностей обмотки и паза можно определить, если создать имитационную модель в среде CAD/CAM моделирования, например, ANSYS Mechanical 2019 R3.

На рис. 4.21 приведены результаты решения системы уравнений (4.1) и имитационного моделирования в программном комплексе ANSYS 2019 R3.

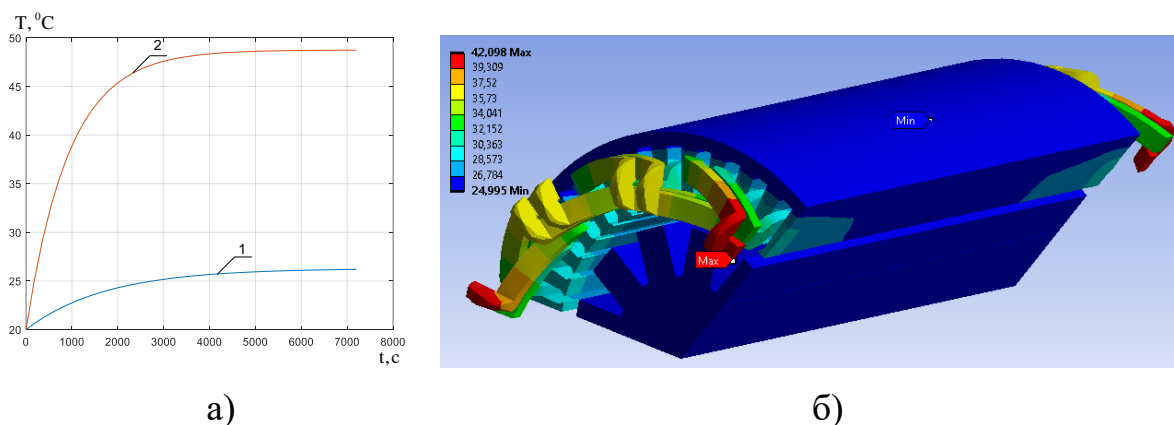


Рис. 4.21. Результаты исследования теплового режима на этапе предварительного расчета (а): 1 – средняя температура магнитопровода, 2 – средняя температура обмотки якоря; температурное поле в области моделирования (б).

Используя принципы построения магнитной системы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом, изложенные в [97–99, 138], существенное снижение момента страгивания можно добиться усовершенствованием

конструкции генератора, в которой отношение числа пазов статора, приходящихся на полюс и фазу представлено в виде периодической дроби

$$q = \frac{z}{2p \cdot m} = \frac{72}{22 \cdot 3} = 1,11\dots, \quad (4.6)$$

q – нецелое число (периодическая дробь), z – число пазов статора, p – число пар полюсов ротора; m - число фаз.

Примером конструктивного исполнения усовершенствованной магнитной системы тихоходного СГПМ может служить магнитная система с числом пазов $z = 72$, числом фаз $m = 3$, числом полюсов $2p = 22$, в которой число $q = 1,11\dots$

Усовершенствованная геометрия магнитной системы тихоходного СГПМ показана на рис. 4.22, а. Параметры СГПМ приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Технические характеристики тихоходного СГПМ

Параметр	Значение
Номинальная мощность, ВА	5000
Номинальное напряжение, В	130
Номинальная скорость вращения, об/мин	120
Число пар полюсов	11
Число пазов	72
Внешний диаметр статора, мм	520
Внешний диаметр ротора, мм	375

На рис. (4.22, б, в) показаны результаты моделирования магнитного поля усовершенствованной конструкции тихоходного СГПМ. На рис. 4.23 показана картина магнитного поля реакции якоря.

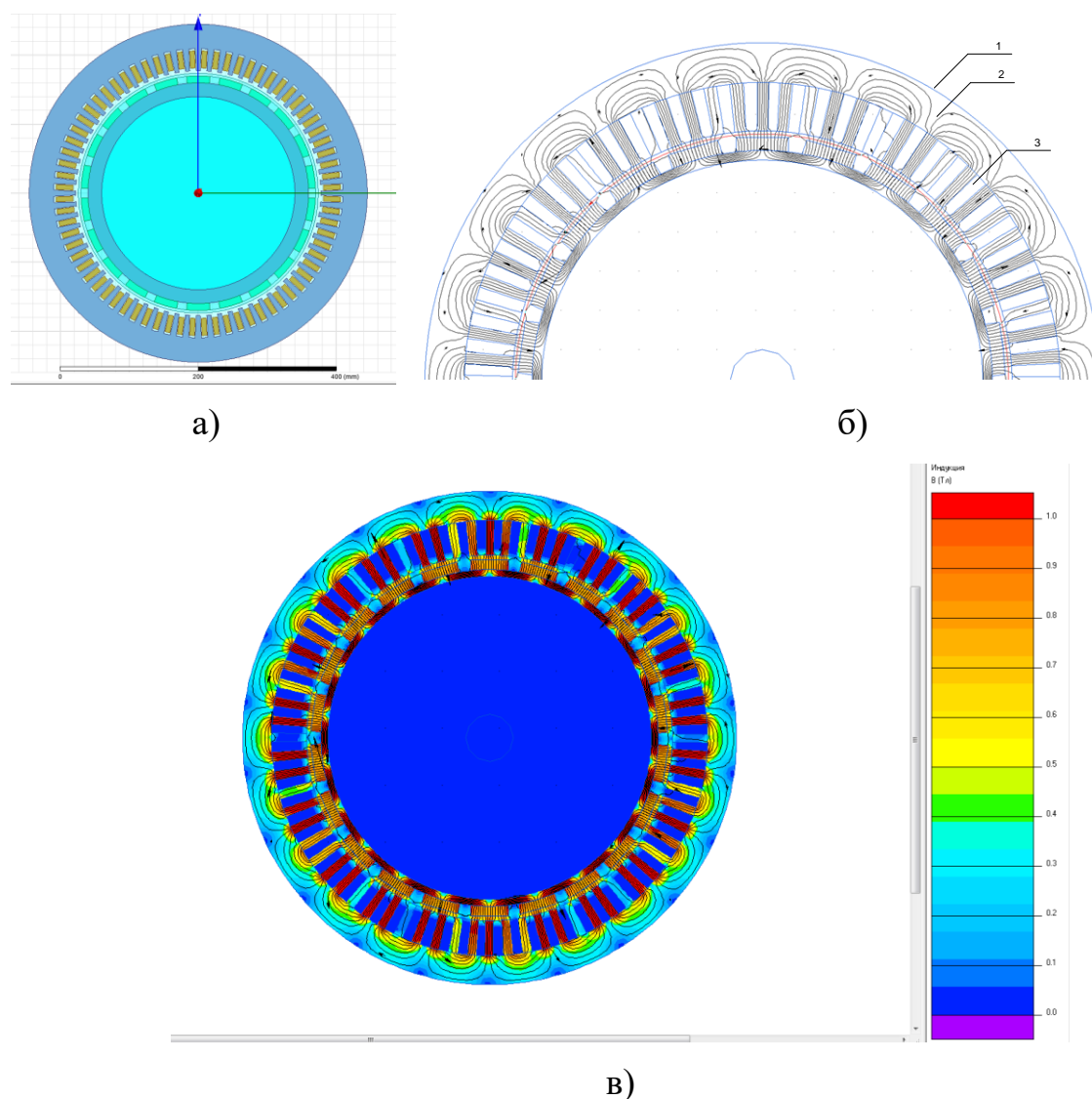


Рис. 4.22. Конструкция магнитной системы тихоходного СГПМ с общим магнитопроводом (а): 1– корпус, 2 – шихтованный магнитопровод, 3 – паз; картина магнитного поля без учета реакции якоря (б) в программном обеспечении Elcut 6.0, цветная карта индукции магнитного поля (в).

Параметры моделирования магнитного поля тихоходного СГПМ в программном обеспечении Elcut 6.0: диаметр индуктора $D_i = 0.382\text{ м}$, внешний диаметр якоря $D_j = 0.435\text{ м}$, активная длина $\ell' = 0.088\text{ м}$, номинальный ток при

активной нагрузке $I_{\text{НОМ}} = 12.8 \text{ А}$, ЭДС холостого хода $E_0 = 184 \text{ В}$, частота $f = 22 \text{ Гц}$, ширина открытого паза $b'_{\text{П}} = 0.011 \text{ м}$, высота паза $h_{\text{П}} = 0.013 \text{ м}$, площадь поперечного сечения воздушного зазора, $Q_{\delta} = 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, число витков $W_{\text{Ф}} = 778$, число проводников в пазу $c_{\text{П}} = 65$, сечение обмоточного провода $q_{\text{ПР}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, масса активной части витков обмотки $m_{\text{обМ}} = 10.64 \text{ кг}$, ширина полюса постоянного магнита $b_{\text{М}} = 0.054 \text{ м}$, высота полюса $d = 0.013 \text{ м}$. Энергетические параметры тихоходного СГПМ: минимально возможные относительные потери $P_{\text{Г min}} = 0.08$ о.е., КПД $\eta = 0.94$ о.е. , потери в обмотке якоря $\Delta P_{\text{я}} = 370 \text{ Вт}$.

На рис. 4.23 показана картина магнитного поля реакции якоря СГПМ

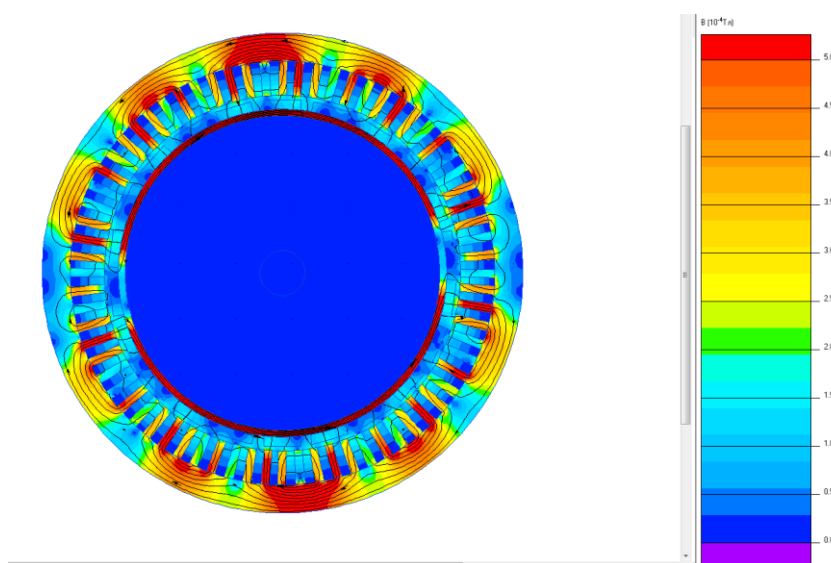


Рис. 4.23. Реакция якоря СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом 72/22.

На рис. 4.24 показана развернутая схема обмотки якоря СГПМ. Стрелками на рисунке показаны направления токов в фазах обмотки якоря для фиксированного момента времени.

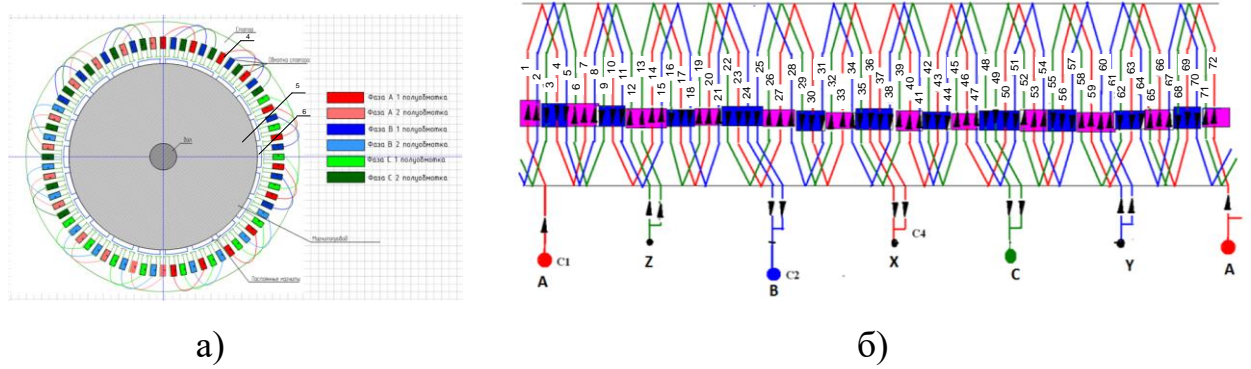


Рис. 4.24. Общая схема распределения полуобмоток в пазах СГПМ (а) и схема укладки вспомогательной обмотки якоря в пазах (б).

На рис. 4.25 приведен пример подключения трех выпрямительных блоков к фазам обмотки якоря СГПМ. Рассматривается случай, когда фазы обмотки якоря разомкнуты и не имеют общей точки. Каждая фаза обмотки якоря подключена к отдельному выпрямительному блоку, собранному на диодах, соединенных по мостовой схеме. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения можно использовать емкостной сглаживающий фильтр.

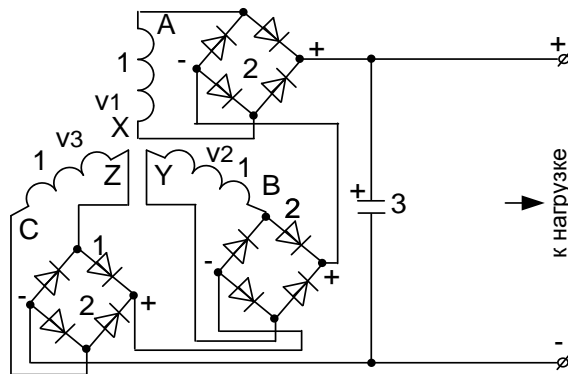


Рис. 4.25. Схема присоединения выпрямителей к обмотке СГПМ.

Предложенный способ позволяет получить выпрямленное напряжение на зажимах обмотки генератора в 2.7 раза больше действующего значения фазного напряжения, тогда как в мостовой схеме трехфазного выпрямителя (схема Ларионова) выпрямленное напряжения от действующего значения

фазного напряжения отличается в 2.34 раза. Такая схема присоединения фаз обмотки статора к выпрямительным блокам исключает наличие нечетных и четных гармоник в нагрузке и облегчает тем самым работу сглаживающего фильтра.

На рис. 4.26 показаны результаты моделирования номинального режима работы тихоходного СГПМ, полученные в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0.

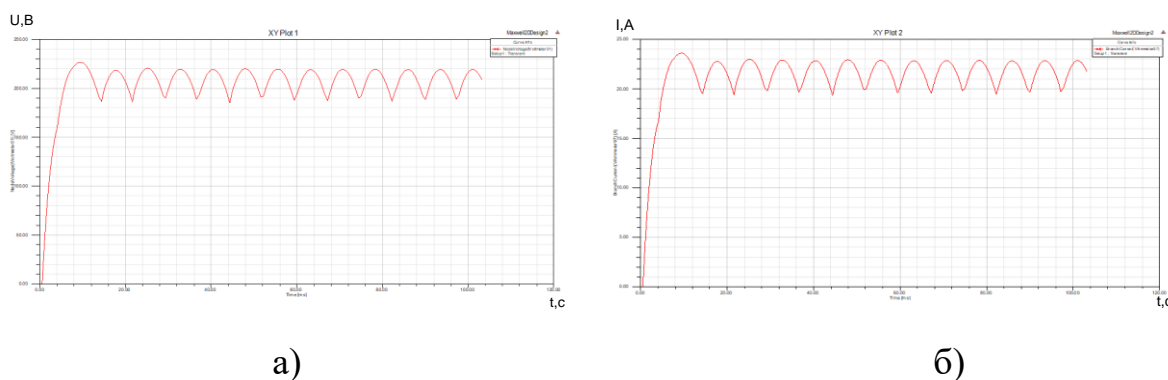


Рис. 4.26. Результаты расчета временных зависимостей напряжения (а) и тока (б) в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0.

На рис. 4.27 а, б показаны соответственно внешние характеристики тихоходного СГПМ и зависимость $P(I_{\text{нагр}})$ при различных скоростях вращения индуктора.

На основе предложенной методики оптимального проектирования разработано программное обеспечение по расчету конструкций СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом [113].

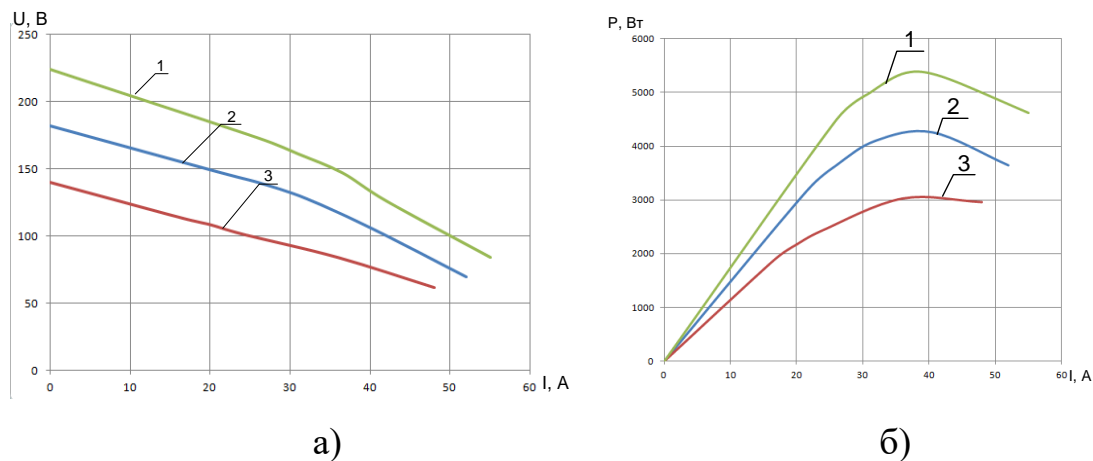


Рис.4.27. Внешняя характеристика СГПМ (а) и зависимость мощности на выходе генератора от тока нагрузки при скоростях вращения индуктора:

1 – 120 об/мин; 2–90 об/мин; 3 – 70 об/мин.

4.3. Выводы

1. На основе решения задачи оптимизации конструкции магнитных систем тихоходных СГПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ разработана методика их оптимального проектирования с достижением максимума удельной мощности на выходе генератора.

2. На основе предложенной методики разработано программное обеспечение, которое позволяет выполнить оптимизационные расчеты конструкций тихоходных СГПМ модульного типа и общим цилиндрическим магнитопроводом.

3. Методика оптимального проектирования технически реализована в макетных образцах тихоходных СГПМ, созданием лабораторных стендов для испытания синхронных генераторов в различных режимах работы, включая варьирование скорости вращения вала индуктора и сопротивления нагрузки.

4. Разработаны имитационные модели оптимальных конструкций СГПМ и проведена их верификация путем исследования макетных образцов СГПМ на испытательном стенде в диапазоне регулирования скорости вращения вала индуктора от 100 об/мин до 500 об/мин.

5. Результаты исследований подтверждают энергоэффективность ВЭУ на основе предложенных конструкций СГПМ модульного типа и общим цилиндрическим магнитопроводом, максимально возможный электромагнитный КПД для рассмотренных конструкций СГПМ в установившемся режиме принимает значение не ниже 0,94 о.е.

ГЛАВА 5. ТИХОХОДНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ПРИВОДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

5.1. Математическое представление опытного образца эластомера и исследование его релаксационных характеристик при заданной деформации.

Механические свойства эластомеров определяются особенностями их структуры, содержащей многокомпонентные материалы на основе каучука. Молекулярная структура эластомеров представляет собой объемную сетку, способную к высокоэластичным деформациям благодаря невысокой плотности поперечных химических связей, образующихся в процессе вулканизации – превращения каучука в резину. В зависимости от выбора компонентов соотношения между ними и условий вулканизации механические свойства эластомеров изменяются. В состав эластомеров входят: каучук, пластификатор для подготовки резины к формированию, наполнитель в виде тонкодисперсного порошка для повышения прочности резины (активный – сажа, оксид кремния) или ее удешевления (инертный – мел, тальк и др.), вулканизатор для соединения каучука поперечными связями, антиоксидант для замедления старения, ускоритель вулканизации, красители и другие составляющие. Для удешевления эластомеров в сырую резину вводят также регенераты (мелкоизмельченные отходы) и старые резиновые изделия. В качестве вулканизатора обычно применяют серу с концентрацией 5–6 %. При этом повышение содержания активного наполнителя и вулканизатора ведет к увеличению потерь на гистерезис, прочности и модуля упругости эластомеров. Повышение содержания пластификатора ослабляет межмолекулярное взаимодействие [74]. В качестве пластификаторов применяются акрилонитрил, изобутилен и другие вещества, легко совмещающиеся с каучуком, а также сополимеры для производства эластомеров общего назначения, например, бутадиен-стирольный каучук. Сложное строение эластомеров обуславливает

большое разнообразие протекающих в них релаксационных процессов, меняющихся с изменением температуры и напряжения. Это обстоятельство является важным, так как релаксационные свойства эластомеров служат основой для понимания процессов вязкоупругости в этих материалах. Проведенные в работах [3, 4, 16, 34, 74, 91] исследования механических свойств эластомеров показывают, что эластомеры характеризуются двумя основными релаксационными механизмами:

- α – процессы, ответственные за быструю стадию релаксации, наблюдаемые в области стеклования и связанные с главным временем релаксации $\tau_a = 10^{-3} - 10^{-5}$ с при 20^0 С;
- λ – процессы, ответственные за медленную высокоэластичную деформацию и связанные с главными различными временами релаксации, существенно отличающимися по величине друг от друга, принимающими значения от десятых долей секунды до нескольких часов.

Релаксационные механизмы α – и λ – процессов вызваны наличием в эластомерах молекулярно-упорядоченных и неупорядоченных микрообластей, находящихся в медленном подвижном равновесии, зависящем от температуры и напряжения. Быстрая стадия α – процессов релаксации напряжения происходит в молекулярно-неупорядоченной части эластомера и обусловлена подвижностью свободных сегментов, участвующих в тепловом движении. Молекулярно-упорядоченная часть эластомера под действием теплового движения и напряжения за время быстрой релаксации не успевает распасться и ведет себя как единое целое. Перестройка ее структуры происходит медленно, поэтому в λ – процессах релаксации напряжения изменения молекулярно-упорядоченной части определяют вязкое течение эластомера.

Для исследования связи основных релаксационных механизмов с процессами вязкоупругости в эластомерах проведем синтез многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера. При построении схемы

замещения воспользуемся моделью Максвелла для изучения свойств вязкоупругого тела. Модель состоит из соединенных последовательно двух элементов, один из которых обладает упругим сопротивлением, а другой – вязким (рис. 5.1). В качестве упругого элемента используется пружина, в качестве вязкого – цилиндр, заполненный вязкой жидкостью, внутри которого с некоторым зазором может двигаться поршень. При движении поршня относительно цилиндра возникает вязкое сопротивление, обусловленное перетеканием жидкости через зазор из одной полости в другую.

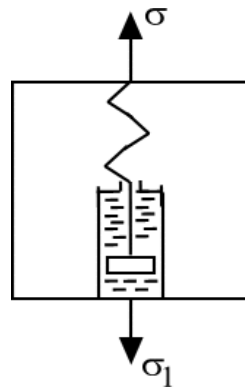


Рис. 5.1. Модель Максвелла вязкоупругого тела.

В модели Максвелла упругий и вязкий элементы находятся под одним и тем же усилием, при этом полная деформация ε вязкоупругого тела складывается из упругой ε_y и вязкой ε_v деформации:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_v. \quad (5.1)$$

Относительные деформации ε_y и ε_v в соотношении (5.1) находятся как отношения удлинения пружины и смещения поршня к одной и той же длине ребра множества малых плотно прилегающих друг к другу единичных кубиков, составляющих вязкоупругого тело.

Упругая деформация ε_y связана с напряжением σ законом Гука

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma}{E}, \quad (5.2)$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга).

Зависимость между напряжением и скоростью вязкой деформации представим в виде соотношения [74]

$$\frac{d\varepsilon_B}{dt} = \frac{\sigma}{\lambda}, \quad (5.3)$$

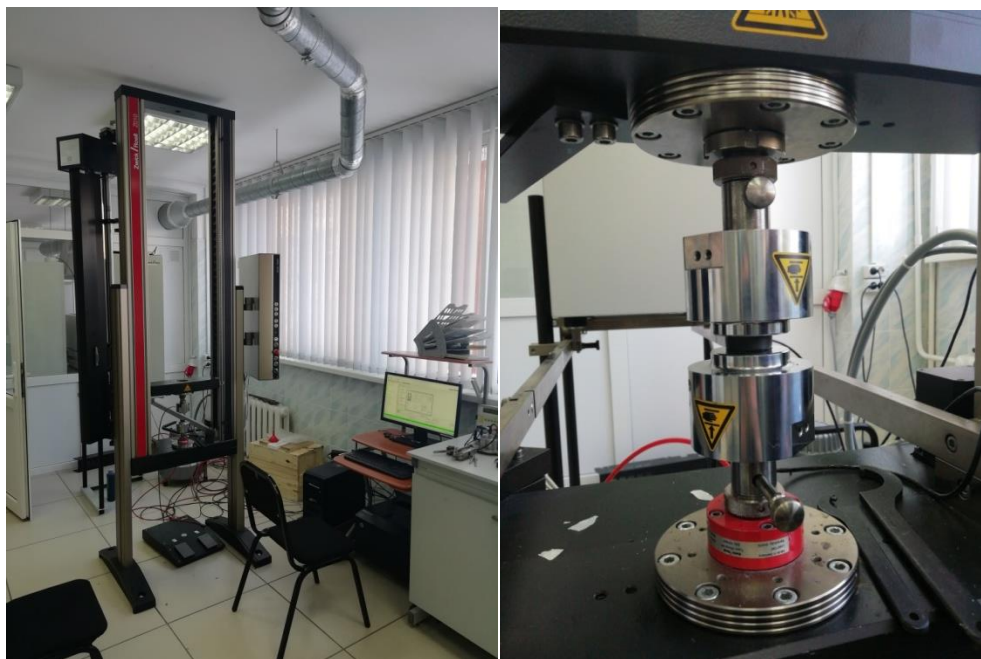
где λ – коэффициент, учитывающий вязкое течение эластомеров при растяжении-сжатии.

Продифференцируем по времени обе части уравнений (5.1) и (5.2), тогда с учетом выражения (5.3) получим уравнение:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda}. \quad (5.4)$$

Уравнение (5.4), называемое уравнением механических состояний материала Максвелла, для случая линейной вязкоупругости отражает качественную картину физического процесса при растяжении-сжатии. Этого вполне достаточно, чтобы воспользоваться формальной аналогией в записи уравнений механических состояний вязкоупругого тела и электрического состояния цепи.

Пусть вязкоупругое тело нагружено любым способом до напряжения σ_0 , и в дальнейшем деформация тела поддерживается постоянной, то есть $\varepsilon = \text{const}$. Экспериментальную характеристику опытного образца эластомера можно получить, используя машину для испытания материалов Zwick/Roell Z010 (рис. 5.2, а). В подобных условиях (рис. 5.2, б) находится опытный образец эластомера (1), зажатый с двух торцевых поверхностей стальными основаниями (2, 3) при жестком фиксировании хода подвижной части, при этом другое основание является неподвижным. Найдем закон изменения во времени напряжений в опытном образце эластомера.



а)

б)

Рис. 5.2. Стенд для экспериментального определения релаксации эластомера (а) и схема нагружения опытного образца эластомера (б).

С учетом условия $\varepsilon = \text{const}$ уравнение (5.5) принимает вид:

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda} = 0. \quad (5.5)$$

После операции разделения переменных и интегрирования получим:

$$\ln \sigma + C = -\frac{E}{\lambda} t, \quad (5.6)$$

Для удобства анализа преобразуем уравнение (5.6) к виду:

$$\ln \sigma - \ln C_1 = -\frac{E}{\lambda} t. \quad (5.7)$$

Отсюда напряжение

$$\sigma = C_1 \exp\left(-\frac{E}{\lambda} t\right). \quad (5.8)$$

Для записи решения в окончательном виде подставим в уравнение (5.37) начальное условие (в момент времени $t=0$ напряжение $\sigma = \sigma_0$), тогда получим

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{\lambda} t\right). \quad (5.9)$$

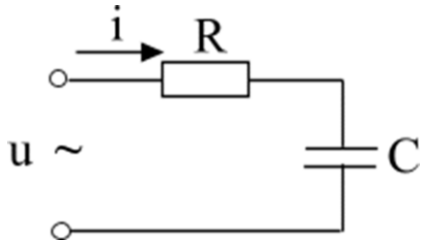


Рис. 5.3. Схема замещения вязкоупругого тела.

Если сопоставить уравнению (5.9) после операции его интегрирования

$$\frac{\sigma}{E} + \frac{1}{\lambda} \int \sigma dt = 0 \quad (5.10)$$

уравнение заряда конденсаторной

батареи от источника постоянного напряжения

$$iR + \frac{1}{C} \int i dt = 0, \quad (5.11)$$

и его решение

$$i = I_0 \exp\left(-\frac{1}{RC} t\right), \quad (5.12)$$

то легко можно обнаружить формальную аналогию в записи уравнений (5.9) и (5.10) и их решений (5.11) и (5.12). Следовательно, в электрической схеме замещения опытного образца эластомера (рис. 5.3) аналогами тока i , напряжения u , сопротивления R и емкости C соответственно будут напряжение σ , деформация ε , инверсный модуль упругости E^{-1} , коэффициент вязкого течения λ . Построенная таким образом схема замещения опытного образца эластомера является упрощенной. Несмотря на это, выполненные на ее основе расчеты показывают процесс уменьшения напряжения σ в опытном образце эластомера при постоянной деформации ε и позволяют оценить время релаксации

$$\tau = \frac{E}{\lambda},$$

$$(5.13)$$

динамический модуль упругости при синусоидально изменяющихся во времени деформациях $\varepsilon(t)$

$$\frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} = \left[\sqrt{\frac{1}{E^2} + \frac{1}{(\omega\lambda)^2}} \right]^{-1} \quad (5.14)$$

и тангенс угла механических потерь

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E}{\omega\lambda} \quad (5.15)$$

где ω – угловая частота; φ – угол сдвига фаз между напряжением $\sigma(t)$ и деформацией $\varepsilon(t)$; σ_m, ε_m – соответственно амплитуды напряжения и деформации в вязкоупругом теле.

Формальная аналогия в записи уравнений механического состояния вязкоупругого тела и электрического состояния цепи дает возможность построить многоконтурную схему замещения вязкоупругого тела, в которой напряжение в процессе релаксации при поддержании заданной деформации $\varepsilon = \text{const}$ раскладывается в экспоненциальный ряд:

$$\sigma(t) = \sum_{k=1}^N \sigma_{sk} e^{-\Lambda_k t}, \quad (5.16)$$

где σ_{sk}, Λ_k – соответственно амплитуда и показатель степени k -ой экспоненты механического напряжения.

Разложение зависимости (5.16) на сумму экспонент позволяет записать операторное сопротивление схемы замещения вязкоупругого тела, аналогичное операторному сопротивлению схемы замещения электрической

цепи. Так, например, если при подаче на вход электрической цепи постоянного напряжения ток источника питания изменяется по закону

$$i(t) = \sum_{k=1}^N I_{sk} e^{-\Lambda_k t}, \quad (5.17)$$

то операторное сопротивление цепи определяется выражением:

$$z(p) = \frac{R_0 \left[A_1 p^n + A_2 p^{n-1} + \dots + A_n p \right]}{(I_0 B_1 - A_2) p^{n-1} + (I_0 B_2 - A_3) p^{n-2} + \dots + (I_0 B_{n-1} - A_n) p + I_0 B_n}, \quad (5.18)$$

где

$$A_1 = \sum_{j=1}^n I_{sj};$$

$$A_2 = I_{s1} (\Lambda_2 + \Lambda_3 + \dots + \Lambda_n) + I_{s2} (\Lambda_1 + \Lambda_3 + \dots + \Lambda_n) + \dots \\ \dots + I_{sn} (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \dots + \Lambda_{n-1});$$

$$A_3 = I_{s1} (\Lambda_2 \Lambda_3 + \Lambda_2 \Lambda_4 + \dots + \Lambda_2 \Lambda_n + \Lambda_3 \Lambda_4 + \dots + \Lambda_{n-1} \Lambda_n) + \\ + I_{s2} (\Lambda_1 \Lambda_3 + \Lambda_1 \Lambda_4 + \dots + \Lambda_1 \Lambda_n + \Lambda_3 \Lambda_4 + \dots + \Lambda_{n-1} \Lambda_n) + \dots \\ + I_{sn} (\Lambda_1 \Lambda_2 + \Lambda_2 \Lambda_3 + \dots + \Lambda_1 \Lambda_{n-1} + \Lambda_2 \Lambda_3 + \dots + \Lambda_{n-2} \Lambda_{n-1});$$

.

$$A_n = I_{s1} (\Lambda_2 \Lambda_3 \Lambda_4 \dots \Lambda_n) + I_{s2} (\Lambda_1 \Lambda_3 \Lambda_4 \dots \Lambda_n) + \dots + I_{sn} (\Lambda_1 \Lambda_2 \Lambda_3 \dots \Lambda_{n-1});$$

$$B_1 = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \dots + \Lambda_n;$$

$$B_2 = \Lambda_1 \Lambda_2 + \Lambda_1 \Lambda_3 + \dots + \Lambda_1 \Lambda_n + \Lambda_2 \Lambda_3 + \dots + \Lambda_2 \Lambda_n + \dots + \Lambda_{n-1} \Lambda_n;$$

.

$$B_n = \Lambda_1 \Lambda_2 \Lambda_3 \dots \Lambda_n.$$

По операторному сопротивлению (5.18) можно синтезировать схему замещения. Пусть ток на неразветвленном участке цепи (рис. 5.4 б) содержит три экспоненты

$$i(t) = I_{s1} e^{-\Lambda_1 t} + I_{s2} e^{-\Lambda_2 t} + I_{s3} e^{-\Lambda_3 t}, \quad (5.19)$$

тогда параметры электрической цепи:

$$C_0 = \frac{I_0}{R_0} [I_{s1}\Lambda_1 + I_{s2}\Lambda_2 + I_{s3}\Lambda_3]^{-1}; \quad (5.20)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[A - C_0 + \frac{[2B - D(C_0 + A)]}{\sqrt{D^2 - 4C}} \right]^{-1}, \quad C_2 = A - C_0 - C_1, \quad R_1 = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4C}}{2C_1},$$

$$R_2 = \frac{D + \sqrt{D^2 - 4C}}{2C_2}; \quad A = \frac{1}{RI_0} \left[\frac{I_{s1}}{\Lambda_1} + \frac{I_{s2}}{\Lambda_2} + \frac{I_{s3}}{\Lambda_3} \right];$$

$$B = \frac{[I_{s1}(\Lambda_2 + \Lambda_3) + I_{s2}(\Lambda_1 + \Lambda_3) + I_{s3}(\Lambda_1 + \Lambda_2)]}{R_0 I_0 \Lambda_1 \Lambda_2 \Lambda_3};$$

$$C = \frac{[I_{s1}\Lambda_1 + I_{s2}\Lambda_2 + I_{s3}\Lambda_3]}{I_0 \Lambda_1 \Lambda_2 \Lambda_3};$$

$$D = \frac{[I_{s1}\Lambda_1(\Lambda_2 + \Lambda_3) + I_{s2}\Lambda_2(\Lambda_1 + \Lambda_3) + I_{s3}\Lambda_3(\Lambda_1 + \Lambda_2)]}{I_0 \Lambda_1 \Lambda_2 \Lambda_3}.$$

Используя формальную аналогию в замене параметров электрической цепи (рис. 5.4, б) сопротивлений R_0, R_1, R_2 на инверсные модули упругости $E_0^{-1}, E_1^{-1}, E_2^{-1}$, и емкостей C_0, C_1, C_2 на коэффициенты вязкого течения $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, соответственно, можно по выражениям (5.20) найти параметры многоконтурной схемы замещения напряженно деформированного состояния вязкоупругого тела при заданной деформации $\varepsilon = \text{const}$ (рис. 5.4 а).

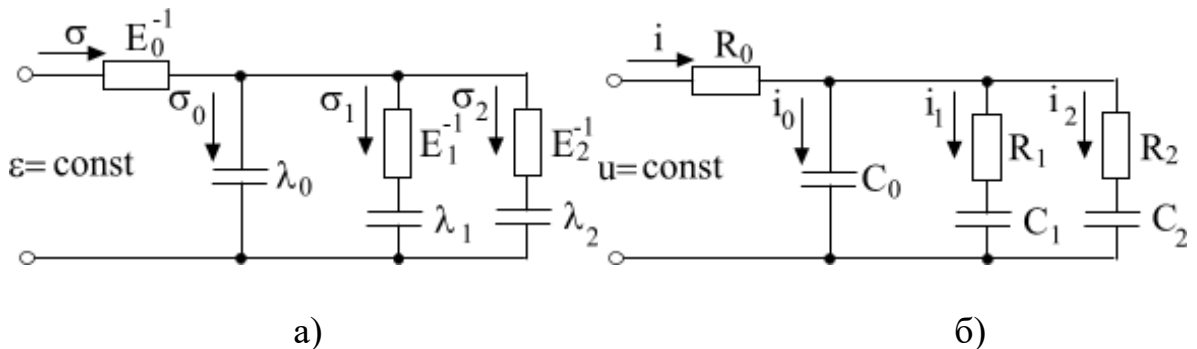


Рис. 5.4. Многоконтурная схема замещения вязкоупругого тела (а) и ее аналог в виде электрической цепи (б).

Процесс релаксации напряжения при этом описывается тремя экспонентами

$$\sigma(t) = \varepsilon E(t) = \varepsilon \sum_{k=1}^3 E_k e^{-\Lambda_k t}, \quad (5.21)$$

где $E(t)$ – релаксационный динамический модуль упругости; $\tau_k = \frac{1}{\Lambda_k}$ – постоянная времени k -того релаксационного механизма; E_k – коэффициент с размерностью модуля упругости, указывающий в процессе релаксации на относительный вклад k -того релаксационного механизма.

Исследования процесса релаксации напряжения в опытных образцах эластомеров на испытательном стенде показывают, что в процессе релаксации напряжения при фиксированных значениях деформации ε участвуют шесть экспонент, имеющих различные постоянные времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6$.

Для этого случая постоянные времени многоконтурной схемы замещения (рис. 5.5) определяются из решения системы нелинейных алгебраических уравнений, имеющей вид (5.22).

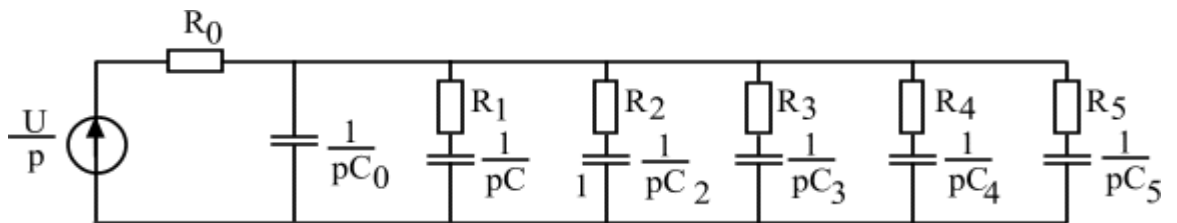


Рис. 5.5. Многоконтурная схема замещения цепи в операторной форме $N=6$

Решение системы уравнений (5.22) производится методом последовательных приближений [17]. По вычисленным значениям постоянных времени $\tau_k = R_k C_k$, где $k = 1, 2, \dots, 5$ определяются параметры многоконтурной схемы замещения R_k и C_k .

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5 = \frac{I_{s1} \lambda_1 + I_{s2} \lambda_2 + I_{s3} \lambda_3 + I_{s4} \lambda_4 + I_{s5} \lambda_5 + I_{s6} \lambda_6}{I_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6} = \frac{\sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k}{I_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6} \\ \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 = \sum_{k=1}^6 \frac{1}{\lambda_k} \left(1 - \frac{I_{sk}}{I_0} \right) \\ \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_4} + \frac{1}{\tau_5} = \frac{\sum_{k=1}^6 \left(I_{sk} \lambda_k \sum_{j=1}^6 \lambda_j \right)}{\sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k} \end{array} \right. \quad \text{при } j=k, \lambda_j=0 \quad (5.22)$$

$$\sum_{i=1}^3 \tau_i \sum_{j=i+1}^4 \tau_j \sum_{n=j+1}^5 \tau_n = \frac{1}{I_0 \prod_{k=1}^6 \lambda_k} \left(\sum_{k=1}^6 I_{sk} \lambda_k \left(\sum_{j=1}^5 \lambda_j \sum_{m=j+1}^6 \lambda_m \right) \right)$$

$$\sum_{i=1}^4 \tau_i \sum_{j=i+1}^5 \tau_j = \frac{1}{I_0} \left(\sum_{k=1}^6 I_{sk} \sum_{j=1}^5 \frac{1}{\lambda_j} \sum_{m=j+1}^6 \frac{1}{\lambda_m} \right)$$

при $j=k$, $\frac{1}{\lambda_j}$ не существует,

при $m=k$, $\frac{1}{\lambda_m}$ не существует

при $j=k, \lambda_j=0$; при $m=k, \lambda_m=0$

Для их расчета вначале используется решение системы линейных алгебраических уравнений относительно емкостей схемы C_k :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 a_0^{(1)} + C_1 a_1^{(1)} + C_2 a_2^{(1)} + C_3 a_3^{(1)} + C_4 a_4^{(1)} + C_5 a_5^{(1)} = b_0^{(1)} \\ C_0 a_0^{(2)} + C_1 a_1^{(2)} + C_2 a_2^{(2)} + C_3 a_3^{(2)} + C_4 a_4^{(2)} + C_5 a_5^{(2)} = b_0^{(2)} \\ C_0 a_0^{(3)} + C_1 a_1^{(3)} + C_2 a_2^{(3)} + C_3 a_3^{(3)} + C_4 a_4^{(3)} + C_5 a_5^{(3)} = b_0^{(3)}, \\ C_0 a_0^{(4)} + C_1 a_1^{(4)} + C_2 a_2^{(4)} + C_3 a_3^{(4)} + C_4 a_4^{(4)} + C_5 a_5^{(4)} = b_0^{(4)} \\ C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = b_0^{(5)} \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Сопротивления участков схемы находятся при этом из соотношений

$$R_k = \tau_k / C_k.$$

Решение систем уравнений (5.22) и (5.23) позволяет построить эффективный алгоритм по синтезу многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера и использовать его при исследовании динамических характеристик привода и реологических характеристик эластомеров.

Для построения многоконтурных схем замещения опытных образцов эластомеров воспользуемся экспериментальными исследованиями процесса релаксации напряжения при заданной деформации, проведенными на испытательном стенде, который обеспечивает:

- создание статического прижимного усилия на опытный образец эластомера;
- фиксацию хода индуктора с помощью ограничителя хода в виде регулируемой высоты стопа для поддержания заданной деформации ε ;
- установку температуры испытаний опытного образца эластомера, используя термокамеру;
- измерение силы реакции опытного образца эластомера при сжатии с помощью преобразователя силы ПС-20К, имеющего номинальную нагрузку 20 кг при напряжении питания 5 В;
- усиление электрического сигнала с выхода преобразователя силы ПС-20К и его регистрацию на экране монитора ПК. Для осциллографирования выходного сигнала использовалась осциллографирующая приставка (PCS 500 цифровой осциллограф, производитель Velleman Instruments, погрешность 2.5%, чувствительность 5 мВ). Ее программное обеспечение позволяет регистрировать время и амплитуду сигнала со следующими погрешностями 0,001 сек. и 0,001 В, что делает возможным выделение в эксперименте быстрой и медленной стадии процесса релаксации.

Для исследования процесса релаксации механического напряжения при заданной деформации на испытательном стенде были отобраны опытные образцы эластомеров с различным наполнителем технического углерода П-550

и П-234, резко отличающимися друг от друга своими вязкоупругими свойствами. На рис. 5.6 и 5.7 приведены экспериментальные временные зависимости выходного сигнала, характеризующие процесс релаксации механического напряжения в опытных образцах эластомеров.

Значения выходного сигнала пропорциональны силе реакции опытного образца эластомера на сжатие $F_{эл} = k u_d$ и, соответственно, пропорциональны механическому напряжению $\sigma = F_{эл}/S$, где S – площадь поперечного сечения опытного образца в ненагруженном состоянии. Это позволяет определить амплитуду и показатель степени k -ой экспоненты механического напряжения в выражении (5.16), приведенные в табл. 5.1.

Данные табл. 5.1 были использованы для синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера в программном обеспечении «Эластомер», разработанном в среде Borland Delphi 6.0 [115, 117, 118, 150, 214]. Результаты расчетов по этой программе представлены в табл. 5.2.

Параметры многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234, приведенные в табл. 5.2, служат основой в построении общей математической модели ЛМЭП.

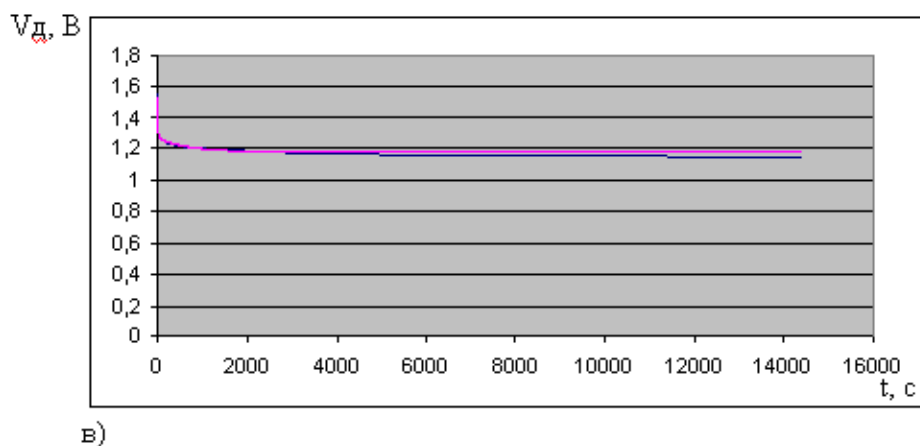
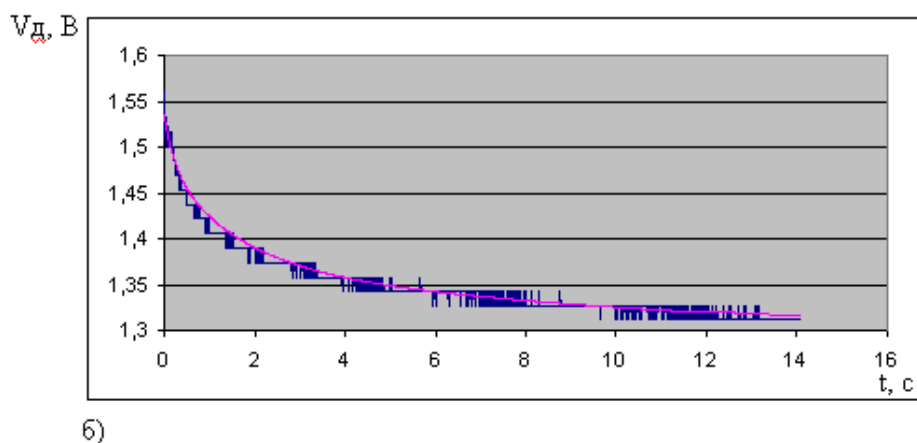
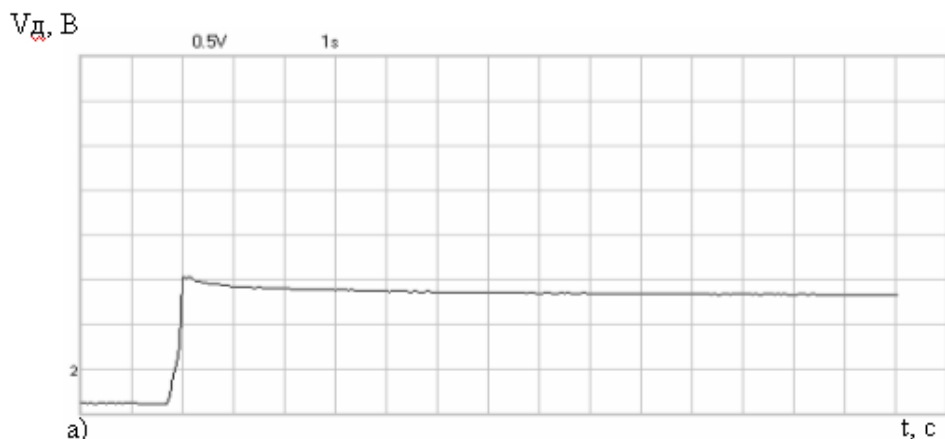
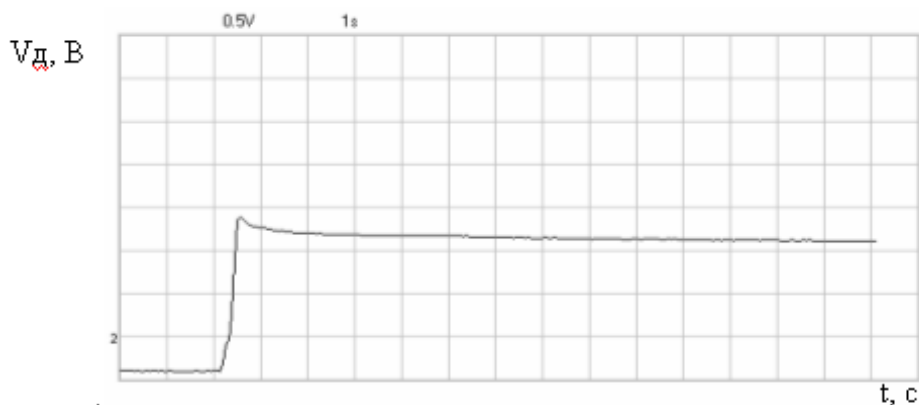
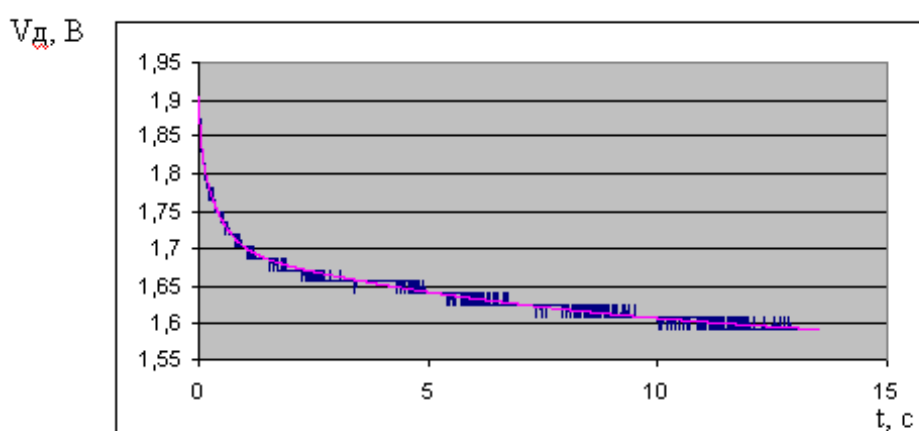


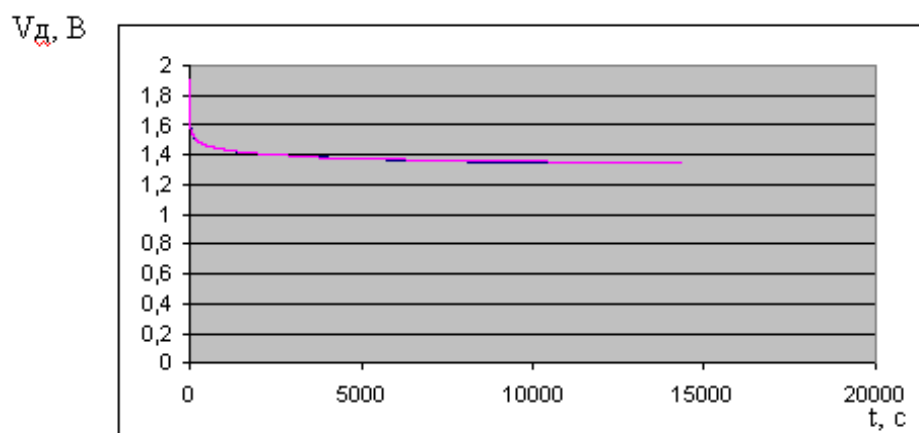
Рис. 5.6 Экспериментальные зависимости выходного сигнала в процессе релаксации механического напряжения в опытном образце эластомера с наполнителем технического углерода П-550: а – с использованием АЦП в секундной области; б, в – с использованием милливольтметра в часовой области. — экспериментальная характеристика; — характеристика, полученная после разложения экспериментальной характеристики на экспоненты.



a)



б)



в)

Рис. 5.7 Экспериментальные зависимости выходного сигнала в процессе релаксации механического напряжения в опытном образце эластомера с наполнителем технического углерода П-234: а – с использованием АЦП в секундной области; б, в – с использованием милливольтметра в часовой области. — экспериментальная характеристика; — характеристика, полученная после разложения экспериментальной характеристики на экспоненты.

Таблица 5.1

Результаты разложения механического напряжения в процессе релаксации в опытных образцах эластомеров с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234.

Техуглерод П-550		Техуглерод П - 234	
σ_{si} , Па	λ_i	σ_{si} , Па	λ_i
$\sigma_{s1} = 4.247 \cdot 10^5$	$\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6}$	$\sigma_{s1} = 4.959 \cdot 10^5$	$\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{s2} = 3.31 \cdot 10^4$	$\lambda_2 = 1.6 \cdot 10^{-3}$	$\sigma_{s2} = 3.673 \cdot 10^4$	$\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{s3} = 3.427 \cdot 10^4$	$\lambda_3 = 0.051$	$\sigma_{s3} = 3.64 \cdot 10^4$	$\lambda_3 = 6.3 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{s4} = 2.929 \cdot 10^4$	$\lambda_4 = 0.532$	$\sigma_{s4} = 4.524 \cdot 10^4$	$\lambda_4 = 0.128$
$\sigma_{s5} = 1.208 \cdot 10^4$	$\lambda_5 = 0.812$	$\sigma_{s5} = 4.863 \cdot 10^4$	$\lambda_5 = 2.373$
$\sigma_{s6} = 1.886 \cdot 10^4$	$\lambda_6 = 4.084$	$\sigma_{s6} = 2.313 \cdot 10^4$	$\lambda_6 = 26.989$

Таблица 5.2

Параметры многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера с различным наполнителем технического углерода П-550 и П-234

Техуглерод П - 550			Техуглерод П- 234		
τ_i , 1/с	C_i , Ф	R_i , Ом	τ_i , 1/с	C_i , Ф	R_i , Ом
3.541	$2.154 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^8$	0.919	$6.312 \cdot 10^{-9}$	$1.457 \cdot 10^8$
433.779	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$2.742 \cdot 10^8$	120.991	$1.135 \cdot 10^{-6}$	$1.066 \cdot 10^8$
15.683	$3.27 \cdot 10^{-7}$	$4.796 \cdot 10^7$	4.872	$1.108 \cdot 10^{-7}$	$4.398 \cdot 10^7$
$2.464 \cdot 10^3$	$6.11 \cdot 10^{-6}$	$4.034 \cdot 10^8$	$1.350 \cdot 10^3$	$7.597 \cdot 10^{-6}$	$1.778 \cdot 10^8$
0.744	$3.129 \cdot 10^{-8}$	$2.379 \cdot 10^7$	0.158	$1.305 \cdot 10^{-8}$	$1.211 \cdot 10^7$
$2.019 \cdot 10^5$	$3.741 \cdot 10^{-3}$	$5.399 \cdot 10^7$	$1.388 \cdot 10^5$	$2.472 \cdot 10^{-3}$	$5.616 \cdot 10^7$

Важным вопросом обоснования применимости разработанного метода для синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера является установление зависимости параметров схемы замещения от величины относительной деформации ε . Для этого проведем анализ процесса релаксации напряжения при различных значениях деформации ε . Результаты такого анализа приведены на рис. 5.8 и в таблицах 5.3 и 5.4.

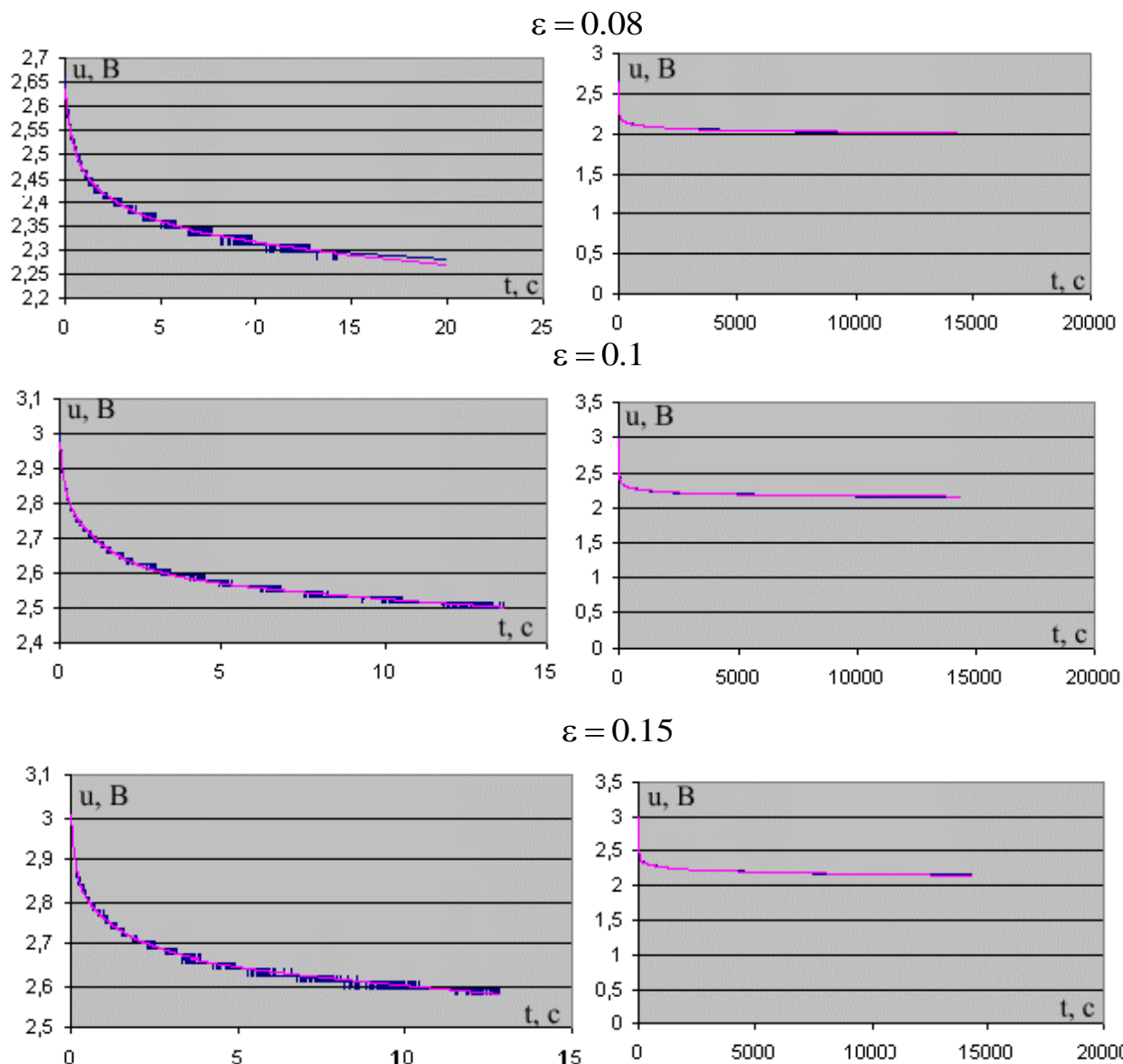


Рис. 5.8. Временные зависимости выходного сигнала, полученные в процессе релаксации напряжения в опытном образце эластомера с наполнителем технического углерода П-550: рисунки слева – быстрая стадия процесса релаксации напряжения; рисунки справа – медленная стадия процесса релаксации напряжения.

Разложение механического напряжения в процессе релаксации
на экспоненциальные составляющие

i	$\varepsilon = 0.08$		$\varepsilon = 0.1$		$\varepsilon = 0.15$	
	σ_{si} , Па	λ_i	σ_{si} , Па	λ_i	σ_{si} , Па	λ_i
1	$3.577 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4.139 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-6}$	$7.912 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-6}$
2	$1.680 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1.434 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1.776 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-4}$
3	$1.542 \cdot 10^4$	0.005	$1.032 \cdot 10^4$	0.002	$3.748 \cdot 10^4$	0.001
4	$2.942 \cdot 10^4$	0.061	$4.351 \cdot 10^4$	0.043	$1.218 \cdot 10^4$	0.029
5	$2.287 \cdot 10^4$	0.571	$4.164 \cdot 10^4$	0.826	$6.184 \cdot 10^4$	0.717
6	$1.895 \cdot 10^4$	3.014	$2.795 \cdot 10^4$	9.052	$5.372 \cdot 10^4$	7.618

Таблица 5.4

Параметры многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера
при различной величине относительной деформации

$\varepsilon = 0.08$		$\varepsilon = 0.1$		$\varepsilon = 0.15$	
C_i , Ф	R_i , Ом	C_i , Ф	R_i , Ом	C_i , Ф	R_i , Ом
$3.697 \cdot 10^{-8}$	$1.740 \cdot 10^8$	$1.052 \cdot 10^{-8}$	$1.813 \cdot 10^8$	$1.713 \cdot 10^{-8}$	$1.383 \cdot 10^8$
$9.219 \cdot 10^{-7}$	$1.598 \cdot 10^8$	$9.169 \cdot 10^{-7}$	$4.339 \cdot 10^8$	$2.905 \cdot 10^{-6}$	$2.290 \cdot 10^8$
$2.152 \cdot 10^{-7}$	$4.648 \cdot 10^7$	$2.234 \cdot 10^{-7}$	$6.585 \cdot 10^7$	$5.436 \cdot 10^{-7}$	$3.154 \cdot 10^7$
$6.701 \cdot 10^{-6}$	$2.088 \cdot 10^8$	$3.583 \cdot 10^{-6}$	$4.182 \cdot 10^8$	$8.052 \cdot 10^{-6}$	$5.834 \cdot 10^8$
$3.299 \cdot 10^{-8}$	$2.130 \cdot 10^7$	$2.305 \cdot 10^{-8}$	$2.359 \cdot 10^7$	$3.783 \cdot 10^{-8}$	$1.866 \cdot 10^7$
$4.463 \cdot 10^{-3}$	$5.005 \cdot 10^7$	$4.134 \cdot 10^{-3}$	$6.043 \cdot 10^7$	$2.630 \cdot 10^{-3}$	$5.151 \cdot 10^7$

Рассчитаем средние значения параметров многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера для различных значений деформации ε , приведенные в табл. 5.5.

Усредненные значения параметров многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера с наполнителем технического углерода П-550

Техуглерод П-550		
$\tau_i, 1/c$	C_i, Φ	$R_i, Ом$
3.541	$2.154 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^8$
433.779	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$2.742 \cdot 10^8$
15.683	$3.27 \cdot 10^{-7}$	$4.796 \cdot 10^7$
$2.464 \cdot 10^3$	$6.11 \cdot 10^{-6}$	$4.034 \cdot 10^8$
0.744	$3.129 \cdot 10^{-8}$	$2.379 \cdot 10^7$
$2.019 \cdot 10^5$	$3.741 \cdot 10^{-3}$	$5.399 \cdot 10^7$

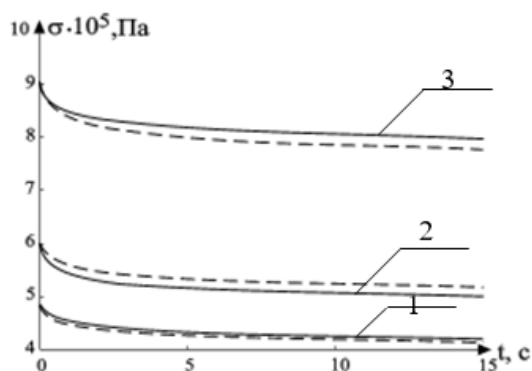


Рис. 5.9. Процесс релаксации механического напряжения испытуемого образца при заданном значении относительной деформации: 1- $\varepsilon = 0.1$; 2- $\varepsilon = 0.15$; 3- $\varepsilon = 0.15$; усредненные параметры многоконтурной схемы замещения.

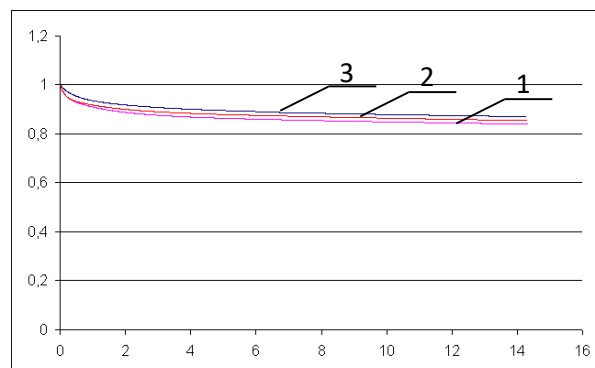


Рис. 5.10. Процесс релаксации механического напряжения испытуемого образца, построенный в относительных единицах: 1- $\varepsilon = 0.08$; 2- $\varepsilon = 0.1$; 3- $\varepsilon = 0.15$

На рис. 5.9 и 5.10 дана оценка погрешности усредненных параметров многоконтурной схемы замещения по отношению к истинным значениям, полученным для различных значений относительной деформации ε .

Хорошее совпадение характеристик релаксационного процесса на рис. 5.9, 5.10 указывает на применимость предложенного метода синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера для случая линейной вязкоупругости, когда значения относительной деформации ε не превышают 0,2.

Целесообразно использование средних значений параметров многоконтурной схемы замещения в задаче расчета динамических характеристик ЛМЭП в рассматриваемом диапазоне изменения во времени относительной деформации, что обусловлено небольшой нелинейностью испытуемого образца в области малых деформаций.

5.2. Обоснование базовой конструкции, моделирование и экспериментальное исследование линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров.

Для обоснования базовой конструкции ЛМЭП сделаем несколько предварительных замечаний, касающихся конструктивных особенностей существующих магнитных систем магнитоэлектрических устройств и способов формирования в них рабочего магнитного потока.

Математическую формулировку задачи оптимизации ЛМЭП представим следующим образом.

Требуется найти значения переменных x_1, x_2, \dots, x_n , определяющие соотношения конструктивных параметров – размеров магнитной системы привода, которые максимизируют критерий оптимальности, то есть тяговое усилие (функцию цели)

$$F_{ЭМ}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max \quad (5.24)$$

при ограничениях в виде равенств или уравнений связи между параметрами магнитной системы

$$q_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad s < n, \quad (5.25)$$

и неравенств, определяющих физическую реализуемость магнитной системы привода, исходя из реальных характеристик используемых активных материалов и конструктивных параметров, варьируемых при проектировании, таких как, например, коэффициент заполнения по меди, плотность тока в обмотке и др.

$$p_j(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad m < n, \quad (5.26)$$

Функции $F_{ЭМ}$, q_k и p_j являются нелинейными, причем функция цели может иметь не один, а несколько локальных (относительных) экстремумов. Тогда задача оптимизации магнитной системы привода по выбранному критерию оптимальности будет заключаться в определении глобального экстремума, то есть наибольшего из всех значений функций в области допустимых значений переменных.

Для решения задачи оптимального проектирования электропривода возвратно-поступательного движения универсальными являются численные методы линейного и нелинейного программирования и методы теории планирования эксперимента [17, 47, 51, 72, 89, 166, 207]. С их помощью удастся учесть сложную зависимость выходных параметров привода от геометрических размеров магнитной системы. К числу наиболее значимых методов для решения задачи оптимизации магнитной системы привода по выбранному критерию оптимальности относятся метод исключения зависимых переменных, метод определенных множителей Лагранжа, градиентные методы, методы безградиентного поиска и методы случайного поиска [17]. Достижения в области использования ПК с большой ресурсной памятью и быстродействием, наличие новых программных средств,

включающих библиотеки и пакеты стандартных программ, таких как система MATLAB, позволяют автоматизировать процесс поиска оптимальной конструкции привода. При этом, однако, не следует пренебрегать накопленным опытом проектирования конкретных магнитных систем приводов другого назначения и принципа действия для установления наиболее экономичных методов оптимизации. Предложенная в работах [59, 110, 153] задача оптимизации параметров линейного электромагнитного привода по максимуму КПД (область применения – силовые преобразователи) была заменена вариационной. Исследование построенного функционала на экстремум позволило авторам в первом приближении записать выражения взаимосвязи конструктивных параметров двигателя с его энергетическими показателями, разработать методику оптимизации электромагнитных параметров привода с уточнением расчетных данных методом итераций и снятием первоначально принятых допущений, а также определить границы оптимума, его крутизну. Используем этот опыт при оптимизации магнитной системы линейного магнитоэлектрического привода по максимуму тягового усилия [134].

При решении задачи оптимизации магнитной системы ЛМЭП, примем следующие допущения:

- магнитное сопротивление стали мало и им можно пренебречь вследствие значительного рабочего зазора на пути основного магнитного потока;
- высота активной части обмотки, расположенной на пути основного магнитного потока, определяется с помощью поправочного коэффициента, учитывающего выпучивание магнитного потока в зазоре;
- в пределах активной части обмотки индукция магнитного поля постоянна и равна среднему значению индукции в зазоре;
- плотность тока по сечению обмотки распределяется равномерно;
- магнитные потоки реакции и рассеяния не учитываются.

Принятые допущения могут служить основой на предварительных этапах решения задачи оптимизации магнитной системы ЛМЭП. На следующих этапах проектирования привода решение задачи оптимизации нуждается в корректировке параметров путем снятия первоначальных допущений, используя для этого результаты численного расчета магнитного поля и динамических характеристик привода. Для обоснования базовой конструкции проведем оптимизацию геометрии различных магнитных систем ЛМЭП с постоянными магнитами, намагниченными в радиальном (рис. 5.11 а, б) и осевом (рис. 5.11 в, г) направлениях.

а) Магнитная система ЛМЭП с одним воздушным каналом и магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 5.1, а).

С учетом принятых допущений тяговое усилие ЛМЭП определяется выражением [26]

$$\begin{aligned} F_{\text{эм}} &= 2B_{\text{ср}} \ell_{\text{ср.обм}} (IW)_{\text{а}} = 2B_{\text{ср}} \ell_{\text{ср.обм}} \lambda_{\text{а}} \delta k_3 J = \\ &= 2B_{\text{ср}} Q_{\delta} \delta k_3 J = 2B_{\text{м}} Q_{\text{м}} \delta k_3 J, \end{aligned} \quad (5.27)$$

где $B_{\text{ср}}$ – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре; $\ell_{\text{ср.обм}}$ – средняя длина витка обмотки; $(IW)_{\text{а}}$ – активная часть ампервитков обмотки в зоне действия основного магнитного потока; $\lambda_{\text{а}}$ – высота активной части обмотки; δ – рабочий зазор; k_3 – коэффициент заполнения обмотки; J – плотность тока; Q_{δ} – площадь рабочего зазора; $B_{\text{м}}$ – индукция в нейтральном сечении постоянного магнита; $Q_{\text{м}}$ – площадь нейтрального сечения постоянного магнита.

Индукция в нейтральном сечении постоянного магнита определяется координатами точки пересечения кривой размагничивания магнита из материала FeNdB и луча, соответствующего относительной проводимости воздушного зазора Λ_{δ}^* (рис. 5.12), которую можно определить путем решения системы уравнений [26]:

$$\begin{cases} b = 1 - h \\ b = h\Lambda_{\delta}^* \end{cases}, \quad (5.28)$$

где $h = \frac{H}{H_c}$ и $b = \frac{B}{B_r}$ – соответственно относительные напряженность и индукция; H_c – коэрцитивная сила магнита; B_r – остаточная индукция;

$\Lambda_{\delta}^* = \frac{\Lambda_{\delta}}{\Lambda_m}$; $\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta}$ – проводимость рабочего зазора на пару полюсов;

$\Lambda_m = \frac{B_r Q_m}{2H_c d}$ – проводимость магнита на пару полюсов; d – длина магнита по

оси намагничивания.

Решение системы (5.28) имеет вид

$$b_m = \frac{B_m}{B_r} = \frac{\Lambda_{\delta}^*}{1 + \Lambda_{\delta}^*} \quad (5.29)$$

Подставляя решение (5.29) в выражение силы тяги (5.27), получим:

$$F_{\text{ЭМ}} = 2B_r \frac{\Lambda_{\delta}^*}{1 + \Lambda_{\delta}^*} Q_m \delta k_3 J, \quad (5.30)$$

где $\Lambda_{\delta}^* = \mu_0 \frac{H_c}{B_r} \frac{Q_{\delta}}{Q_m} \frac{d}{\delta}$.

Удельное тяговое усилие линейного магнитоэлектрического привода определяется отношением силы тяги к суммарной массе активной части обмоток и постоянных магнитов, то есть

$$F_{\text{ЭМ.уд}} = \frac{F_{\text{ЭМ}}}{m_{\text{акт.обм}} + m_M} = B_r \frac{\Lambda_{\delta}^*}{1 + \Lambda_{\delta}^*} \frac{Q_m \delta k_3 J}{(\gamma_{\text{обм}} \delta Q_{\delta} + \gamma_M d Q_M)}, \quad (5.31)$$

где $\gamma_{\text{обм}}, \gamma_M$ – соответственно плотности используемых материалов для изготовления обмоточного провода и постоянного магнита, принимающие значения $\gamma_{\text{обм}} = 8900 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_M = 7500 \text{ кг/м}^3$.

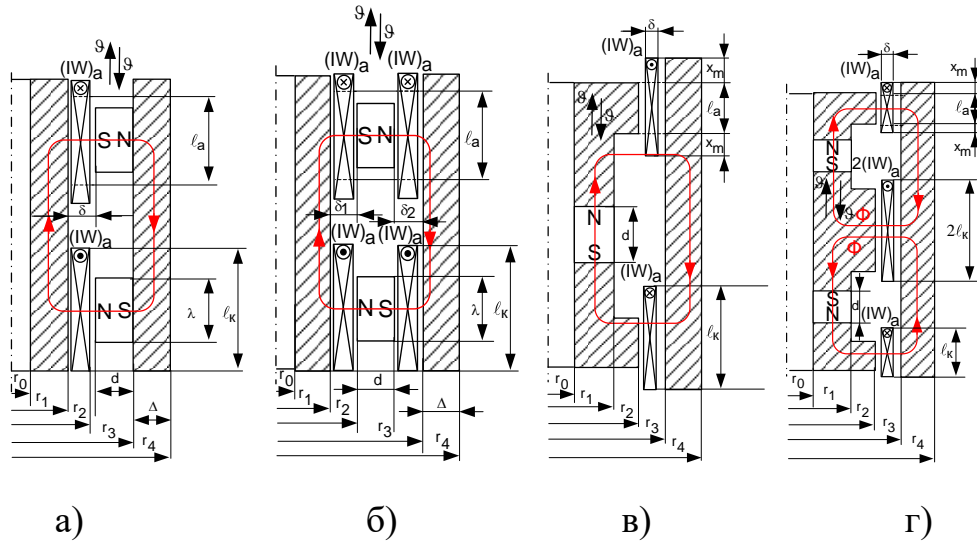


Рис. 5.11. Магнитные системы ЛМЭП с магнитами, намагниченными в радиальном (а, б) и аксиальном направлениях (в, г): а – ЛМЭП с одним воздушным каналом; б – ЛМЭП с двумя воздушными каналами; в – ЛМЭП с одной парой полюсов; г – ЛМЭП с двумя парами полюсов.

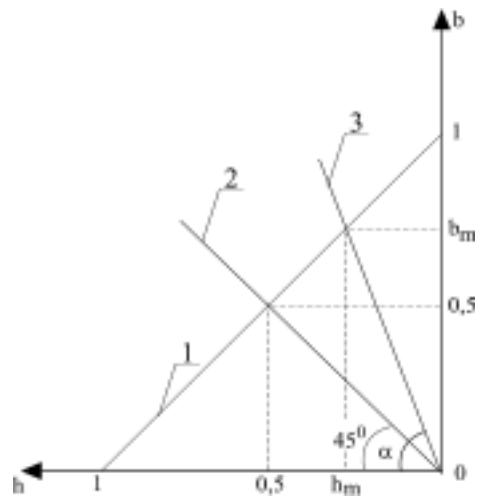


Рис. 5.12. К расчету магнитной цепи ЛМЭП: 1 – характеристика размагничивания постоянного магнита; 2 – луч проводимости рабочего зазора ($\lambda_{\delta_{\text{опт}}}^* = \text{const}$); 3 – луч проводимости рабочего зазора для оптимальной геометрии магнитной системы ЛМЭП $\lambda_{\delta_{\text{опт}}}^* = 1$.

Используем обозначения $n = \frac{d}{\delta}$ и $k_M = \frac{m_{\text{акт.обм}}}{m_M}$ для преобразования выражения (5.31) к виду:

$$F_{\text{эм.уд}} = \frac{\mu_0 H_c k_3 J}{\gamma_{\text{обм}}} \frac{k_M}{(1+k_M)} \frac{n}{\left(1 + \frac{\mu_0 H_c}{B_r} \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}}} n^2 k_M\right)}. \quad (5.32)$$

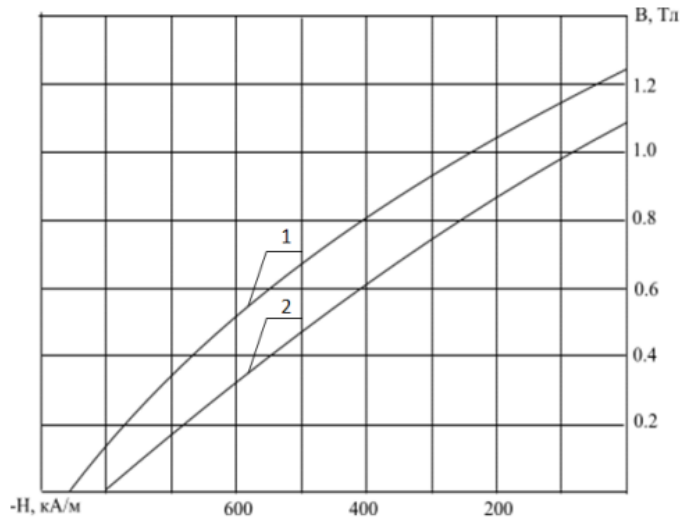


Рис. 5.13. Характеристика размагничивания высококоэрцитивных ПМ из материалов: 1 – Нм32Р, 2 – Нм30Ди6Р.

Из полученного выражения видно, что удельная сила тяги ЛМЭП является функцией двух независимых переменных n и k_M . Другие величины в выражении (5.32) являются постоянными, зависящими от характеристик используемых активных материалов и ограничений по плотности тока и коэффициенту заполнения обмотки.

Для отыскания экстремума целевой функции приравняем нулю ее частные производные и решим систему уравнений для определения неизвестных $n_{\text{опт}}$ и $k_{M,\text{опт}}$

$$\frac{\partial F_{\text{эм.уд}}}{\partial n} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial F_{\text{эм.уд}}}{\partial k_M} = 0. \quad (5.33)$$

При записи корней системы можно убедиться, что система уравнений в положительной полуплоскости пространства определена и имеет единственное решение

$$n_{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обМ}}}{\gamma_M}}, \quad (5.34)$$

$$k_{\text{М.ОПТ}} = 1.$$

Подставляя полученные значения независимых переменных в выражение (5.9), можно найти максимальное значение удельной силы тяги для исследуемой магнитной системы ЛМЭП:

$$F_{\text{ЭМ.уд.макс}} = \frac{k_3 J}{4} \sqrt{\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{\text{обМ}} \gamma_M}}. \quad (5.35)$$

При этом оптимальное отношение площадей рабочего зазора и нейтрального сечения постоянного магнита

$$\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обМ}}}}. \quad (5.36)$$

Числовой расчет $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{ОПТ}}$ отношения для различных марок сплавов постоянного магнита показывает, что его значение приближается к единице. Так, например, для марки сплава постоянного магнита $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ [71] на основе железа (Fe), неодима (Nd) и бора (B) имеем: $B_r = 1.23 \text{ Тл}$, $H_c = 880 \text{ кА/м}$, удельная энергия постоянного магнита $\tilde{\omega}_{\text{М.макс.}} = 145 \text{ кДж/м}^3$, отношение площадей рабочего зазора и нейтрального

сечения постоянного магнита $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{ОПТ}} = 0.968$ значение $n_{\text{ОПТ}} = 1.149$.

Для других марок сплавов постоянного магнита значения $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{ОПТ}}$ и $n_{\text{ОПТ}}$ приведены в табл. 5.6.

Оптимальные геометрические соотношения размеров магнитной системы ЛМЭП

Марка сплава	$\tilde{\omega}_{\text{м.макс.}}, \text{кДж/м}^3$	$B_r, \text{Тл}$	$H_c, \text{кА/м}$	$(Q_{\delta}/Q_M)_{\text{опт}}$	$n_{\text{опт}}$
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	120	1.18	744	1.031	1.224
КСП 37 А	72.5	0.9	500	1.099	1.304
КС 37	55	0.77	540	0.978	1.160

В оптимальной конструкции магнитной системы привода относительная индукция в нейтральном сечении магнита удовлетворяет условию

$$b_m = 0.5. \quad (5.37)$$

б) Магнитная система ЛМЭП с двумя воздушными каналами и постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 5.11,б).

Тяговое усилие привода определяется выражением

$$F_{\text{эм}} = 2B_m Q_M k_3 J (\delta_1 + \delta_2). \quad (5.38)$$

Магнитная индукция в нейтральном сечении магнита согласно решению системы уравнений (5.38)

$$B_m = \mu_0 \frac{Q_{\delta 1} Q_{\delta 2}}{Q_M} \left[\frac{H_c d}{Q_{\delta 1} \delta_2 + Q_{\delta 2} \delta_1 + \frac{\mu_0 H_c d Q_{\delta 1} Q_{\delta 2}}{Q_M}} \right], \quad (5.39)$$

где $Q_{\delta 1}$ и $Q_{\delta 2}$ – соответственно площади рабочих зазоров δ_1 и δ_2 .

Суммарную массу активных частей обмоток и постоянных магнитов можно записать в виде:

$$\begin{aligned} m_{\text{сум}} &= m_{\text{акт.обм.1}} + m_{\text{акт.обм.2}} + m_M = \\ &= 2 \left[\gamma_{\text{обм}} (Q_{\delta 1} \delta_1 + Q_{\delta 2} \delta_2) + \gamma_M Q_M d \right]. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Выразим удельную силу тяги привода через независимые переменные

$$n = \frac{d}{\delta_1}, \quad r = \frac{d}{\delta_2}, \quad k_{M1} = \frac{m_{обМ1}}{m_M}, \quad k_{M2} = \frac{m_{обМ2}}{m_M}. \quad (5.41)$$

Тогда после преобразований, принимая во внимание соотношения (5.39) – (5.41), получим:

$$F_{ЭМ.уд.} = \frac{\mu_0 H_c k_3 J}{\gamma_{обМ}} \left(\frac{k_{M1} k_{M2}}{1 + k_{M1} + k_{M2}} \right) \times (n + r) \quad (5.42)$$

$$\times \frac{1}{\left(k_{M1} \frac{n}{r} + k_{M2} \frac{r}{n} + \frac{\mu_0 H_c \gamma_M}{\gamma_{обМ}} k_{M1} k_{M2} r n \right)}$$

Найдем экстремум целевой функции (5.18), подчинив ее следующим условиям:

$$\frac{\partial F_{ЭМ.уд.}}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial F_{ЭМ.уд.}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial F_{ЭМ.уд.}}{\partial k_{M1}} = 0, \quad \frac{\partial F_{ЭМ.уд.}}{\partial k_{M2}} = 0. \quad (5.43)$$

Решая систему уравнений (5.43), найдем значения независимых переменных, обеспечивающие ему максимальное значение силы тяги

$$F_{ЭМ.уд.макс} = \frac{k_3 J}{4} \left(\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{обМ} \gamma_M} \right). \quad (5.44)$$

Критериальные соотношения имеют вид:

$$n_{опт} = \frac{1}{k_{M1.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обМ}}{\mu_0 H_c \gamma_M}}, \quad r_{опт} = \frac{1}{k_{M2.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обМ}}{\mu_0 H_c \gamma_M}}, \quad (5.45)$$

$$k_{M1.опт} + k_{M2.опт} = 1$$

В оптимальной конструкции магнитной системы привода (рис. 5.11, б) выполняется равенство (5.37).

в) Магнитная система ЛМЭП с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении и одной парой полюсов (рис. 5.11, в).

Относительная магнитная проводимость рабочего зазора на пару полюсов определяется выражением

$$\Lambda_{\delta}^* = \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_M}. \quad (5.46)$$

Подставляя выражение (5.46) в решение системы (5.30), преобразуем выражение тягового усилия (5.30) к виду

$$F_{\text{Эм.уд.макс}} = \frac{\mu_0 Q_{\delta} H_c d k_3 J}{\left(1 + \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_M}\right)}. \quad (5.47)$$

Введем независимые переменные:

$$n = \frac{d}{\delta}, \quad k_M = \frac{m_{\text{акт.обм}}}{m_M}, \quad (5.48)$$

где $m_{\text{акт.обм}} = 2Q_{\delta}\delta\gamma_{\text{обм}}$; $m_M = Q_M\gamma_M d$ – составляющие массы магнитной системы.

Через независимые переменные удельная сила тяги определяется выражением

$$F_{\text{Эм.уд.}} = \frac{\mu_0 H_c k_3 J}{2\gamma_{\text{обм}}(1+k_M)} \times \frac{n}{\left(1 + \frac{\mu_0 H_c}{4B_r} \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}}} n^2 k_M\right)}. \quad (5.49)$$

При отыскании экстремума целевой функции (5.49) используем условия (5.33). Из решения системы уравнений для определения оптимальных значений независимых переменных и подстановки их в выражение (5.26) получим выражение для определения максимального значения удельной силы тяги привода, идентичное выражению (5.21). Экстремум целевой функции достигается при оптимальных параметрах:

$$n_{\text{опт}} = 2\sqrt{\frac{B_r \gamma_{\text{обм}}}{\mu_0 H_c \gamma_M}}, \quad k_{M,\text{опт}} = 1. \quad (5.50)$$

Для оптимальной геометрии магнитной системы привода справедливо соотношение (5.37).

г) Магнитная система ЛМЭП с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении и двумя парами полюсов (рис. 5.11, г).

Тяговое усилие, развиваемое приводом, вычисляется по формуле

$$F_{\text{Эм.уд.макс}} = \frac{\mu_0 Q_{\delta} H_c d k_3 J}{\left(1 + \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_M}\right)}. \quad (5.51)$$

Суммарная масса активных частей обмоток и постоянных магнитов

$$m_{\text{сум}} = m_{\text{акт.обм}} + m_M = 4\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta} \delta + 2\gamma_M Q_M d. \quad (5.52)$$

Введение независимых переменных (5.48) в выражение удельной силы тяги, определяемое по отношению (5.49), позволяет исследовать полученную функцию цели на экстремум. Максимальное значение удельной силы тяги находится из выражения, идентичного выражению (5.48). Для оптимальной геометрии магнитной системы привода выполняется равенство (5.37) и справедливы соотношения (5.50), при которых сила тяги достигает максимума. Анализ результатов расчета оптимальных магнитных систем ЛМЭП для испытаний вязкоупругих свойств эластомеров показывает, что для всех типов исследуемых магнитных систем привода при заданных технических условиях, конструкция которых удовлетворяет критерию оптимальности – максимуму тягового усилия, сохраняются одинаковые значения следующих основных параметров:

- суммарная масса постоянных магнитов и активной части обмотки, кг.....4.21.
- оптимальное отношение массы активной части обмотки к массе постоянных магнитов.....1.0
- магнитная индукция в нейтральном сечении магнита $B_m = 0.5B_r$, Тл.....0.58.

Для создания максимального значения тягового усилия ЛМЭП $F_{\text{Эм}} = 100$ Н (условие технического задания) конструктивно реализуемы магнитные системы ЛМЭП с постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 5.11 а, б). В магнитной системе ЛМЭП, приведенной на рис. 5.11 б, для обеспечения больших значений радиусов

постоянного магнита (средний радиус магнита $r_{cp} = 0.052$ м) наиболее эффективно применение постоянных магнитов, изготовленных в виде сегментов, или призматических постоянных магнитов, размещенных на гранях индуктора.

Тогда как в магнитных системах ЛМЭП с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении (рис.5.11 в, г), использование постоянных магнитов больших радиусов ограничивается технологией изготовления (по сортаменту для марки сплава Нм30ДибР внешний радиус магнита $r_1 \leq 0.04$ м).

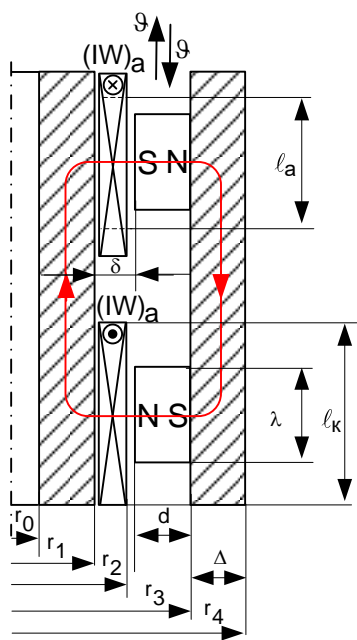
Принимая во внимание, что магнитная система ЛМЭП с двумя воздушными каналами (рис.5.11 б) по сравнению с магнитной системой (рис. 5.11 а) имеет меньшую массу якоря и обладает лучшими динамическими свойствами, примем ее в качестве базовой конструкции ЛМЭП, предназначенной для испытаний вязкоупругих свойств эластомеров (Приложение 6) [58, 116, 146, 148, 212].

Таблица 5.7

Расчет оптимальных конструкций ЛМЭП на заданное тяговое усилие

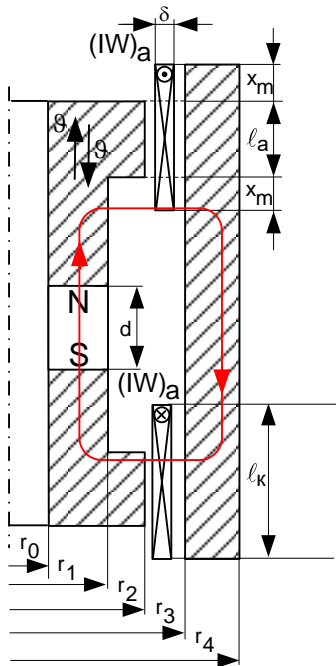
Тип магнитной системы	Наименование параметра	Значение параметра
	Масса активной части ЛМЭП	
	Масса магнита ЛМЭП, кг	1.05
	Масса активной части обмотки на одну пару полюсов, кг	1.05
	Суммарная масса магнита и активной части обмотки, кг	4.2
	Индукция	
	Индукция в нейтральном сечении магнита, Тл	0.5
	Индукция в зазоре, Тл	0.53

Продолжение табл. 5.7	
Основные геометрические размеры магнитной системы ЛМЭП	
Высота магнита, λ , м	0.053
Длина магнита по оси намагничивания, d , м	0.008
Высота активной части обмотки l_a , м	0.059
Высота обмотки l_k , м	0.069
Толщина обмотки, δ , м	0.007
Толщина стенки внешнего сердечника магнитопровода, Δ , м	0.0014
Средний радиус магнита, м	0.053
Средний радиус обмотки, м	0.046
Радиусы магнитной системы ЛМЭП	
Радиус внутреннего сердечника магнитопровода, r_1 , м	0.042
Радиус обмотки, r_2 , м	0.05
Радиус магнита, r_3 , м	0.06
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_4 , м	0.07
Параметры ЛМЭП	
Удельное электромагнитное усилие, Н	23.77
Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, А	329.4
Проводимость магнита на пару полюсов, Гн	$3 \cdot 10^{-6}$
Относительная проводимость воздушного зазора	1



Тип магнитной системы	Наименование параметра	Значение параметра
	Масса активной части ЛМЭП	
	Масса магнита на одну пару полюсов, кг	2.1
	Масса активной части обмотки на одну пару полюсов, кг	1.05
	Суммарная масса магнита и активной части обмотки, кг	4.2
	Индукция	
	Индукция в нейтральном сечении магнита, Тл	0.57
	Индукция во внутреннем зазоре, Тл	0.58
	Индукция во внешнем зазоре, Тл	0.47
	Основные геометрические размеры магнитной системы ЛМЭП	
	Высота магнита, λ , м	0.054
	Длина магнита по оси намагничивания, d , м	0.008
	Высота активной части обмотки l_a , м	0.06
	Высота обмотки l_k , м	0.069
	Толщина обмотки, δ_1 , м	0.0027
	Толщина обмотки, δ_2 , м	0.0033
	Толщина стенки внешнего сердечника магнитопровода, Δ , м	0.0015
	Средний радиус магнита, м	0.052
	Средний радиус внутренней обмотки, м	0.046
	Средний радиус внешней обмотки, м	0.057
	Радиусы магнитной системы ЛМЭП	

Продолжение табл. 5.7	
Радиус внутреннего сердечника магнитопровода, r_1 , м	0.045
Радиус внутренней обмотки, r_2 , м	0.048
Радиус магнита, r_3 , м	0.055
Радиус внешней обмотки, r_4 , м	0.059
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_5 , м	0.074
Параметры ЛМЭП	
Удельное электромагнитное усилие, Н	23.77
Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, А	287.02
Проводимость магнита на пару полюсов, Гн	$3 \cdot 10^{-6}$
Относительная проводимость воздушного зазора	1.37
Масса активной части ЛМЭП	
Масса магнита ЛМЭП, кг	2.1
Масса активной части обмотки на одну пару полюсов, кг	2.1
Суммарная масса магнита и активной части обмотки, кг	4.2
Индукция	
Индукция в нейтральном сечении магнита, Тл	0.5
Индукция в зазоре, Тл	0.53
Основные геометрические размеры магнитной системы ЛМЭП	
Высота магнита, λ , м	0.015
Длина магнита по оси намагничивания, d , м	0.042



Продолжение табл. 5.7	
Высота активной части обмотки l_a , м	0.016
Высота обмотки l_k , м	0.027
Толщина обмотки, δ , м	0.019
Толщина стенки внешнего сердечника магнитопровода, Δ , м	0.0046
Средний радиус магнита, м	0.023
Средний радиус обмотки, м	0.06
Радиусы магнитной системы ЛМЭП	
Радиус внутреннего сердечника магнитопровода, r_1 , м	0.007
Радиус обмотки, r_2 , м	0.051
Радиус магнита, r_3 , м	0.064
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_4 , м	0.074
Параметры ЛМЭП	
Удельное электромагнитное усилие, Н	23.77
Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, А	249.3
Проводимость магнита на пару полюсов, Гн	$2 \cdot 10^{-7}$
Относительная проводимость воздушного зазора	1

Продолжение табл. 5.7	
Радиус магнита, r_3 , м	0.056
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_4 , м	0.06
Параметры ЛМЭП	
Удельное электромагнитное усилие, Н	23.77
Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, А	154.3
Проводимость магнита на пару полюсов, Гн	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Относительная проводимость воздушного зазора	1

Описание рабочего процесса в ЛМЭП при установившихся колебаниях опытных образцов эластомеров связано с построением математических моделей отдельных подсистем привода, объединением этих моделей в общую математическую модель для всего привода и решением полученной системы уравнений при наличии уравнений связи между расчетными величинами и задании начальных условий и ограничений. Исходя из этого, для построения математической модели отдельных подсистем ЛМЭП и привода в целом примем следующие допущения:

- источником питания и системой управления ЛМЭП обеспечивается заданный закон изменения тока в обмотке двигателя, содержащий постоянную I_0 и переменную синусоидальную составляющую тока

$$I_{\text{ист}} = I_0 + I_m \sin(\tilde{\omega}t). \quad (5.53)$$

При этом несинусоидальная форма напряжения на зажимах источника питания неизвестна и в расчете требуется ее определение. Иными словами, в математической модели ЛМЭП источник питания и система управления замещаются идеальным управляемым источником тока;

- развиваемое на штоке ЛМЭП прижимное электромагнитное усилие и противо-ЭДС в обмотке двигателя не зависят от хода индуктора и определяются из выражений

$$F_{\text{ЭМ}}(t) = C_M i; e(t) = C_e \dot{\vartheta}, \quad (5.54)$$

где C_M , C_e постоянные, определяемые численным расчетом магнитного поля ЛМЭП. В пределах активной части обмотки двигателя распределение магнитного поля в рабочих зазорах конструкции двигателя слабо зависит от перемещения индуктора, поэтому среднее значение индукции можно принять постоянным;

- учитывая, что в конструкции магнитоэлектрического двигателя обмотка изготавливается из большого числа параллельно включенных секций, существенно уменьшающих ее эквивалентное индуктивное сопротивление, определяемое потоками рассеяния, а также слабость потоков рассеяния из-за значительных воздушных промежутков на путях их следования, будем считать в модели ЛМЭП индуктивность обмотки двигателя L_s постоянной величиной, не зависящей от хода индуктора;

- для учета вязкоупругих свойств нагрузки в модели ЛМЭП воспользуемся результатами синтеза многоконтурной схемы замещения напряженно деформированного состояния опытного образца эластомера, снятого по опыту релаксации напряжения при заданной деформации. Принимая во внимание небольшой разброс в значениях соответствующих сопротивлений и емкостей участков различных схем замещения, полученных для одного и того же опытного образца эластомера, но при разных фиксированных значениях деформации ε , будем использовать в математической модели ЛМЭП их усредненные значения для установленного стандартом испытаний вязкоупругих свойств эластомеров диапазона изменения прижимного усилия.

– уравнения движения индуктора

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{1}{m} (C_m i_{\text{ист}} - \sigma S - mg), \\ \frac{dx}{dt} &= \vartheta; \end{aligned} \quad (5.57)$$

где S – площадь поперечного сечения опытного образца эластомера, m – масса индуктора, x – ход индуктора.

- уравнения связи между токами (механические напряжения) и напряжениями (деформациями) на участках многоконтурной схемы замещения опытного образца эластомера

$$\begin{aligned} i &= \frac{u - u_{C0}}{R_0}, \quad i_1 = \frac{u_{C0} - u_{C1}}{R_1}, \dots, i_n = \frac{u_{C0} - u_{Cn}}{R_n}; \\ i_0 &= i - i_1 - \dots - i_n \end{aligned} \quad (5.58)$$

и, соответственно, между ходом индуктора x и полной относительной деформацией ε

$$x = \varepsilon \ell_0, \quad (5.59)$$

где ℓ_0 – высота опытного образца эластомера в ненагруженном состоянии.

Для исследования динамики ЛМЭП уравнения (5.53-5.59) необходимо объединить в систему и провести ее решение с использованием численных методов анализа жестких систем уравнений, характеризующихся большим диапазоном изменений постоянных времени, при нулевых начальных условиях и ограничениях:

$$0 \leq x(t) \leq 2x_m, \quad (5.60)$$

$$|u_{\text{ист}}| \leq U_{\text{доп}}, \quad (5.61)$$

где x_m – амплитуда хода индуктора; $U_{\text{доп}}$ – максимально допустимое напряжение на обмотке двигателя.

Разработанную математическую модель используем для расчета его динамических характеристик ЛМЭП при заданном законе изменения тока в обмотке двигателя $i_{\text{ист}} = 0.4 + 0.3\sin(62.8t)$. Расчет проведем для двух образцов эластомеров, имеющих различные свойства, обусловленные химическим составом (в состав эластомера входят различные марки технического углерода).

Параметры многоконтурной схемы замещения вязкоупругого испытуемого образца приведены в табл. 5.5.

На основе оптимизационного расчета по условию максимума прижимной силы на опытный образец в качестве базовой конструкции магнитной системы ЛМЭП была выбрана магнитная система с магнитами, намагниченными в радиальном направлении, с двумя воздушными каналами. Конструкция магнитной системы ЛМЭП представлена на рис. 5.14.

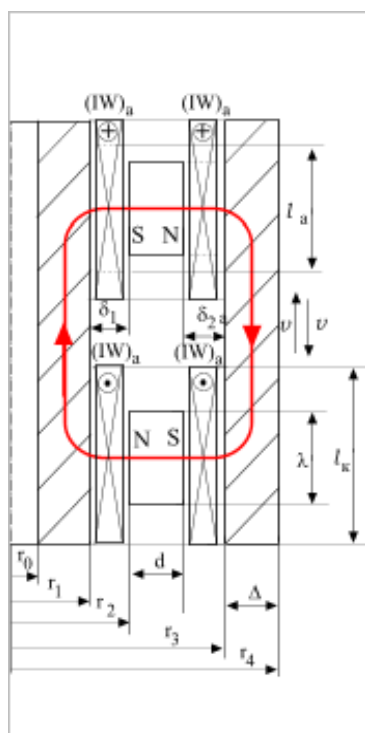


Рис. 5.14 Магнитная система ЛМЭД с двумя воздушными каналами и постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении

Для разработки макетного образца ЛМЭП на максимальное тяговое усилие 100 Н был проведен предварительный оптимизационный расчет его магнитной системы с определением основных геометрических размеров и обмоточных данных с помощью программного обеспечения «Выбор». Корректировка полученных из решения задачи оптимизации параметров проводилась с учетом результатов численного расчета магнитного поля ЛМЭП, благодаря которому уточненные значения параметров магнитной системы привода были использованы в программе SolidWorks по разработке 3D модели опытного макетного образца ЛМЭП (рис. 5.15, 5.16).

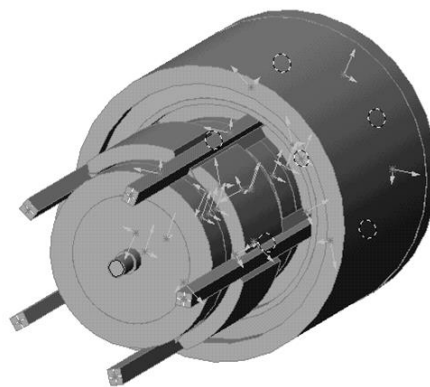


Рис. 5.15. Трехмерная модель магнитоэлектрического двигателя в программе SolidWorks.

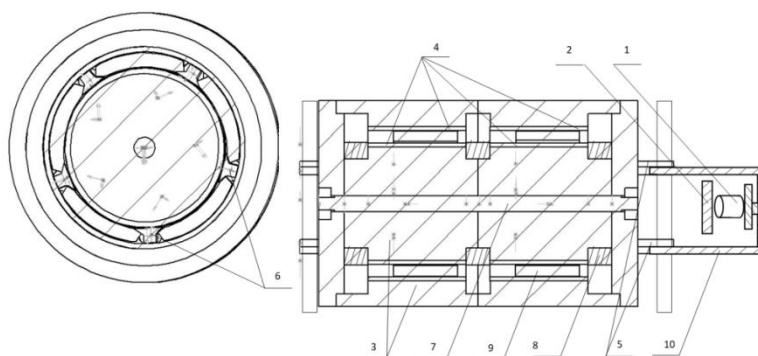
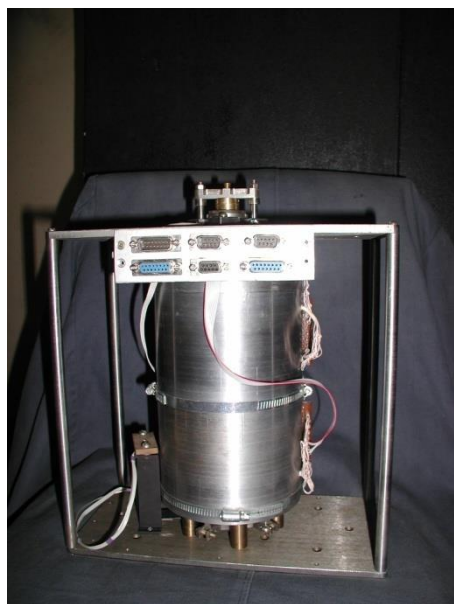


Рис. 5.16. Эскиз ЛМЭП: 1 – образец; 2 – неподвижный упор; 3 – внутренний и внешний магнитопроводы; 4 – две пары обмоток; 5 – подвижный индуктор, образованный пятью неферромагнитными рейками 6; 7 – центральная ось устройства; 8 – подшипники скольжения; 9 – магниты индуктора; 10 – прижимной шток.

Внешний вид макетного образца ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров приведен на рис. 5.17.

Основные технические характеристики используемого двигателя и устройства управления приведены в табл. 5.8 и табл. 5.9.



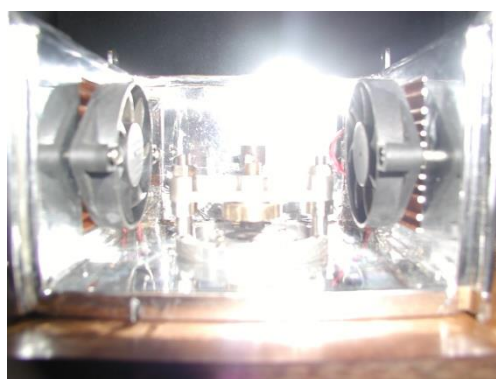
а)



б)



б)



г)

Рис. 5.17. Макетный образец ЛМЭП для испытаний вязко-упругих свойств эластомеров опытных образцов эластомеров: а – внешний вид привода; б, в – внешний вид привода в сборке с термокамерой; г - термокамера .

Основные технические характеристики базовой конструкции
магнитоэлектрического двигателя

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Максимальное электромагнитное усилие, $F_{эм}$	Н	100
Индукция в сердечнике, B_m	Тл	1.6
Амплитуда хода индуктора, x	м	0.005
Высота магнита, λ	м	0.054
Длина магнита по оси намагничивания, d	м	$7.9 \cdot 10^{-3}$
Высота активной части обмотки, l_a	м	0.06
Высота обмотки, l_k	м	0.07
Толщина внутренней обмотки, δ_1	м	$2.7 \cdot 10^{-3}$
Толщина внешней обмотки, δ_2	м	$3.3 \cdot 10^{-3}$
Средний радиус магнита	м	$5.18 \cdot 10^{-2}$
Средний радиус внутренней обмотки	м	$4.64 \cdot 10^{-2}$
Средний радиус внешней обмотки	м	$5.74 \cdot 10^{-2}$
Радиус внутреннего сердечника магнитопровода, r_1	м	$4.51 \cdot 10^{-2}$
Радиус внутренней обмотки, r_2	м	$4.78 \cdot 10^{-2}$
Радиус магнита, r_3	м	$5.57 \cdot 10^{-2}$
Радиус внешней обмотки, r_4	м	$5.9 \cdot 10^{-2}$
Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_5	м	$7.43 \cdot 10^{-2}$
Индукция в нейтральном сечении магнита	Тл	0.578
Индукция во внутреннем зазоре	Тл	0.586
Индукция во внешнем зазоре	Тл	0.474

(продолжение таблицы 5.8.)

Масса индуктора, m	кг	2.5
Активное сопротивление обмотки двигателя, $R_{обм}$	Ом	9.078
Индуктивность обмотки двигателя, L_s	Гн	0.038
Номинальное напряжение двигателя, U_D	В	24
Номинальная мощность двигателя, P_D	Вт	72
Величина созд. усил. на штоке двигателя, $F_{ЭМ}$	Н	50±25
Диапазон регулировки создаваемого усилия на штоке двигателя	Н	1...25
Частота колеб. штока двигателя	Гц	1 ÷ 25
Точность установки создаваемого усилия	%	±0.05
Форма периодического силового воздействия		синусои- дальная
Наружный контроль температуры образца в диапазоне	°С	0÷160.
Точность измерения температуры	°С	0.5
Дискретность измерения температуры	°С	0.1

Таблица 5.9.

Технические характеристики устройства управления

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Диапазон измеряемого коэффициента упругости	о.е.	0.1÷1.0
Точность измерения коэффициента упругости	%	±0.05
Диапазон измерения тангенса угла потерь	о.е.	0 ÷ 1.0
Точность измерения тангенса угла потерь	%	1.0

На основе численного расчета магнитного поля при различных положениях индуктора были получены средние значения коэффициентов для определения тягового усилия и противо-ЭДС обмотки линейного магнито-электрического двигателя $C_e = 76.677$ и $C_m = 79.577$. Параметры испытуемых цилиндрических образцов эластомеров в ненагруженном состоянии: диаметр, высота и площадь поперечного сечения равны соответственно $d = 0.01$ м, $\ell_0 = 0.01$ м, $S = 7.853 \cdot 10^{-5}$ м². Для шестиконтурной схемы замещения опытного образца эластомера система уравнений преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{\text{ист}}}{dt} = \frac{1}{L_{\text{обм}}} (u_{\text{ист}} - i_{\text{ист}} R_{\text{обм}} - e_{\text{дв}}) \\ \frac{d\varepsilon_0}{dt} = \frac{1}{\lambda_0} [E_0(\varepsilon - \varepsilon_0) - E_1(\varepsilon - \varepsilon_1) - E_2(\varepsilon - \varepsilon_2) - E_3(\varepsilon - \varepsilon_3) - E_4(\varepsilon - \varepsilon_4) - E_5(\varepsilon - \varepsilon_5)], \\ \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{E_1}{\lambda_1} (\varepsilon_0 - \varepsilon_1), \\ \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{E_2}{\lambda_2} (\varepsilon_0 - \varepsilon_2), \\ \frac{d\varepsilon_3}{dt} = \frac{E_3}{\lambda_3} (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) \\ \frac{d\varepsilon_4}{dt} = \frac{E_4}{\lambda_4} (\varepsilon_0 - \varepsilon_4) \\ \frac{d\varepsilon_5}{dt} = \frac{E_5}{\lambda_5} (\varepsilon_0 - \varepsilon_5) \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{m_{\text{я}}} (F_{\text{эм}} - F_{\text{эл}} - m_{\text{з}} g) \\ \frac{dx}{dt} = \vartheta, \end{array} \right. \quad (5.62)$$

Сравнение вариантов расчета динамических характеристик ЛМЭП с различными опытными образцами эластомеров проведем при заданном значении тока в обмотке двигателя и температуре испытаний рис. 5.18, 5.19. Расчет динамических характеристик ЛМЭП выполнен на основе решения системы уравнений (5.62) с использованием программы написанной в программе MatLab.

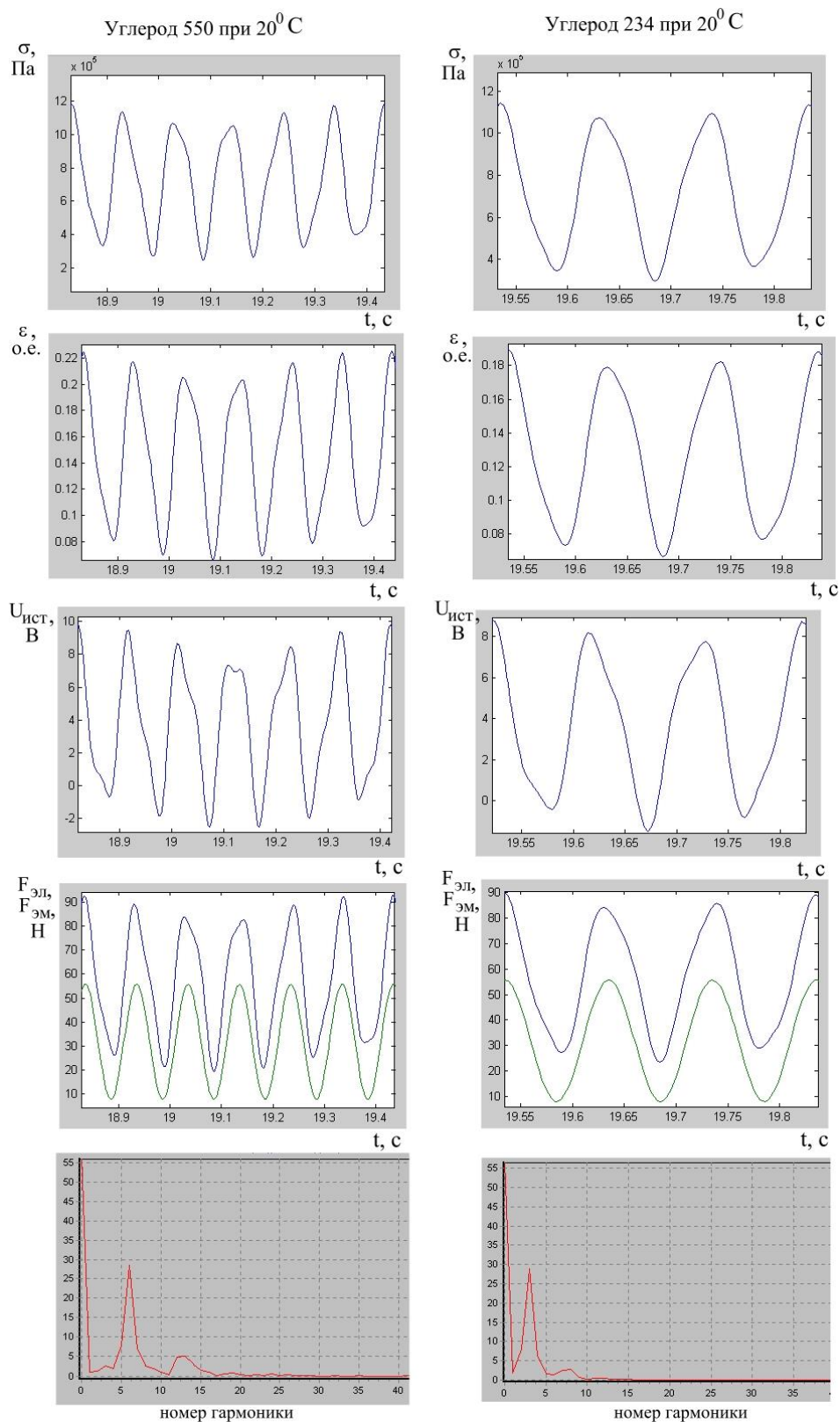


Рис. 5.18. Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП при температуре испытаний образцов, содержащих различные марки технического углерода П-550 и П-234 (вид справа), равной 20⁰С.

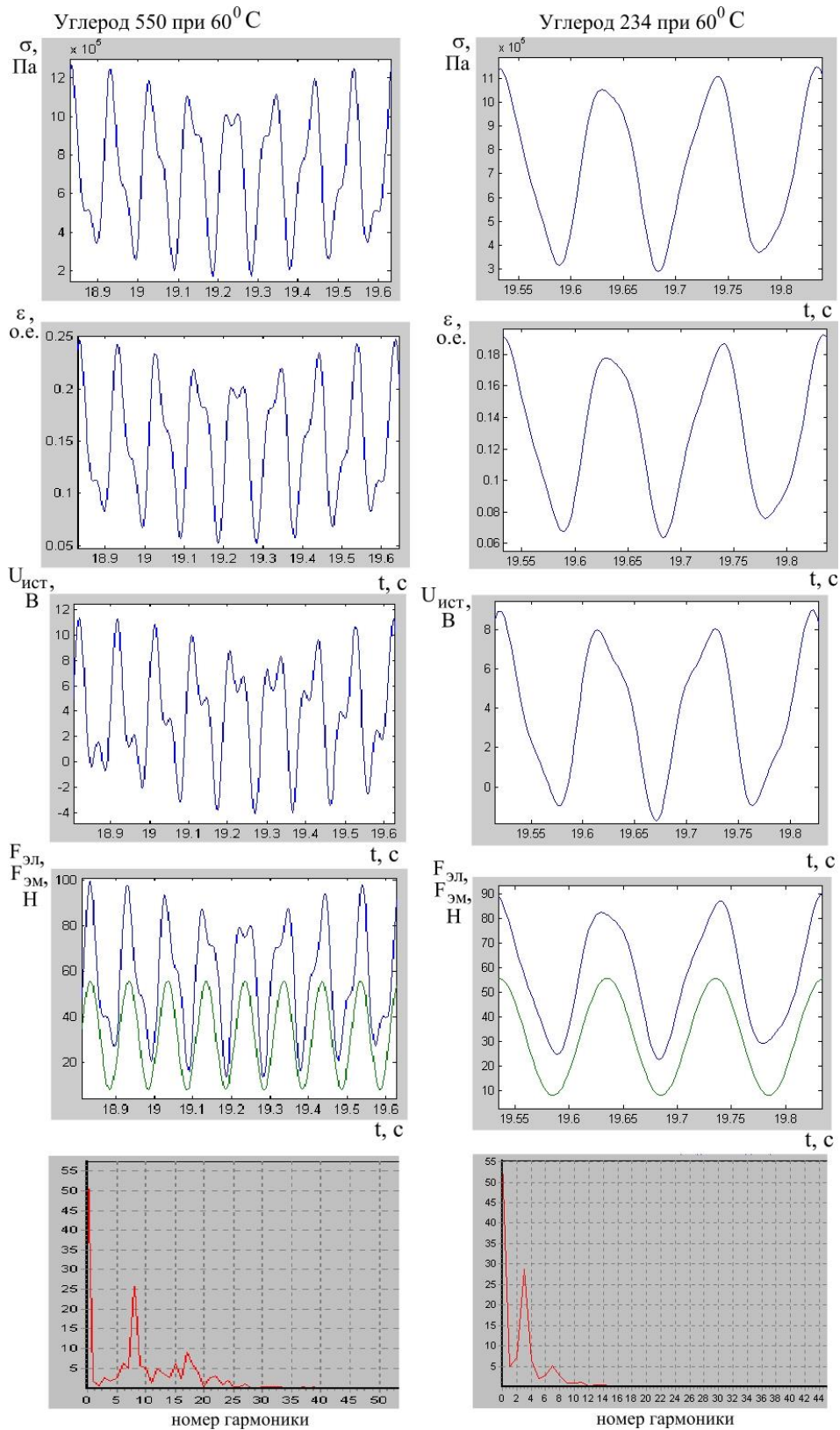


Рис. 5.19. Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП при температуре испытаний образцов, содержащих различные марки технического углерода П-550 и П-234 (вид справа), равной 60⁰ С.

Особенности разработанной модели согласуются с использованием численных методов расчета жестких систем уравнений, что делает возможным применение модели ЛМЭП для исследования динамических характеристик привода и определения реологических характеристик опытных образцов эластомеров при разложении расчетных временных зависимостей механической силы и деформации в ряд Фурье (табл. 5.10).

Таблица 5.10

Реологические характеристики
опытных образцов эластомеров с различным наполнителем
технического углерода П-550 и П- 234 при температуре испытаний $T^{\circ}\text{C}$

№	Параметр	Условное обозначение	Техуглерод П-550		Техуглерод П-234	
			$T = 20^{\circ}\text{C}$	$T = 60^{\circ}\text{C}$	$T = 20^{\circ}\text{C}$	$T = 60^{\circ}\text{C}$
1	Динамический модуль упругости, МПа	$ E $	5.84	5.62	6.87	6.67
2	Модуль упругости, 10^3 Н/м	$K_y(1)$	45.9	44.1	54.0	52.4
3	Модуль вязкости, 10^3 Н/м	$K_B(1)$	0.27	0.046	0.633	0.397
4	Тангенс угла механических потерь, 10^{-3}	$\text{tg}(\delta)$	5.95	1.04	11.74	7.57

Расчет динамических характеристик ЛМЭП при испытании опытных образцов наполненных техническим углеродом марок П-550 и П-234 отражает адекватность математической модели физическим процессам протекающих в различных подсистемах привода, что подтверждается уточнением решения задачи оптимизации конструкции привода и накопленным опытом проектирования при создании экспериментального макетного образца ЛМЭП на основе разработанных в диссертации расчетных методик.

5.3. Обоснование базовой конструкции, моделирование и экспериментальное исследование тихоходного длинноходового СДПМ в составе привода поршневых компрессорных ступеней для сжатия холодильных агентов и криогенных газов.

Современные установки для получения средних и высоких давлений нагнетания, такие как многоступенчатые мембранные и поршневые агрегаты, компрессоры периодического действия сложны из-за наличия большого количества деталей, имеют большие массогабаритные параметры, не позволяют работать длительное время [106, 163, 164, 175, 219].

Один из путей совершенствования компрессорных агрегатов с небольшой производительностью, обеспечивающих величину давления нагнетаемого газа 2 МПа и более, является применение длинноходовых тихоходных поршневых ступеней с линейным гидравлическим приводом [78, 176].

Существенная неравномерность величины мгновенной мощности поршневых компрессорных агрегатов за время его рабочего цикла создаёт известные проблемы при подборе и эксплуатации приводных двигателей. Как правило, они решаются за счёт установки маховика. В одноступенчатых компрессорных агрегатах с линейным приводом на базе тихоходных длинноходовых ступеней амплитудное изменение газовой силы за время рабочего цикла существенно выше. Это приводит к такому возрастанию амплитудного изменения мгновенной мощности привода, что применение маховика становится нецелесообразным.

Особенностью поршневых длинноходовых тихоходных компрессорных агрегатов является увеличение параметра $\psi = S/D > 10$; время цикла $N = 2 \dots 6$ с. Такие параметры при давлении нагнетания 2 МПа и выше, как предполагается, позволят наряду с повышением теплоотвода от сжимаемого газа за счёт увеличения времени цикла и более развитой внутренней поверхностью

теплообмена (вытянутый цилиндр), а также с обеспечением рационального режима движения выходного звена снизить пиковые значения потребляемой мощности. Такая ступень может быть максимально приближена к ступени с изотермическим циклом или, по крайней мере, позволит в допустимых пределах температур нагнетания сжимать газ до высоких давлений в одной ступени.

В настоящее время получены результаты лабораторно-экспериментальных исследований, подтверждающие возможность повышения давления газа в одной компрессорной ступени в 100 раз и более без превышения допустимых ограничений по величине температуры нагнетания. При этом изменение величины газовой силы за цикл в тихоходной длинноходовой ступени может в 20 раз и более превышать этот параметр современных аналогов. Снижение нагрузки на приводной двигатель за счёт установки маховика в таких агрегатах нецелесообразно поскольку приводит к росту массы и габаритов всего агрегата, что сводит на нет полученные преимущества перед существующими многоступенчатыми компрессорными агрегатами.

Проведённые исследования Л.С. Понтрягина, А.А. Фельдбаума, Н.Н. Красовского, А.Н. Волкова, О.Н. Мацко [29] показали, что для различных приводов технологических машин существуют энергосберегающие законы движения.

Учитывая, что наибольшее распространение в промышленности получили длинноходовые поршневые компрессоры, использующие гидравлический тип двигателя, для обоснования базовой конструкции СДПМ тихоходных длинноходовых одноступенчатых поршневых компрессоров, укажем ряд преимуществ по сравнению с приводами гидравлического действия:

- сложность конструктивного исполнения механической и гидравлической подсистемы;
- ограниченные условия эксплуатации, определяемые диапазоном рабочих температур, особенно при отрицательных значениях температуры окружающей среды;
- необходимость обеспечения целостности гидравлической подсистемы, сложность реализации заданного, например, несинусоидального закона движения подвижной поршня компрессора.

Вместе с тем применение СДПМ в составе привода длинноходового поршневого компрессора ограничивалось необходимостью применения высокоэнергетических постоянных магнитов, а также проектирования длиной распределенной обмотки, что в свою очередь, повышает электрические потери и снижает КПД.

Предварительные расчёты показали, что закон перемещения поршня может существенно влиять и на эффективность рабочего процесса поршневых тихоходных длинноходовых ступеней [174, 218]. Однако вопросы синтеза энергосберегающих законов движения и снижения при этом неравномерности изменения мгновенной мощности применительно к компрессорным агрегатам с линейным приводом в доступных источниках информации не рассматривались. Неоднозначная функциональная взаимосвязь между эффективностью рабочего процесса компрессорной ступени, интегральными характеристиками и законом движения штока компрессора делает актуальным исследование их взаимосвязи и возможности улучшения энергетических и динамических характеристик одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным магнитоэлектрическим двигателем.

На рис. 5.20 представлена конструкция бессмазочной квазиизотермической компрессорной ступени с указанием габаритных размеров. Компрессорная ступень разработана коллективом кафедры

«Компрессорная и холодильная техника и технология» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

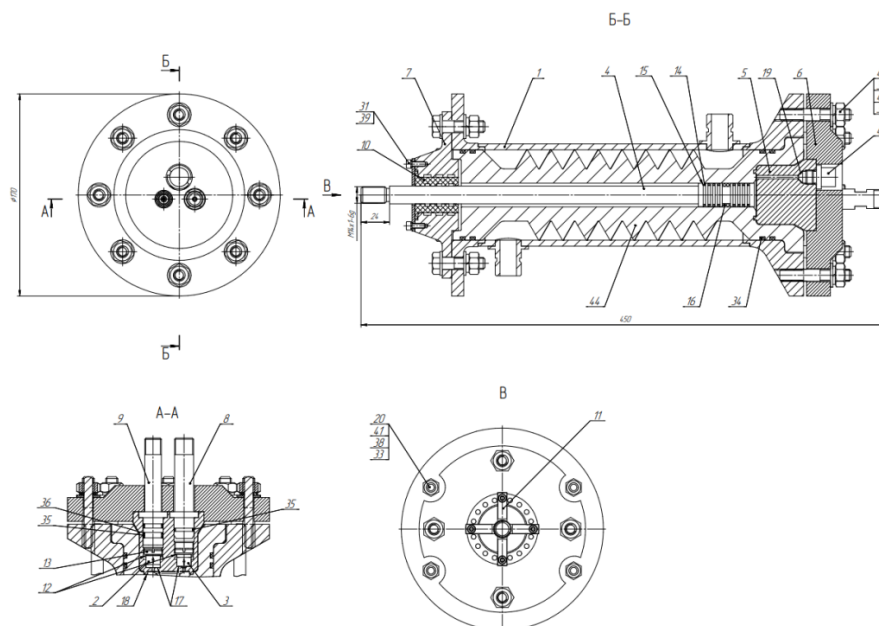


Рис. 5.20. Ступень поршневого компрессора: 1 – цилиндр, 2 – нагнетательный клапан, 3 – всасывающий клапан, 4 – поршень, 5 – втулка, 6,7 – фланец, 8 – всасывающий штуцер, 9 – нагнетающий штуцер, 10 – направляющая, 11 – прижим, 12 – шайба, 13 – гайка, 14, 16, 34,35 – кольцо, 15 – экспандер, 17,18,19 – прокладка, 20 – шпилька, 30 – болт, 31 – винт, 32,33 – гайка, 36 – защитное кольцо, 37,38,39,40,41 – шайба, 42 – шпилька, 43 – датчик Д60М -3Т, 44 - гильза.

На рис. 5.21 представлен макетный образец ступени поршневого компрессора [25, 176].



Рис. 5.21. Макетный образец бесмазочной квазиизотермической ступени

Рассматриваемые рабочие параметры: диаметр цилиндра компрессорной ступени и гидроцилиндра - 0,02 м; ход поршня – 0,2 м; диаметр штока 0,02 м; тип клапанов – тарельчатые; температура всасывания – 290 К, давление всасывания – 0,1 МПа, давление нагнетания – 2 МПа; физические условия – сжимаемый газ - воздух; время рабочего цикла – 2...4 с.

При разработке методики расчёта поршневой ступени приняты следующие допущения:

- газовая среда непрерывна и гомогенна, моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистатичны, параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объёму рабочей камеры;
- изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало;
- теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу;
- параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны;
- течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным;
- теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный; коэффициент теплоотдачи в каждый момент времени одинаков на всех внутренних поверхностях рабочей камеры.

Полученные соотношения из решения задачи оптимизации исследуемых магнитных систем ЛМЭП по максимуму тягового усилия были использованы при разработке программы «Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения». Главное окно программы приведено на рис. 5.22 [123]. Методика расчета геометрии магнитной системы тихоходного СДПМ на заданный закон движения индуктора ЛМЭП одноступенчатого поршневого компрессора приведена в (Приложении 7).

Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения

Исходные данные к расчету		Общие расчетные параметры ЛМЭД		Расчетные параметры индуктора	
Диаметр поршня, мм	20	Площадь поперечного сечения поршня, м ²	0,000314	Масса медного провода (активной части витков обмотки), кг	21,30
Создаваемое давление, 10 ⁶ Па	1,2	Максимальное прижимное усилие, Н	2513,274	Полное число витков витков	16372
$i_{\text{н}} \cdot \text{кВт/л}$	0,75	Средняя обмоточная длина обмотки, м	0,41	Площадь занятой обмоткой с током, м ²	0,00580
Среднее значение индукции, Тл	0,5	Максимальная потребляемая мощность, Вт	2368,71	Уточненное значение плотности тока, 10 ⁶ А/м ²	2,82
Частота, Гц	3	Оптимальные соотношения		Площадь занятой обмоткой с током, м ²	0,011
Половина хода якоря, м	0,1	К _{опт1}	1,13	Площадь занятой обмоткой с током, м ²	0,00136
Линейная тактовая нагрузка, 10 ⁴ А/м	4	К _{опт2}	1,047	Площадь катушки с учетом коэф. заполнения, м ²	0,00068
Значение остаточной индукции, Тл	1,3	Величина воздушного зазора, м	0,0283	Площадь поперечного сечения провода, м ²	2,5E-0006
Корректирующий коэффициент, 10 ³ А/м	995	$\frac{r_1}{r_2}$	1,047	Ток в обмотке, А	7,634
Плотность меди, кг/м ³	8900	Напряжение питания, В	310,281	Число витков активной части обмотки	2144,757
Плотность сплава постоянного магнита	7500	Относительные потери, о.е.	0,081	Число витков катушки	388,056
Плотность тока, 10 ⁶ А/м ²	3	Предельно допустимый КПД	92,49	Сопротивление обмотки, Ом	7,621
Коэффициент заполнения по меди	0,5	Масса постоянных магнитов	21,30	[Кнопка: Расчет]	
Форма постоянного магнита	СЭ-60x25			[Кнопка: Выход]	
Число катушек обмотки якоря на пару полюсов	8				
Число постоянных магнитов на пару полюсов	8				
Марка обмоточного провода	ПЭТВ-2				
Коэффициент полного перекрытия	0,7				

Рис. 5.22. Главное окно программного обеспечения по оптимальному проектированию тихоходного СДПМ для ЛМЭП поршневого компрессора.

Окно программы содержит информацию о параметрах марок сплавов высокоэнергетических постоянных магнитов и исходные данные для оптимизации магнитной системы привода.

Исходные данные к расчету магнитной системы СДПМ приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11.

Исходные данные к расчету магнитной системы СДПМ

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	2,5
Частота, Гц	0,25..3
Номинальное напряжение, В	220
Число фаз	1
Число пар полюсов	24
Развиваемое тяговое усилие, Н	2000
Диаметр поршня, мм	20
Создаваемое давление, МПа	1,2

Продолжение табл. 5.11

Среднее значение индукции в зазоре, Тл	0.5
Половина хода индуктора, мм	100
Линейная токовая нагрузка, А/м	4 104
Коэрцитивная сила, кА/м	955
Коэффициент заполнения по меди	0.5
Число катушек обмотки якоря на пару полюсов	8
Число постоянных магнитов на пару полюсов	8
Марка обмоточного провода	ПЭТВ-2
Коэффициент полюсного перекрытия	0.8

Результаты расчета приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12.

Предварительный расчет выходных характеристик ЛМЭД и массогабаритных параметров его магнитной системы

Наименование параметра	Значение
Максимальное развиваемое усилие, Н	2513
Максимальная потребляемая мощность, кВт	2.3
Оптимальное отношение массы обмотки к массе магнита	1
Оптимальное отношение высоты зазора к высоте пост. магн.	1.13
Величина воздушного зазора, мм	28.3
Предельно допустимый КПД	92.49
Масса постоянных магнитов	21.3
Полное число ампер-витков	16373
Площадь, занятая обмоткой с током, м ²	0.0058
Ток в обмотке, А	7.63
Число витков активной части обмотки	2144.75
Число витков катушки	268
Сопротивление обмотки, Ом	7.62

Используя результаты оптимизационного расчета магнитной системы СДПМ выполнена разработка его твердотельной модели (рис. 5.23) в программном обеспечении SolidWorks 2020 [102].

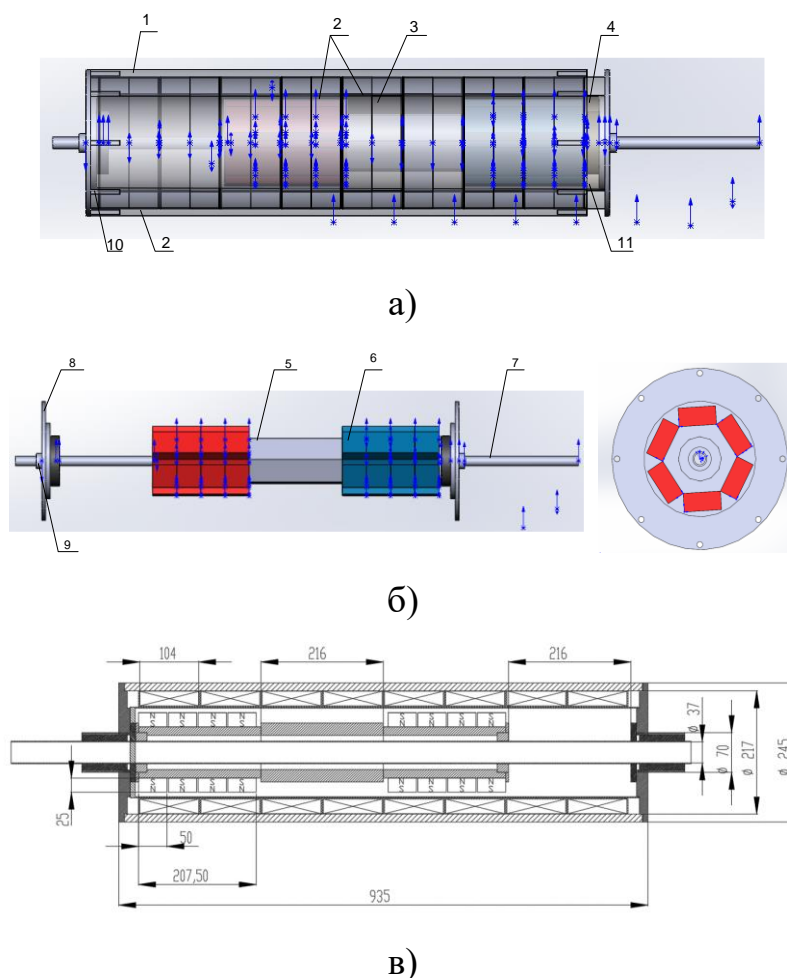


Рис. 5.23. Магнитная система СДПМ: а – твердотельная модель в сборе; б – твердотельная модель индуктора, в – конструкция магнитной системы: 1- статор, 2 – обмотки, 3 – катушки (секционированная обмотка), 4 – ограничительные упорные кольца, 5 – подвижный индуктор, 6 – постоянные магниты, 7 – шток, 8 – крышки; 9 – подшипник качения (линейного перемещения), 10 – крепежные элементы; 11 – неферромагнитный цилиндр с закрепленными обмотками.

Функциональным элементом агрегата является тихоходная длинноходовая компрессорная ступень без смазки рабочей камеры [104, 175].

Управление СДПМ одноступенчатого поршневого компрессора может быть реализовано от источника выпрямленного напряжения с возможностью переключения катушек (рис. 5.24, а) и питание обмотки от управляемого частотного преобразователя с применением широтно-импульсной модуляции (рис. 5.24, б).

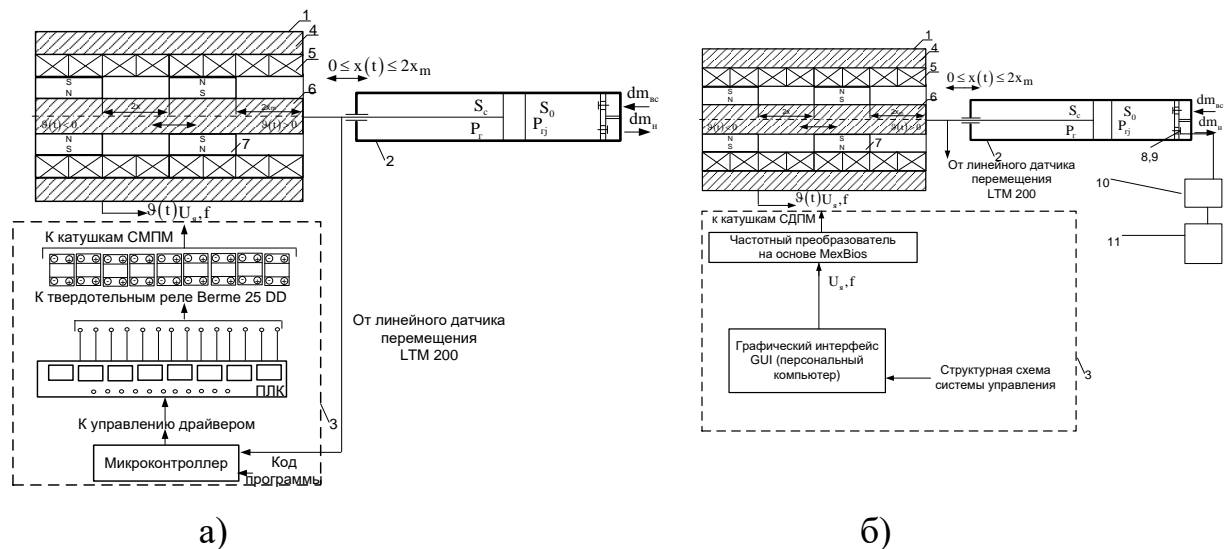


Рис. 5.24. Система управления ЛМЭП с возможностью переключения обмоток (а), схема присоединения частотного преобразователя с открытым программным кодом MexVios (б): 1 – тихоходный СДПМ, 2 – компрессорная ступень, 3 – система управления, 4 – внешний магнитопровод, 5 – обмотка СДПМ, 6 – внутренний магнитопровод, 7 – постоянные магниты, 8 – датчик давления, 9 – датчик температуры, 10 – усилитель, 11 – цифровой осциллограф.

Экспериментальный макетный образец ЛМЭД для тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора представлен на рис. 5.25.

Основные массогабаритные размеры СДПМ: длина в сборе 0.997 м, длина индуктора 0.667 м (включая шток).

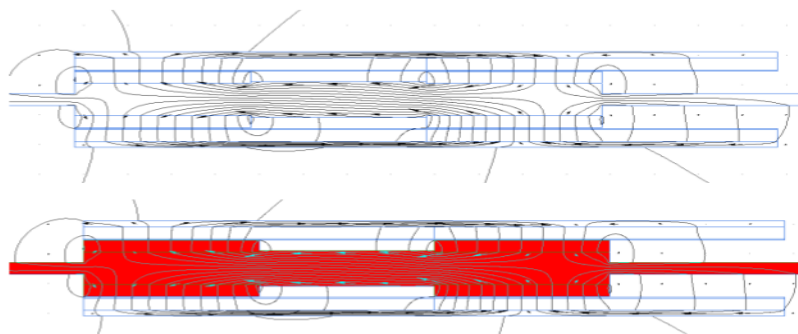


а)

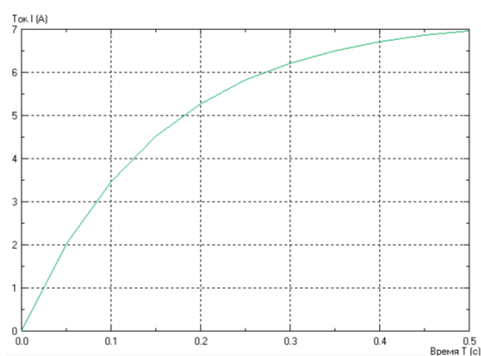
б)

Рис. 5.25. Макетный образец СДПМ для привода поршневого компрессора: а – в сборе, б – индуктор СДПМ.

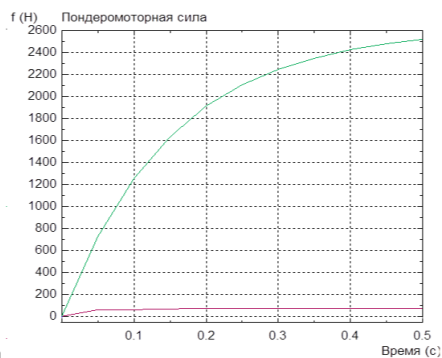
Для создания максимального значения тягового усилия СДПМ $F_{ЭМ} = 2000\text{Н}$ (условие технического задания) конструктивно реализуемы магнитные системы СДПМ с постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении.



а)



б)



в)

Рис. 5.27. Расчет силовых линий магнитного поля (а) и пусковые характеристики СДПМ в составе привода (б, в) в программе ELCUT.

На рис. 5.27 представлены картины магнитного поля (а), а также временные зависимости тока и развиваемого тягового усилия. Результаты

исследования магнитного поля подтверждают реализуемость на макетном образце СДПМ заданного электромагнитного усилия 2000 Н при ходе поршня 200 мм. На рис. 5.28 представлены экспериментальные статические характеристики электромагнитного усилия при различных комбинациях работы катушек якоря в макетном образце тихоходного СДПМ. Протокол испытаний развиваемого электромагнитного усилия СДПМ для различного количества присоединенных катушек приведен в Приложении 9.

Параметры обмотки тихоходного СДПМ: активное сопротивление одной катушки 4 Ом, индуктивность 102 мГн. Испытание параметров обмотки при различном положении индуктора приведено в Приложении 10.

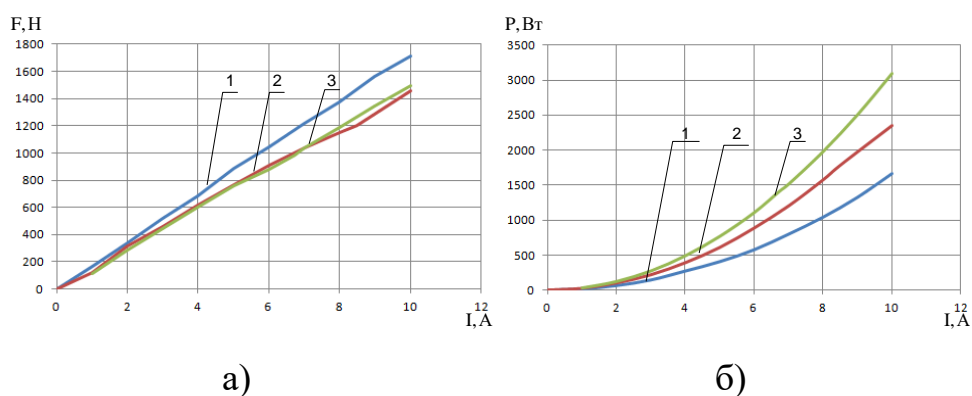


Рис. 5.28. Статические характеристики линейного СДПМ при различном количестве последовательно соединенных катушек якоря (1 – 4 катушки, 2 – 6 катушек, 3 – 8 катушек): а – электромагнитное усилие, б – потребляемая СДПМ мощность.

Диаграмма работы и схемы включения четырех катушек СДПМ приведены на рис. 5.29.

Описание рабочего процесса в ЛМЭП одноступенчатого поршневого компрессора при установившемся режиме связано с построением математической модели, описывающей процессы в электромагнитной и механической его подсистемах.

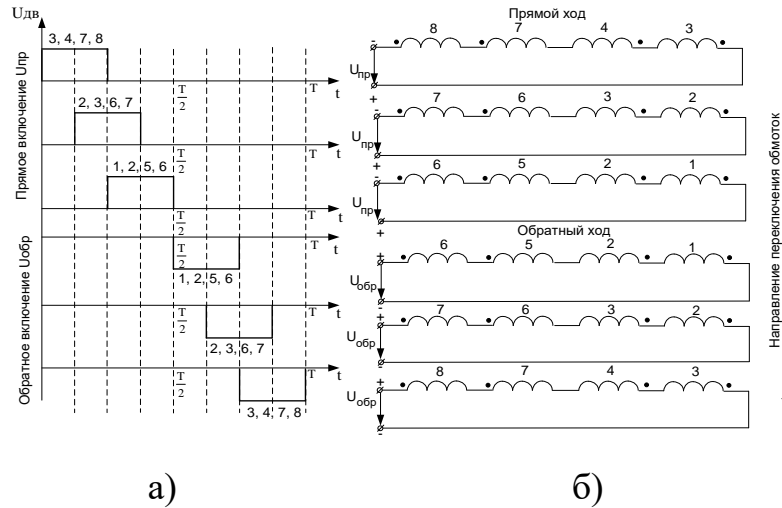


Рис. 5.29. Временная диаграмма работы (а) и схемы присоединения катушек (б).

Математическая модель ЛМЭП включает в себя:

- уравнение электрического состояния обмотки линейного магнитоэлектрического двигателя

$$i_{\text{ист}} R_{\text{обм}} + L_{\text{обм}} \frac{di_{\text{ист}}}{dt} + C_e \vartheta = u_{\text{ист}}, \quad (5.63)$$

уравнения движения индуктора

$$m \frac{d\vartheta}{dt} = C i_{\text{ист}} - F_c, \quad (5.64)$$

$$\frac{dx}{dt} = \vartheta$$

при уравнениях связи и ограничениях мощности компрессора и двигателя

$$P_k = m \frac{d^2 x}{dt^2} \frac{dx}{dt}; \quad P_d = \frac{F_{\text{эм}}(t) \frac{dx}{dt}}{\eta}. \quad (5.65)$$

при уравнении связи

$$F_c = \frac{x_k^{1.4} \cdot 10^5}{(x_k - x)^{1.4}} \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{и заданных условиях ограничения } 0 \leq x(t) \leq 2x_m,$$

$|u_{\text{ист}}| \leq U_{\text{доп}}$, где x_m - амплитуда хода индуктора; x - координата положения индуктора; m - масса поступательно движущихся частей агрегата (поршня

компрессорной ступени); x_K – координата крайнего положения индуктора; P_K – мощность компрессора; P_D – мощность СДПМ; $U_{доп}$ – максимально допустимое напряжение на обмотке двигателя; η – КПД СДПМ. При $x \geq x_K$ скорость индуктора $\vartheta = 0$.

Разработанную математическую модель ЛМЭП используем для расчета его динамических характеристик СДПМ (рис. 5.30).

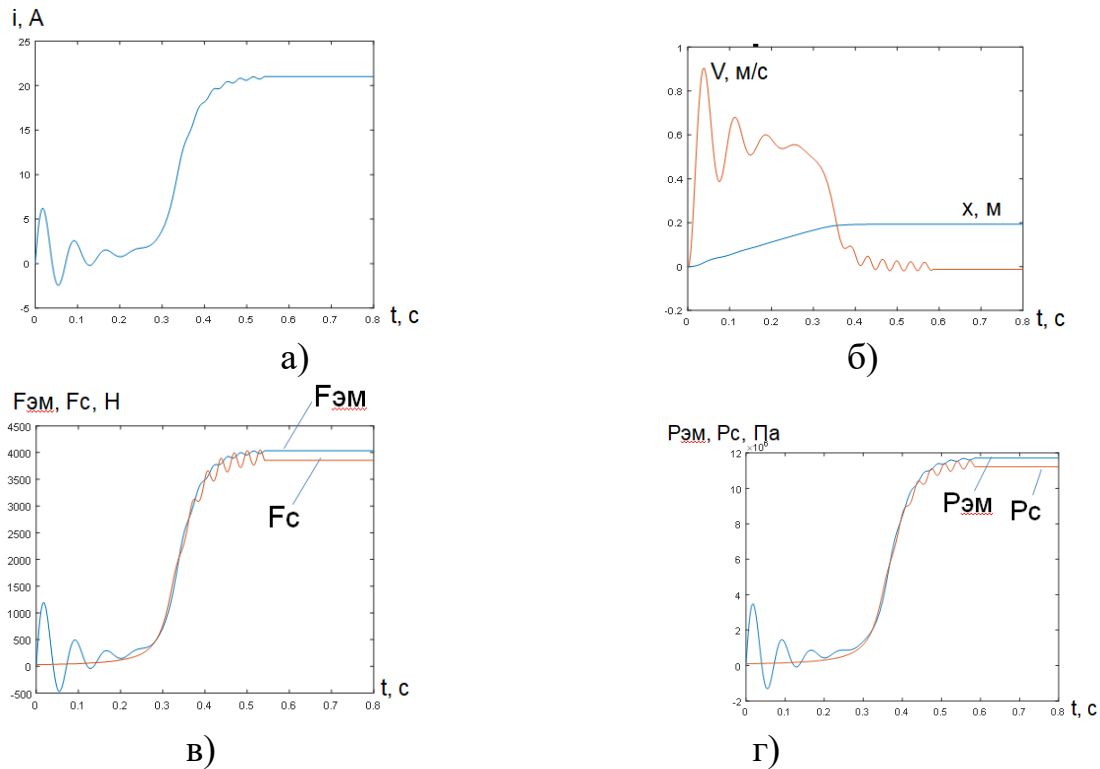


Рис. 5.30 Динамика пусковых характеристик ЛМЭП: а – ток в обмотке, б – скорость перемещения индуктора, в – развиваемое тяговое усилие, г – создаваемое давление в цилиндре.

На основе численного расчета магнитного поля при различных положениях индуктора были получены средние значения коэффициентов для определения тягового усилия и против-ЭДС обмотки СДПМ $C = B_{\delta} l_{инд} W = 192$.

Расчет динамических характеристик ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора проведем на математической модели, представленной на рис. 5.31.

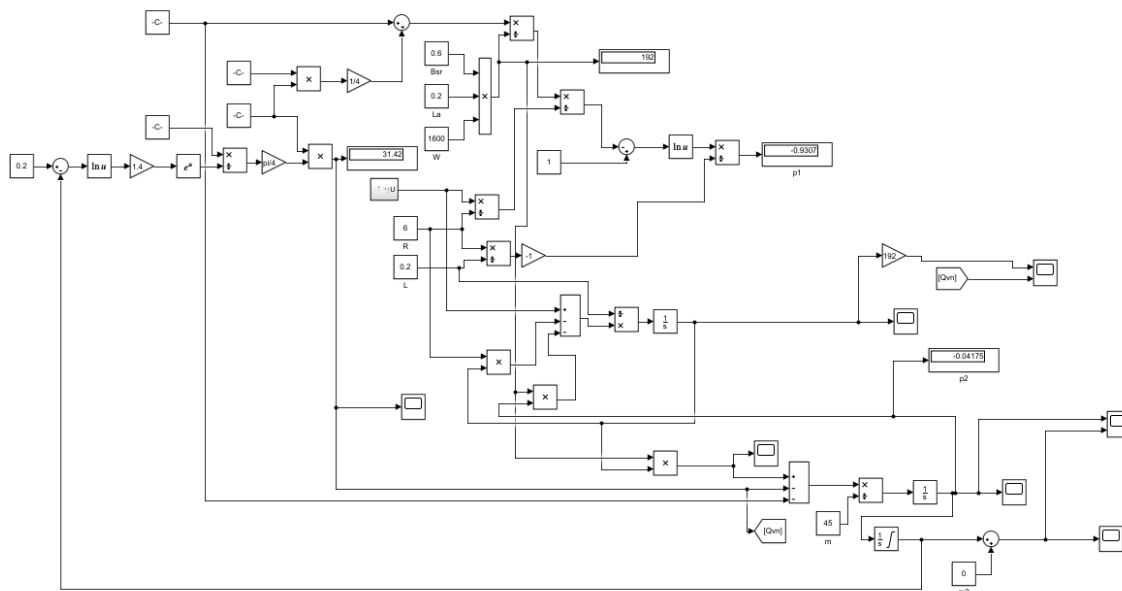


Рис. 5.31. Математическая модель для расчета динамики эксплуатационных характеристик тихоходных поршневых компрессорных ступеней

При выполнении учитывался резко нелинейный процесс сжатия газа, в цилиндре: по мере движения поршня давление в камере возрастает и при достижении крайнего положения поршня давление в цилиндре максимально. В математической модели не учитывается утечки через клапаны впуска/выпуска, а также утечки через поршень. Ход поршня ограничен условием $0 \leq x \leq 2x_m$. Необходимость достижения заданной крайней точки хода $x = 2x_m$ обуславливает высокое значение давления, достигающее 10^7 Па. В этой точке при расчете динамики ЛМЭП результаты расчета носят колебательный характер, который во многом обусловлен решателем системы дифференциальных уравнений. Последнее обстоятельство делает необходимым применение методов расчета, ориентированных на жесткие системы дифференциальных уравнений.

Результаты расчета динамических характеристик приведены на рис. 5.32.

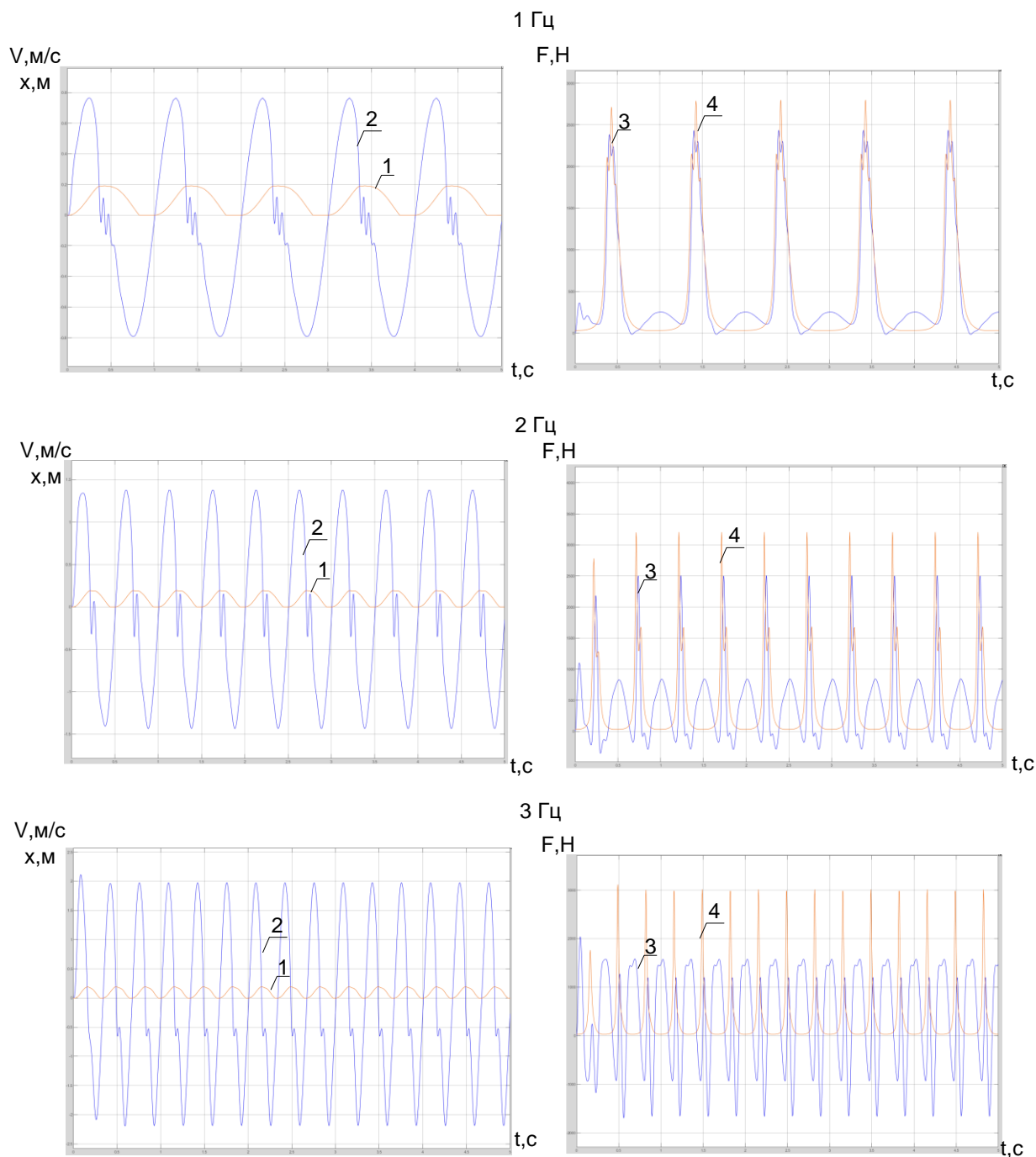


Рис. 5.32. Динамические характеристики ЛМЭП: 1 – ход индуктора; 2–скорость перемещения индуктора; 3 – развиваемое электромагнитное усилие; 4 – сила сопротивления сжимаемого газа в ступени.

Анализ динамических характеристик тихоходного СДПМ в составе ЛМЭП тихоходного поршневого компрессора с одной ступенью, полученных в результате моделирования, указывает на возможность получения тягового электромагнитного усилия 3000 Н при частоте движения индуктора 0.5 - 3 Гц.

5.4. Выводы.

1. На основе решения задачи оптимизации разработана методика оптимального проектирования тихоходных СДПМ в составе ЛМЭП, предназначенных для испытания реологических свойств эластомеров, и одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора удовлетворяющих выбранным критериям оптимальности, получены оптимальные соотношения $n_{\text{опт}}$ и $k_{\text{мопт}}$ для рассматриваемых вариантов исполнения тихоходных СМПМ.

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее выполнить оптимизационные расчеты конструкции магнитных систем тихоходных СМПМ, предназначенных для работы в электромеханических колебательных системах в составе ЛМЭП.

3. Выполнена техническая реализация макетного образца тихоходных СМПМ в составе ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и одноступенчатого поршневого компрессора.

4. Разработаны имитационные модели оптимальных конструкций СДПМ и проведена их верификация в составе ЛМЭП.

5. На основе имитационного моделирования и экспериментального исследования получены пусковые и эксплуатационные характеристики ЛМЭП удовлетворяющие требованию технического задания.

6. Результаты исследований подтверждают энергоэффективность ЛМЭП с тихоходными СДПМ для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора на основе предложенных конструкций тихоходных СМПМ (электромагнитный КПД в установившемся режиме не ниже 82%, развиваемое усилие соответствует требованиям технического задания на разработку ЛМЭП).

ГЛАВА 6. АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.

6.1. Принцип управления тихоходными СГПМ модульного типа на основе нейронной сети.

Пусковые и установившиеся процессы ветроэнергетической установки зависят от многих внутренних и внешних факторов, к числу которых можно отнести особенности конструктивного исполнения ветроколеса и СГПМ, ветровой нагрузки географического расположения ВЭУ, характер и параметры присоединенной мощности. Внешние факторы, оказывающие влияние на работу ВЭУ, ввиду особенности назначения, являются сложнопрогнозируемыми, что обуславливает задачу создания ВЭУ как ВЭТК сложной, жестко подчиненной условиям эксплуатации в конкретный момент времени.

В главе 2 показано, что СГПМ модульного типа имеет возможность функционирования при различных комбинациях включенных/отключенных ЭМ (рис.), кроме этого выходное напряжение рассматриваемого типа СГПМ очень близко к синусоидальной форме (коэффициент несинусоидальности менее 1%), таким образом практическое применение СГПМ модульного типа совместно с корректором коэффициента мощности предпочтительно при изменении ветровой нагрузки и присоединенной к СГПМ электрической мощности, что в свою очередь позволит уменьшить негативное влияние внешних факторов.

Используя разработанную математическую модель в программном комплексе ANSYS Maxwell 16.0 можно построить эксплуатационную характеристику выходного напряжения СГПМ модульного типа в режиме холостого хода при различном количестве ЭМ.

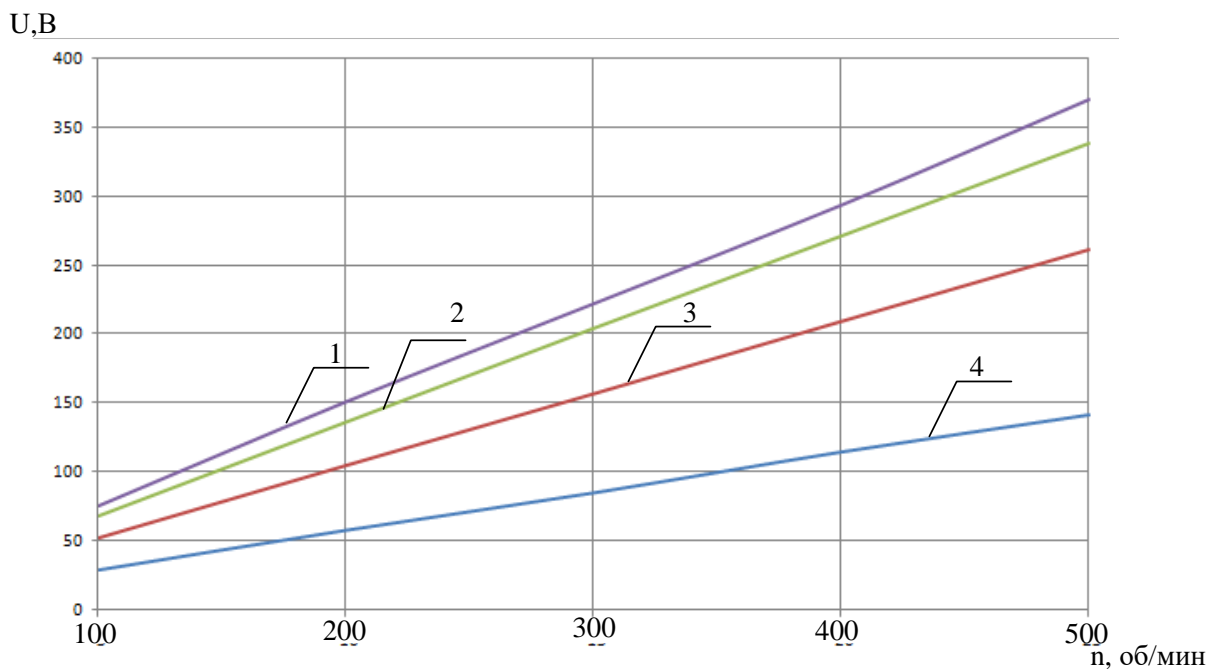


Рис. 6.1. Зависимость выходного напряжения СГПМ в зависимости от количества включенных ЭМ (режим холостого хода):

1 – 8 ЭМ; 2 – 6 ЭМ; 3 – 4 ЭМ; 4 – 2 ЭМ.

Одним из вариантов решения задачи ввод/вывода из электрической цепи ЭМ является использование в системе управления СГПМ модуля искусственного интеллекта – нейронной сети (НС). При обучении НС могут быть использованы такие параметры режима работы СГПМ как скорость ветра, коэффициент загрузки генератора и результирующее выходное напряжение ВЭУ при различных комбинациях, включенных ЭМ (рис 6.2). Обученная нейронная сеть может быть использована в системе управления для определения в реальном времени количества ЭМ, наиболее целесообразного для текущего режима работы ВЭУ. На вход системы управления поступают сигналы с датчика скорости ветроколеса, а также сигналы с датчиков тока и напряжения, определяемые величиной и характером электрической нагрузки. Кроме этого, системе управления необходимо задать желаемое значение напряжения, которое СГПМ должен поддерживать на выходных клеммах.

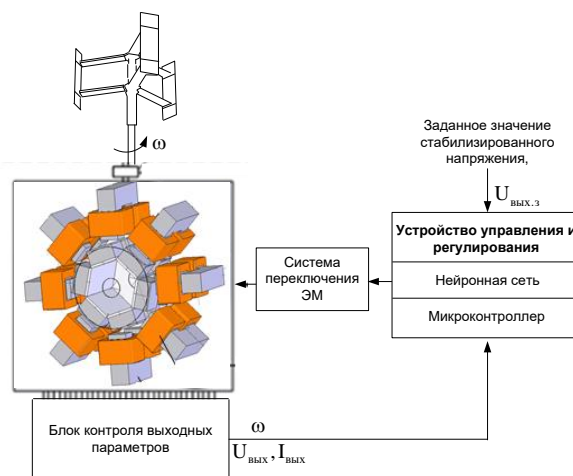


Рис. 6.2. Система управления ВЭУ с СГПМ

Анализ работы нейронной сети может быть проведен с использованием стандартного расширения Neural Network входящего в состав среды MatLab 2019. При обучении НС используются зависимость выходного напряжения СГПМ от количества включенных ЭМ при определенной скорости вращения ротора и коэффициенте загрузки ВЭУ. Эти данные могут быть получены на основании решения уравнений, устанавливающих взаимосвязь конструктивных параметров СГПМ с энергетическими показателями его работы, а также использованы при исследовании предложенных моделей СГПМ в программном комплексе ANSYS. Данные о режимах работы ВЭУ могут быть также получены экспериментальным путем перед вводом в эксплуатацию ВЭУ как в лабораторных условиях, так и при установке ВЭУ на открытой местности. Учитывая особенность НС, заключающуюся в возможности обучения в произвольный момент времени, целесообразным является режим корректировки весовых коэффициентов НС на основе статистических данных о фактической взаимосвязи указанных параметров в процессе эксплуатации ВЭУ.

Структура данных для входного слоя НС может быть представлена табл. 6.1.

Данные для обучения НС для СГПМ в режиме холостого хода ($k_3 = 0$)

ЭМ	Увых, В	п, об/мин	ЭМ	Увых, В	п, об/мин	ЭМ	Увых, В	п, об/мин	ЭМ	Увых, В	п, об/мин
2	28.94	100	4	52.34	100	6	68.23	100	8	75.49	100
2	35.18	120	4	62.95	120	6	81.79	120	8	91.17	120
2	41.14	140	4	73.49	140	6	95.39	140	8	106.52	140
2	46.88	160	4	83.98	160	6	109.02	160	8	121.58	160
2	52.43	180	4	94.42	180	6	122.66	180	8	136.39	180
2	57.87	200	4	104.82	200	6	136.31	200	8	150.99	200
2	63.24	220	4	115.20	220	6	149.96	220	8	165.42	220
2	68.60	240	4	125.58	240	6	163.58	240	8	179.71	240
2	73.99	260	4	135.95	260	6	177.18	260	8	193.89	260
2	79.48	280	4	146.33	280	6	190.74	280	8	208.02	280
2	85.11	300	4	156.74	300	6	204.26	300	8	222.13	300

Обучение НС выполняется в расширении MatLab Deep Learning Space при помощи модуля Neural Network Start (nnstart). Используется двухслойная структура НС, количество нейронов в скрытом слое равно 30.

После обучения НС MatLab позволяет проверить созданную нейронную сеть на соответствие внешним факторам путем расчета регрессии и ошибки. Эти показатели определяются путем вычисления разницы между входными и выходными параметрами. На рис. 6.3 приведены показатели, характеризующие надежность НС.

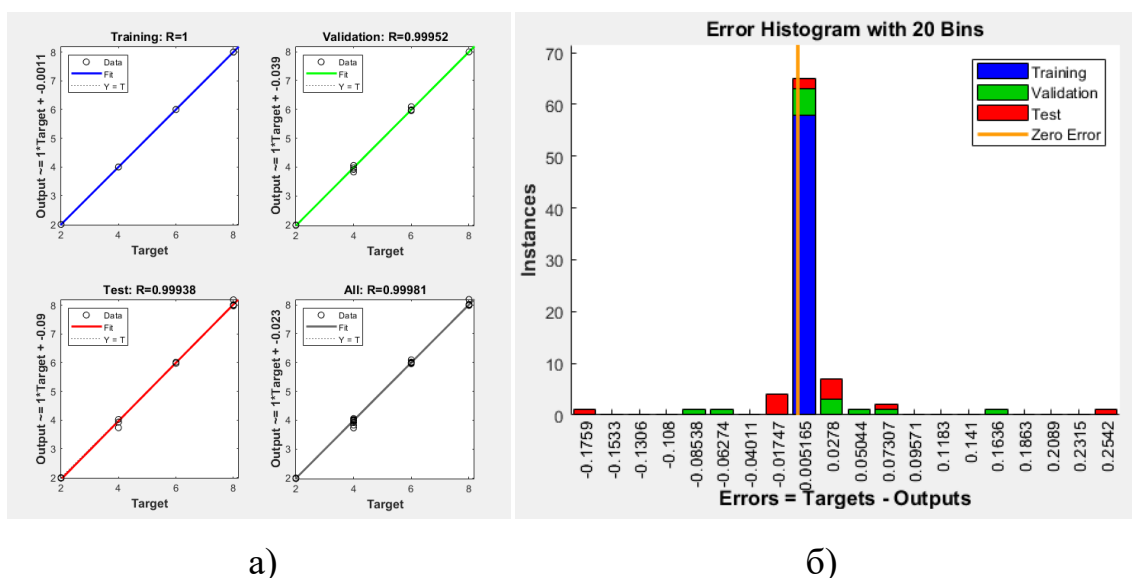


Рис. 6.3 Параметры, характеризующие обученную НС: а) регрессионный анализ; б) гистограмма ошибок при сравнении входных и выходных параметров.

При проведении лабораторных испытаний рассматриваемой конструкции СГПМ модульного типа установлено, что при скорости вращения вала индуктора 400 об/мин напряжение 220 В на выходе генератора достигается включением четырех электромагнитов, а при понижении скорости вращения необходимо последовательно соединить восемь электромагнитов (четыре пары включены встречно и последовательно). При понижении скорости вращения вала уменьшение ЭДС в катушках и результирующее значение выходного напряжения должно быть скорректировано НС. Система управления, базирующаяся на НС, может быть реализована на микроконтроллерах различного исполнения. В работе для проведения исследования использовалась платформа семейства Arduino (Arduino Due), обладающая низкой стоимостью и вместе с тем представляющий собой новую архитектуру, построенную на 32-битном микроконтроллере Atmel SAM 3X8Ec ARM с процессором на базе ядра ARM Cortex-M3. На платформе предусмотрены цифровые входы/выходы, связь по USB. Кроме этого, указанный микроконтроллер совместим с системой MatLab, в которой создана и обучена

НС [35, 147, 180, 181]. Система управления посредством интерфейса MatLab загружается в Arduino Due, причем возможны два режима работы: в среде MatLab (при непосредственном подключении контроллера к персональному компьютеру) и независимо от нее. Первый режим, как правило, используется в лабораторных условиях для проверки логики срабатывания силовых ключей системы управления. После выполнения отладочных работ модель Simulink загружается в микроконтроллер, который используется независимо от среды MatLab (независимо от персонального компьютера). Текущие значения скорости вращения вала индуктора, тока и напряжения поступают на аналоговые входы Arduino Due на соответствующие входы (Pin) платформы. По значениям тока и напряжения рассчитывается коэффициент загрузки генератора, значение которого совместно со значениями скорости вращения ротора и требуемого выходного напряжения поступает на 11 вход НС. На выходе нейронная сеть предоставляет информацию о количестве необходимых электромагнитов, которые должны быть активны для питания потребителя. Для макетного образца СГПМ модульного типа это значение соответствует 1, 2, 3 или 4 парам электромагнитов. В зависимости от принятого решения на соответствующих выходных портах Arduino Due формируется логическая 1, что соответствует уровню напряжения 3.3 В. Указанное напряжение подается на управляющие контакты твердотельных реле, которые работают в ключевом режиме, и осуществляют переключение силовых контакторов, к которым присоединены катушки электромагнитов.

Имитационная модель ВЭУ на основе тихоходного СГПМ модульного типа с системой управления, включающей НС приведена на рис. 6.4.

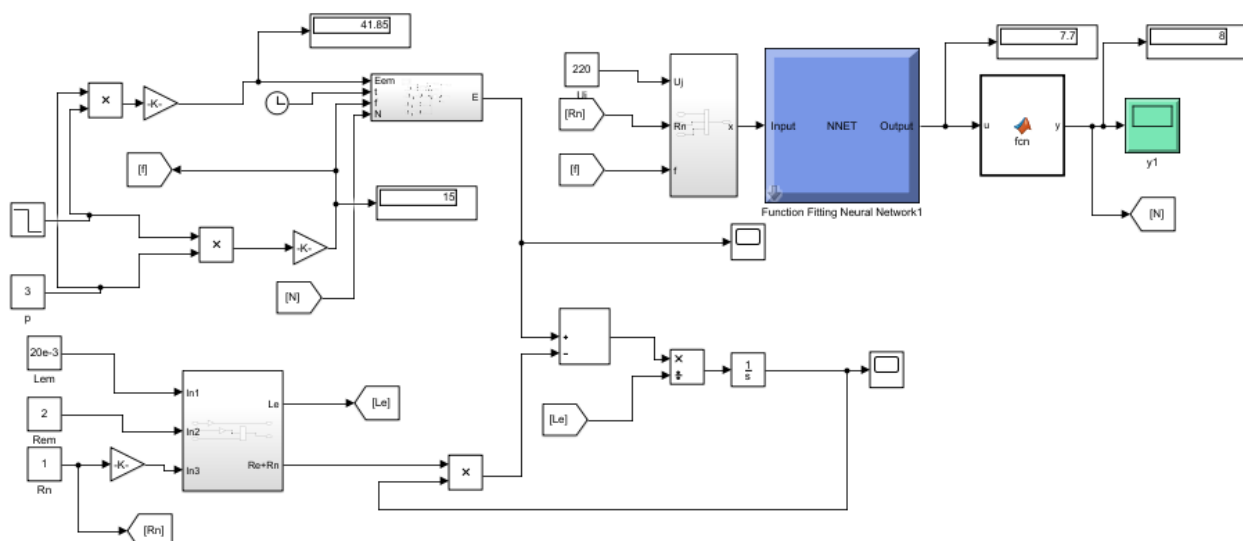


Рис. 6.4. Имитационная модель ВЭУ с СГПМ модульного типа под управлением нейронной сети.

При изменении скорости вращения вала производится расчет количества включенных электромагнитов, обеспечивающих заданное напряжение на выходе тихоходного синхронного генератора.

На рис. 6.5 приведена временная характеристика напряжения на выходе СГПМ модульного типа.

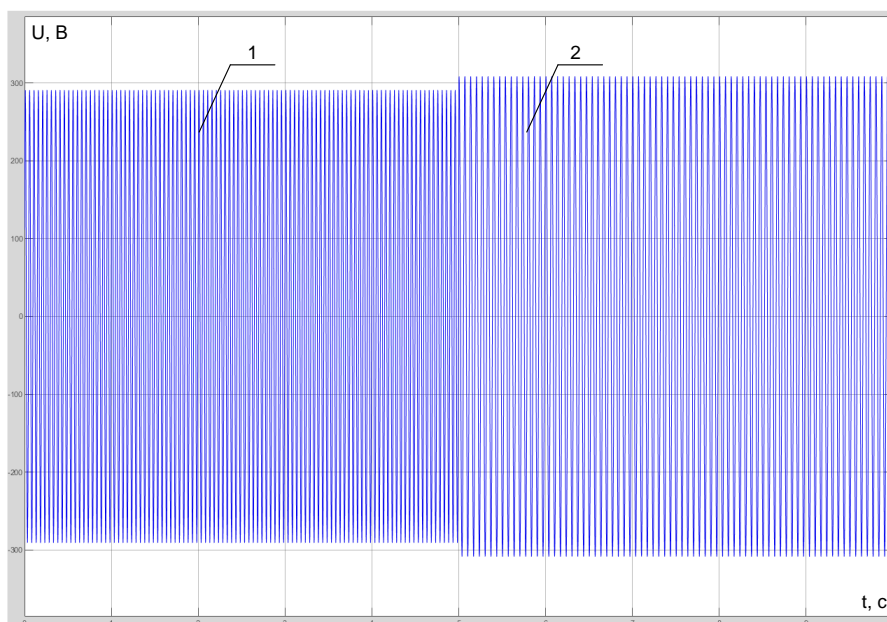


Рис. 6.5 Выходное напряжение при снижении скорости вращения вала генератора с 400 об/мин (1) до 300 об/мин (2).

6.2 Решение задачи оптимального управления ЛМЭП тихоходного длинноходового линейного одноступенчатого поршневого компрессора.

Современные микропроцессорные системы управления линейным магнитоэлектрическим двигателем возвратно-поступательного движения работающие в составе привода поршневого компрессора обеспечивают высокое быстродействие и надежность.

Разработка системы управления, обеспечивающая максимум КПД тихоходного СДПМ, используемого для привода поршневого компрессора, связана с отысканием оптимальных законов изменения во времени тока и напряжения на обмотке якоря [141, 149, 210].

Рассмотрим уравнение движения подвижной части ЛМЭП в виде

$$m_d \frac{d\vartheta}{dt} = F_{ЭМ} - F_H, \quad (6.1)$$

где m_d – масса подвижной части, $\vartheta = \frac{dx}{dt}$ – скорость движения индуктора,

$F_{ЭМ} = CI_m \sin(\omega t)$ – электромагнитная сила, $F_H = 99N_{атм}\beta \frac{\pi d^2}{4} \sin(\omega t + \omega t_k)$ – сила сопротивления сжимаемого газа в ступени, $C = V_{ср} \ell_{ср} kW_a$ – постоянная, $N_{атм} = 10^5$ Па – атмосферное давление, ωt_k – угол управления.

Закон изменения хода индуктора как функции времени представим в виде периодической функции с постоянной составляющей:

$$x(t) = x_m [1 - \cos(\omega t)]. \quad (6.2)$$

После подстановки выражения (6.2) в уравнение (6.1) получим

$$CI_m \sin(\omega t) - m_d x_m \omega^2 \cos(\omega t) = F'_H \sin(\omega t + \omega t_k), \quad (6.3)$$

где $F'_H = 99N_{атм}\beta \frac{\pi d^2}{4}$.

Очевидно, что правая и левая части уравнения (6.3) между собой равны, если амплитуда тока I_m и угол ωt_k определяются следующими выражениями:

$$I_m = \frac{\sqrt{F_H'^2 - (m_D x_m \omega^2)^2}}{C}, \quad \omega t_k = \pi + \arctg\left(-\frac{m_D x_m \omega^2}{CI_m}\right). \quad (6.4)$$

Как правило, поршневой компрессор используется для поддержания давления в магистрали при помощи специального промежуточного звена – ресивера. Ресивер представляет собой емкость, давление газа в котором регулируется системой впускным и выпускным клапанами. При достижении заданного давления поршневой компрессор отключается, при понижении давления в ресивере компрессор включается, нагнетая газ в емкость ресивера. Следовательно, возможны режимы работы СДПМ, в которых поршень совершает не полное перемещение, выдавливая газ в ресивер, при этом давление в последнем достигает необходимого значения.

Несовпадение между собой сил F_H и $F_{эм}$ обусловлено наличием динамической силы

$$F_{дин} = m_D \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (6.5)$$

Из решения задачи оптимизации параметров тихоходного СДПМ следует, что относительные потери в двигателе будут минимальны, если законы изменения тока в обмотке якоря и скорости движения индуктора во времени совпадают.

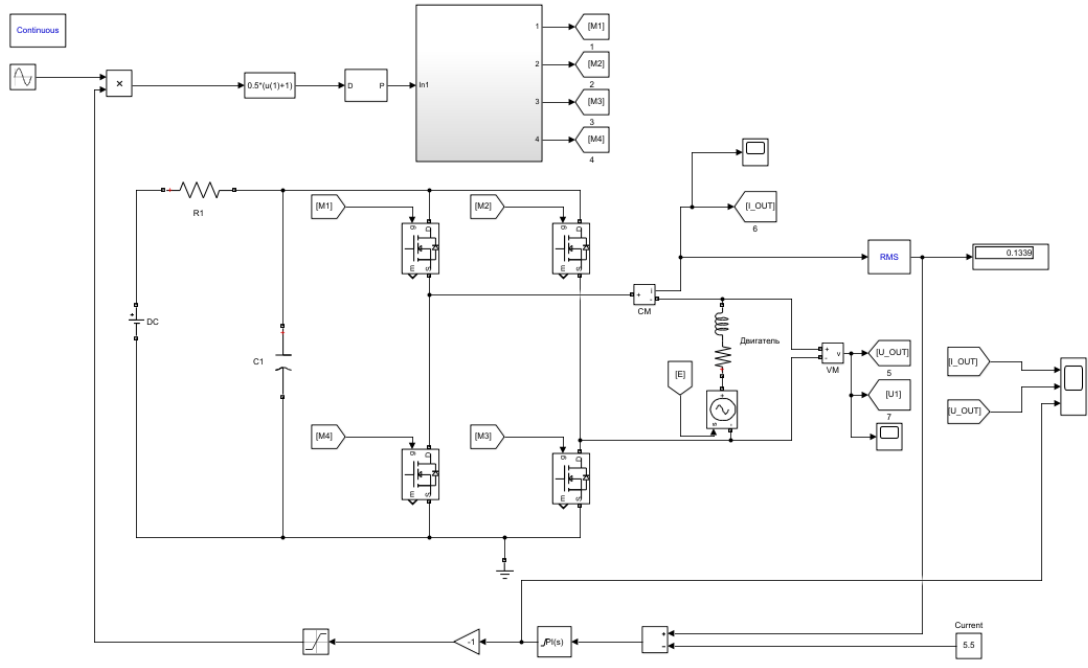
Решение уравнения электрического состояния обмотки якоря

$$i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + C\vartheta(t) = u(t) \quad (6.6)$$

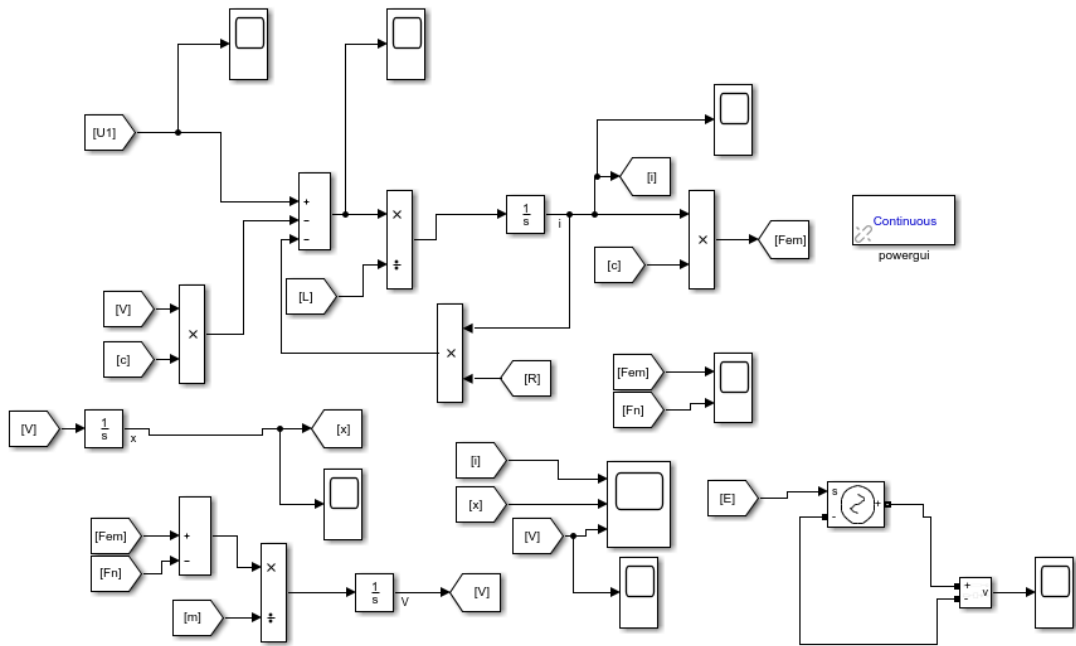
при условии $i(t) = K\vartheta(t)$, когда $K = \text{const}$ и заданном законе движения якоря (6.2) позволяет определить начальную фазу входного напряжения

$$\theta = \arctg \frac{I_m \omega L}{I_m R + C x_m \omega}. \quad (6.7)$$

Система управления, реализующая заданный закон движения индуктора СДПМ приведена на рис. 6.6.



а)



б)

Рис. 6.6 Имитационная модель системы управления ЛМЭП одноступенчатого поршневого компрессора (а) и математическая модель СДПМ, учитывающая совместное решение уравнений электрической и механической подсистем (б).

Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП приведены на рис. 6.6.

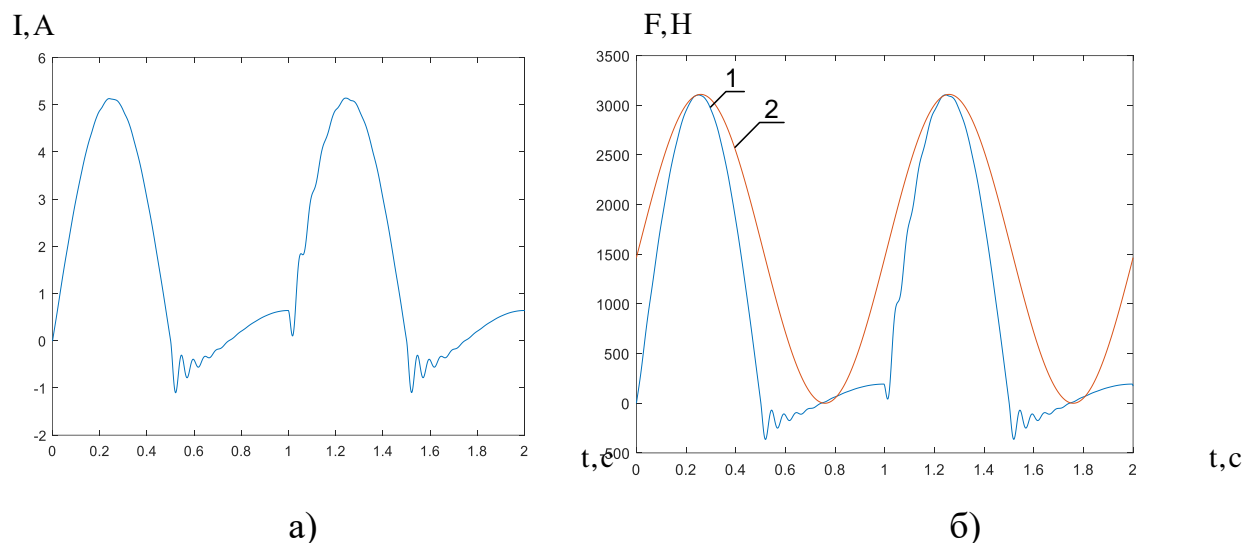


Рис. 6.6. Динамические характеристики установившегося режима ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора:
 а – ток в обмотке якоря; б: 1 – сила сопротивления сжатию газа в ступени;
 2 – развиваемое электромагнитное усилие на штоке.

Разработанная имитационная модель ЛМЭП позволяет определить зависимость действующего значения напряжения на обмотке якоря СДПМ от коэффициента загрузки с использованием ресивера (рис. 6.7).

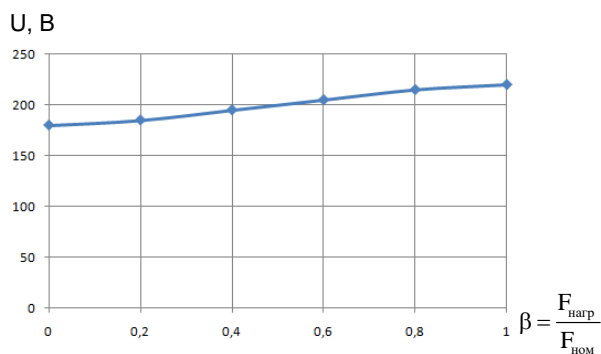


Рис. 6.7. Зависимость напряжения на обмотке якоря СДПМ от коэффициента загрузки.

Отсутствие корректировки начальной фазы входного напряжения θ с помощью системы управления приводит к увеличению времени переходного процесса, при котором достигается заданный закон движения хода индуктора во времени.

На рис. 6.8 представлены временные зависимости тока в обмотке и скорости движения индуктора при отсутствии компенсации системой управления ЛМЭП силы реакции компрессорной ступени (а) и при ее наличии (б).

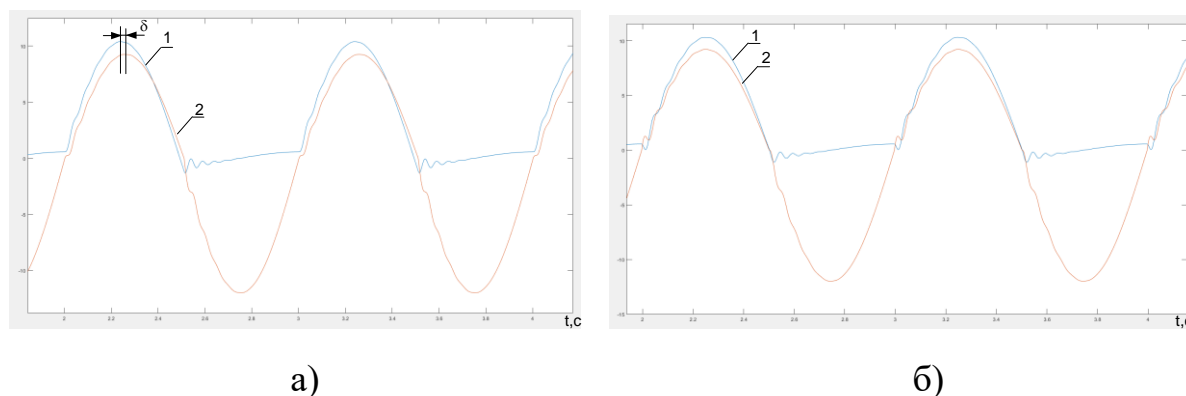


Рис. 6.8. Закон изменения тока $i(t)$ (1) и скорости индуктора $\vartheta(t) \times 13$ (2) без корректировки начальной фазы θ входного напряжения (а) и с корректировкой на угол θ системой управления (б).

При синусоидальном законе изменения нагрузки минимально возможные относительные потери, а значит максимум КПД СДПМ

$$\eta_{\text{д max}} = \left(1 + P_{\text{r min}}^*\right)^{-1}, \quad (6.8)$$

где $P_{\text{r min}}^* = \frac{I_{\text{m}} R}{C_{\text{x m}} \omega}$.

Следовательно, система управления ЛМЭП обеспечивает синусоидальный закон движения индуктора во времени, при котором относительные потери в двигателе достигают минимального значения. являются СДПМ.

На рис. 6.9 показаны расчетные зависимости угла сдвига фаз между силой сопротивления сжимаемого газа и ходом индуктора во времени и КПД СДПМ от коэффициента загрузки.

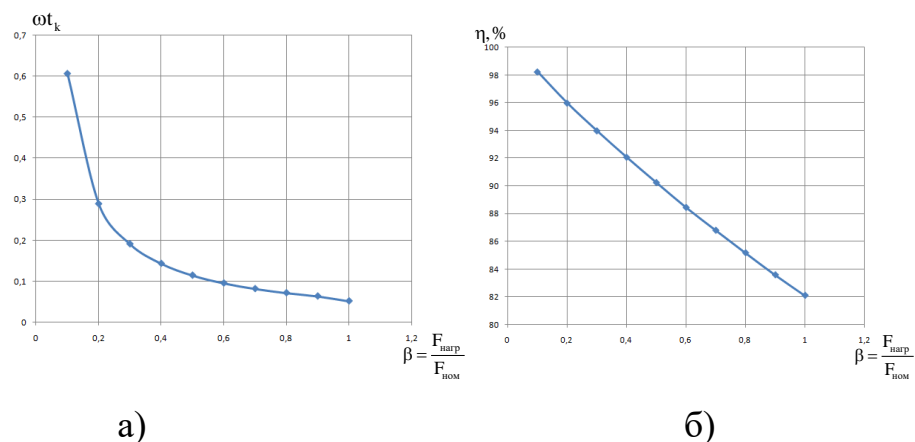


Рис. 6.9. Расчетные кривые зависимости угла сдвига фаз между электромагнитной силой и силой сопротивления сжимаемого газа и током в обмотке якоря (а) , а также КПД от коэффициента загрузки ЛМЭП (б).

На рис. 6.10 представлена схема управления подключением катушек секционированной обмотки СДПМ к источнику выпрямленного напряжения. Переключение полярности питающего напряжения осуществляется малогабаритными контакторами КМИ 22510 25А.

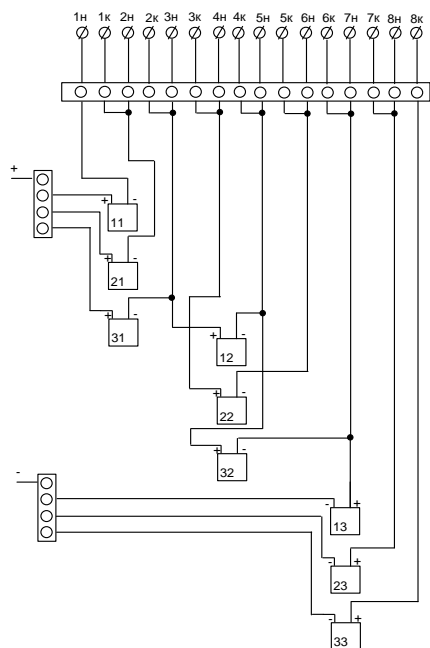
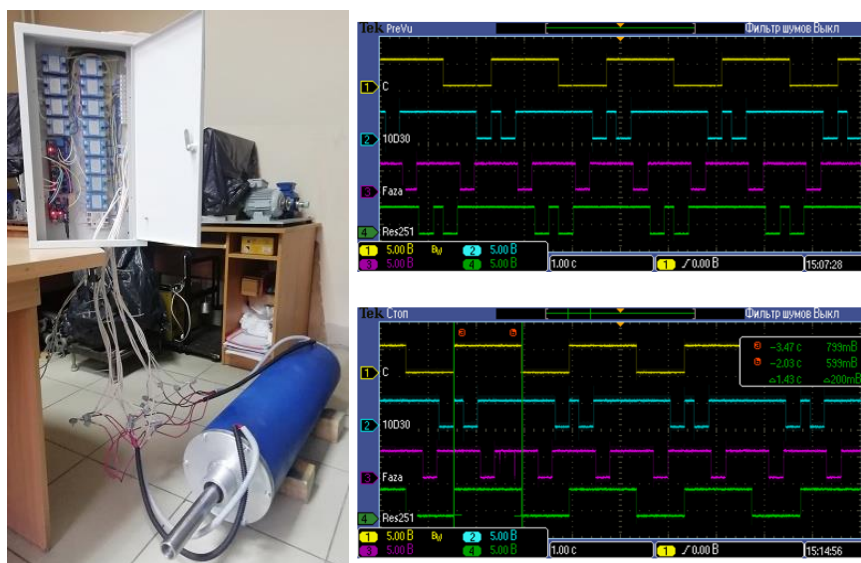


Рис. 6.10. Схема переключения катушек тихоходного СДПМ: 11, 21, 31...33 – твердотельные реле, 1н...8н – клеммы, к которым присоединены начала соответствующих катушек, 1к-8к –клеммы, к которым присоединены концы соответствующих катушек.

При коммутировании обмоток для уменьшения импульса напряжения используются два высоковольтных конденсатора 2 кВ, 140 мкФ, соединенные параллельно.

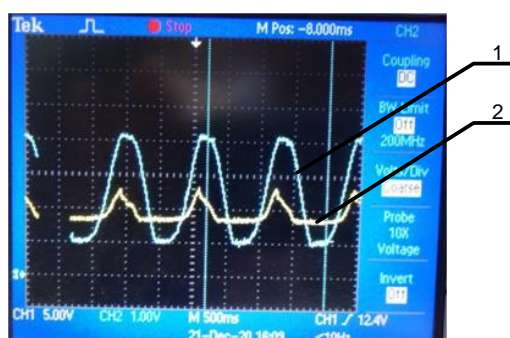


а)

б)



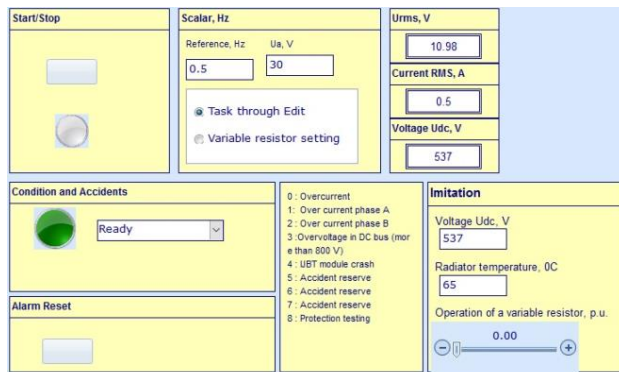
в)



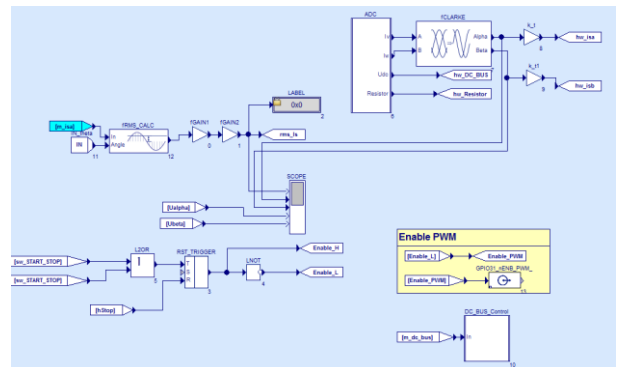
г)

Рис. 6.11. Макетный образец тихоходного СДПМ для поршневой компрессорной ступени с системой управления (а), осциллограмма управляющих импульсов подаваемых на твердотельные реле (б), ЛМЭП поршневой компрессорной ступени в сборе (в), осциллограммы с датчиков перемещения - 1 и давления - 2 (г).

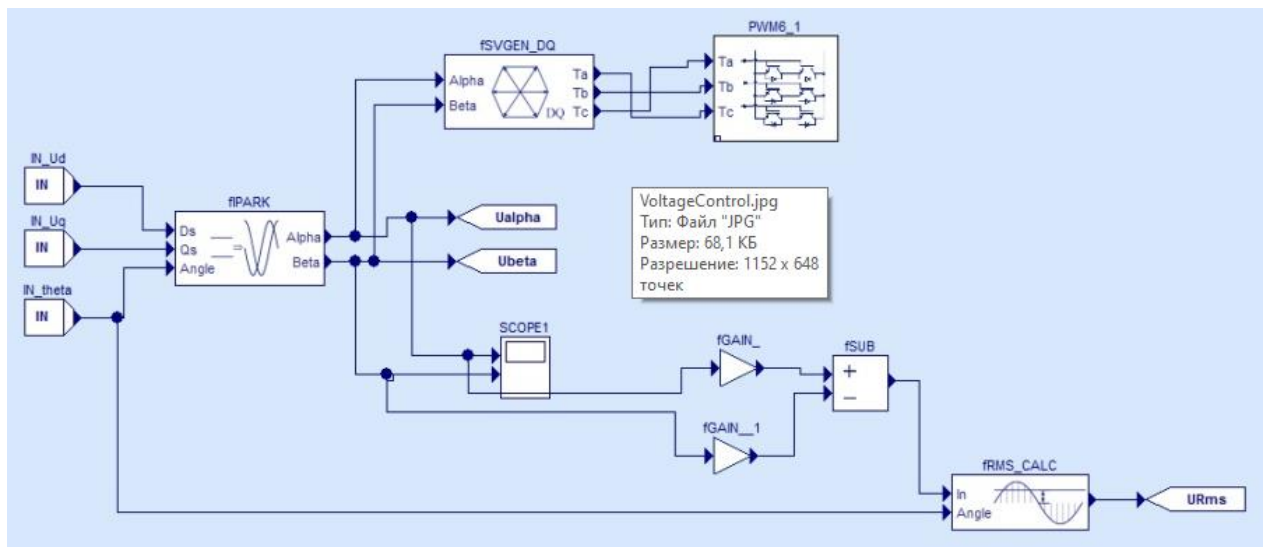
На рис. 6.11 представлен макетный образец тихоходного СДПМ с разработанной и собранной системой управления, а также осциллограмма управляющих импульсов на твердотельные реле с драйвера [155, 157]. Проведено экспериментальное исследование теплового режима обмотки (Приложение 10). Величина воздушного зазора, не превышающего 0.002 м обуславливает тяжелый тепловой режим при работе всех катушек (две пары по четыре катушки).



а)



б)



в)

Рис. 6.13. Управление СДПМ в среде MexBios: графический интерфейс пользователя (а), схема управления (б), схема контроля выходного напряжения (в).

Ограничение по допустимой температуре для постоянных магнитов делает необходимым применение дополнительной системы охлаждения. В связи с этим целесообразным является использование двух пар по две катушки.

На рис. 6.12, г представлена осциллограмма рабочего процесса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора: максимальное давление 1.2 МПа, ход поршня 170 мм. Указанные показатели получены при токе 3А в обмотке якоря.

Использование системы управления на основе ШИМ преобразования реализовано в программной среде MexBios.

Результаты экспериментального исследования приведены СДПМ в режиме холостого хода и с присоединенной компрессорной ступенью приведены на рис 6.13.

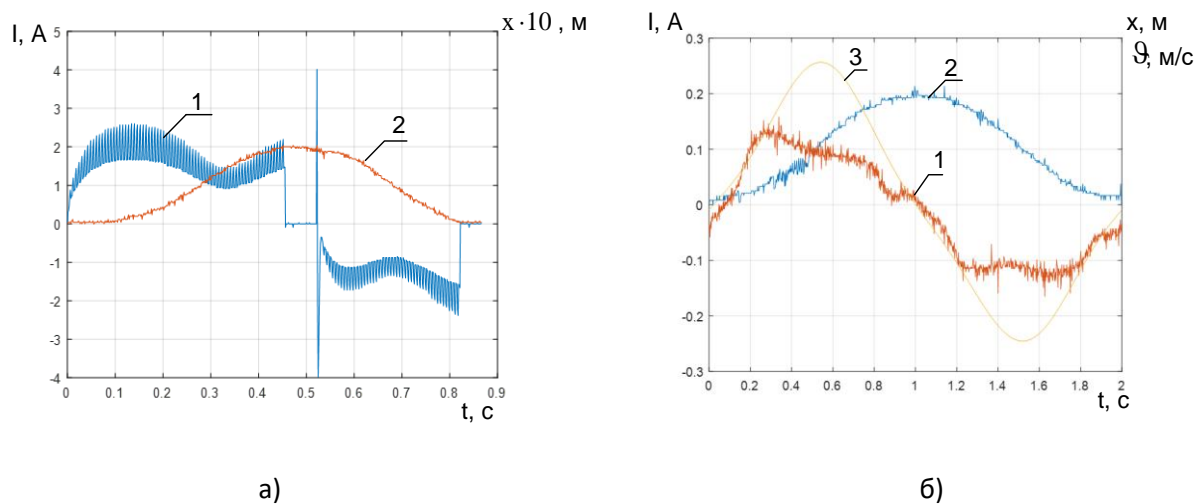


Рис. 6. 13 Результаты испытаний ЛМЭП: а) питание обмотки двигателя выпрямленным напряжением, б) при помощи частотного преобразователя с открытым программным кодом: 1 – временная зависимость тока, 2 – закон изменения хода индуктора, 3 – закон изменения скорости перемещения индуктора.

Установленная решением задачи оптимизация аналитическая взаимосвязь обобщенных параметров ЛМЭП обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя позволяет определить относительные

потери в подсистемах ЛМЭП $P_{r \min}^* = 0.218$ о.е. и максимально возможный КПД для предложенной конструкции $\eta_{d \max} = 0.821$ о.е.

Экспериментальные исследования проведенные для СДПМ при питании обмотки якоря от частотного преобразователя показывают необходимость вывода на установившийся режим путем реализации отношения $U/f = \text{const}$. Причем запуск осуществляется при пониженном значении напряжения и частоты: индуктор приходит в движение, далее постепенно увеличивают напряжение и частоту, тем самым повышая амплитуду и скорость движения индуктора (поршня компрессора). При достижении хода поршня и по мере повышения давления в ресивере в случае необходимости производится повышение напряжения при фиксированной частоте.

6.3. Принцип реализации системы управления линейного магнитоэлектрического привода для испытания реологических характеристик опытных образцов эластомеров.

Испытуемый образец эластомера располагается в термокамере испытательного блока. Температура в термокамере и температура образца измеряются платиновыми преобразователями сопротивления (датчиками температуры). Сигнал от них поступает в блок управления термокамерой, где преобразуется в значение температуры и сравнивается с заданной. Результат сравнения преобразуется в сигнал управления термокамерой, который управляет элементами Пельтье. Элементы Пельтье преобразуют протекающий через них ток в разность температур.

Задание температуры в термокамере и отображение измеренной температуры происходит на компьютере с помощью программы управления.

Механическое воздействие на испытуемый образец, в виде силы, создается силовым СДПМ возвратно-поступательного движения,

расположенном в испытательном блоке. Измерение силы осуществляется тензодатчиками, а измерение деформации – емкостным датчиком линейных перемещений. Сигналы с датчиков силы и деформации поступают в блок задания и измерения параметров по силе и перемещению. В блоке задания и измерения параметров по силе и перемещению расположен опорный генератор, который формирует постоянное и переменное прецизионное опорное напряжение. Сигнал с датчика силы сравнивается с опорным сигналом и по результатам сравнения формируется управление на линейный СДПМ.

Конструкция испытательного блока показана на рис. 6.15.

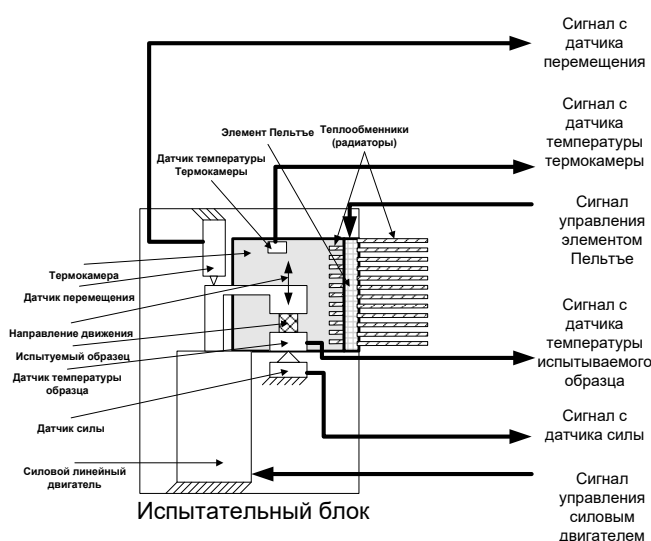


Рис. 6.15. Испытательный блок.

Задание параметров опорного генератора и вывод измеренной информации по силе и деформации осуществляется с помощью ПК.

Структурная схема блока управления термокамерой представлена на рис.6.16.

Сигнал с датчиков температуры, поступает на мультиплексор, который осуществляет переключение между датчиками, а также в режиме самокалибровки подключает прецизионный источник опорного напряжения. С помощью прецизионного источника опорного напряжения осуществляется самокалибровка канала измерения, что позволяет повысить точность

измерения. С выхода мультиплексора сигнал преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя и поступает в микропроцессор. В микропроцессоре рассчитываются значения температур и происходит сравнение с заданными. По результатам сравнения, микропроцессор через цифро-аналоговый преобразователь формирует сигнал управления в усилитель мощности, от которого запитаны элементы Пельтье.



Рис. 6.16. Схема блока управления термокамерой.

В зависимости от полярности и величины протекающего через них тока, происходит нагрев или охлаждение термокамеры. Через блок связи с компьютером осуществляется обмен информацией, между микропроцессором и компьютером.

Структурная схема блок задания и измерения параметров по силе и перемещению, показана на рис. 6.17.

Блок задания и измерения параметров по силе и перемещению состоит из двух модулей: блока опорного генератора и измерительный блок.

Блок опорного генератора формирует прецизионный управляющий сигнал, который состоит из постоянного значения и синусоидального (с регулируемой амплитудой и частотой). Формирование опорного сигнала осуществляется микропроцессором с помощью цифро-аналоговых

преобразователей. Применение микропроцессора, позволило регулировать частоту и амплитуду опорного генератора с высокой точностью.

Установка параметров опорного генератора осуществляется с компьютера через блок связи.

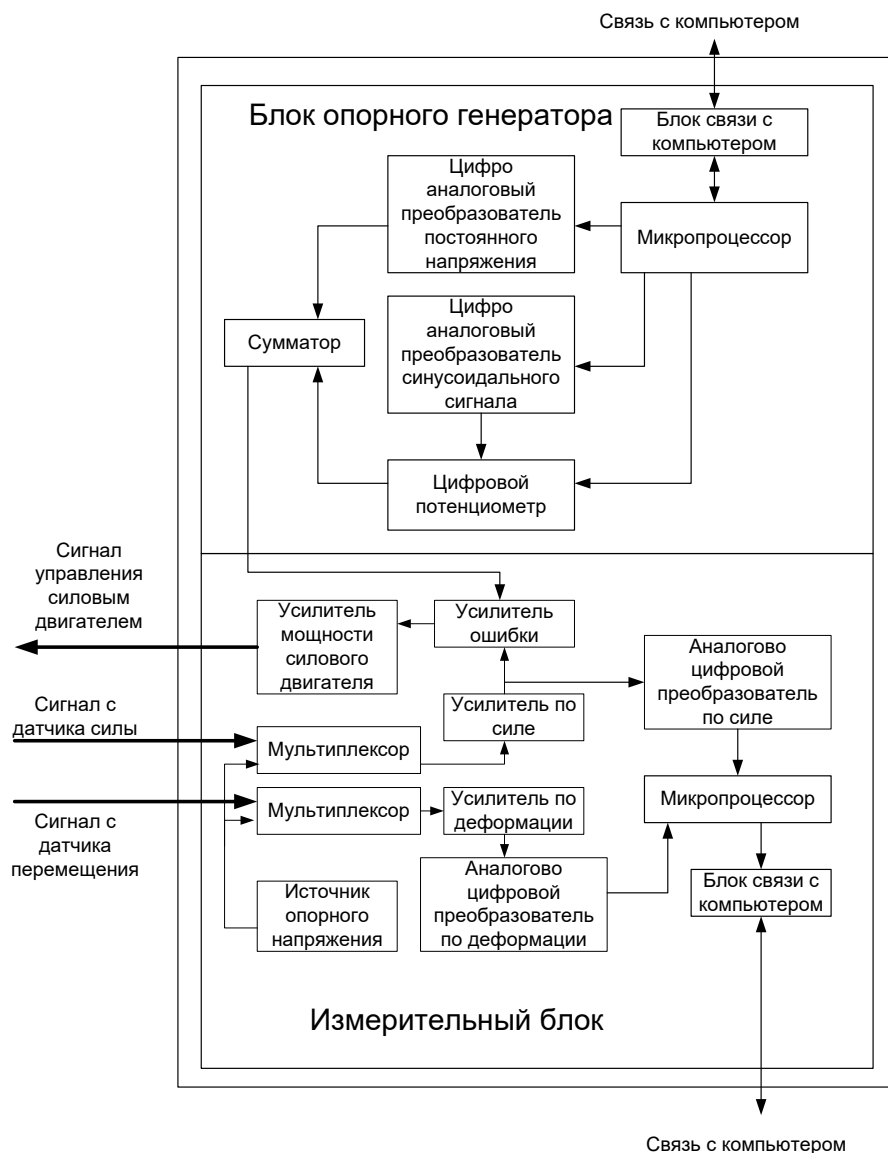


Рис. 6.17. Блок задания и измерения параметров по силе и перемещению.

Сигналы с датчиков силы и деформации через мультиплексоры и усилители подаются на аналого-цифровые преобразователи, которые работают

параллельно и синхронно. На мультиплексоры так же подается прецизионный опорный сигнал, для проведения самокалибровки прибора. Синхронная работа аналого-цифровых преобразователей, позволяет точно по времени измерять значения силы и деформации, а, следовательно, и точно производить расчеты параметров резины. Синхронизация аналого-цифровых преобразователей так же осуществляется от опорного генератора.

С выхода усилителя датчика силы, сигнал поступает на усилитель ошибки, на который так же подается и сигнал с опорного генератора. В результате, на выходе усилителя ошибки, в зависимости от текущего значения силы и опорного сигнала формируется управляющее напряжение, которое через усилитель мощности поступает на силовой линейный двигатель. Таким образом, сила, воздействующая на испытуемый образец, всегда точно совпадает с опорным значением, формирующимся в опорном генераторе. И измерения всегда происходят синхронно с опорным значением, что позволяет повысить точность измерений.

Измеренные значения силы и деформации, через блок связи с компьютером, поступают в программу обработки результатов измерения и производится расчет реологических параметров эластомеров.

6.4. Выводы.

1. Подтверждена эффективность применения системы управления на базе нечеткой логики для работы тихоходного СГПМ модульного типа в составе ВЭТК ВЭУ, заключающаяся в возможности коммутации катушек ЭМ с независимыми магнитопроводами в зависимости от коэффициента загрузки, силы и скорости ветра и напряжения на выходе синхронного генератора.

2. Разработана система управления тихоходного СДПМ в составе ЛМЭП одноступенчатого тихоходного длинноходового поршневого

компрессора, обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя на заданный закон движения индуктора.

3. Разработан макетный образец электротехнического комплекса одноступенчатого поршневого компрессора, включающий в свой состав систему управления, в котором в качестве электромеханического преобразователя используется тихоходный СДПМ возвратно-поступательного движения.

4. Разработана система управления термокамерой и СДПМ в составе ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров, позволяющая обеспечить требования стандарта испытаний опытных образцов эластомеров для определения их реологических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод проектирования оптимальных конструкций тихоходных СМПП вращательного и возвратно-поступательного движения, работающих в двигательном и генераторном режимах в составе ВЭУ и ЛМЭП, в соответствии с выбранным критерием оптимальности, что позволило осуществить разработку комплектов конструкторской документации для изготовления опытных образцов тихоходных СГПП и СДПП с улучшенными пусковыми и эксплуатационными характеристиками.

На основе предложенного метода проектирования тихоходных СМПП проведено решение задачи оптимизации их параметров. Впервые получены выражения, устанавливающие аналитическую взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы тихоходных СМПП.

2. Разработаны обобщенные математические модели СМПП, объединяющие математические модели подсистем различной физической природы, отличающиеся от известных возможностью прямой интеграции конечно-элементного анализа расчета осесимметричных и трехмерных магнитных полей тихоходных СМПП.

3. Получены рекуррентные соотношения для определения векторного магнитного потенциала в узлах триангуляционной сети модели магнитного поля, позволяющие максимально автоматизировать процесс создания глобальной СЛАУ. Верификация полученных рекуррентных соотношений произведена путем сопоставления экспериментальных измерений магнитной индукции в воздушном зазоре при помощи миллитесламетра ТПУ-01 разработанных тихоходных СМПП и результатов расчета, при этом расхождение в локальной точке не превышает 5%.

4. Предложена методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов для конструирования тихоходных СМПП в составе ВЭТК в основе критерия одинаковой объемной намагниченности. Экспериментально

установлено, что результаты среднеквадратичного отклонения, полученной при взаимодействии испытуемого постоянного магнита 50x50x25 мм и магнитного отражателя для опытных образцов из партии постоянных магнитов 48 шт. составляет 12%.

5. Разработаны алгоритмы и программы по оптимизации магнитных систем предложенных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе ВЭУ и ЛМЭП, отвечающих выбранному критерию оптимальности и режиму работы. На основе обобщения и развития известных и предложенных в диссертации математических моделей, методик, алгоритмов проектирования и подходов к созданию ВЭТК с тихоходными СМППМ предложены принципы создания энергоэффективных СГППМ модульного типа и СГППМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в модельном ряду ВЭУ до 30 кВт, а также СДППМ возвратно-поступательного движения для ЛМЭП с возможностью сжатия газа одной ступенью до 2 МПа.

6. Исследованы динамические характеристики тихоходных СМППМ в составе ВЭТК и даны рекомендации по оптимальному проектированию ВЭУ:

- исследовано влияние высоты постоянного магнита и величины воздушного зазора на эффективность СГППМ модульного типа и установлены оптимальные параметры магнитной системы, при которой изменение магнитного поля в воздушном зазоре под действием реакции якоря будет минимальным;

- исследование пускового момента СГППМ с общим цилиндрическим магнитопроводом указывает на рациональность построения магнитной системы с двумя полуобмотками, в которой число пазов, приходящихся на полюс и фазу представляет собой периодическую дробь.

Впервые разработан и применен электротехнический комплекс длинноходовой компрессорной ступени для обеспечения средних и высоких давлений до 2 МПа на основе тихоходного СДППМ возвратно-поступательного движения 2 кВт на ход поршня 0.2 м, напряжение питания

240 В, ток 10 А, представлена методика проектирования, расчета, а также конструкторская документация.

Проведены исследования различных конструктивных схем синхронных магнитоэлектрических машин в составе ВЭУ, в результате которых установлено, что

- конструкции СГПМ модульного типа с независимыми магнитопроводами имеют низкий коэффициент несинусоидальности выходного напряжения (менее 1%), что позволяет использовать их с системой управления на базе нейронной сети. Исследования и экспериментальные испытания проводись на СГПМ модульного типа, имеющего шесть пар полюсов постоянных магнитов и восемь электромагнитов;

- применяемый в ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров СДПМ возвратно-поступательного движения с двумя воздушными каналами и постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении, имеет меньшую массу индуктора и обладает лучшими динамическими свойствами по сравнению с СДПМ с постоянными магнитами, намагниченными в осевом направлении;

- ЛМЭП тихоходного длиноходового одноступенчатого поршневого компрессора на основе СДПМ с постоянными магнитами призматической формы, расположенными на шестигранном индукторе, позволяет обеспечить заданное электромагнитное усилие на сжатие 2000 Н и максимум КПД 82.1%.

7. Разработаны, исследованы и рекомендованы к внедрению новые, научно обоснованные конструктивные схемы СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП. Проведены экспериментальные исследования тихоходных СМПМ в статическом и динамическом режимах с учетом особенностей их работы в двигательном и генераторном режимах работы.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования представляется целесообразным ориентировать по следующим направлениям:

- продолжение работ по применению разработанных методов оптимального проектирования для других конструктивных схем СМПМ;
- продолжение работ по созданию новых конструктивных схем СГПМ в составе ВЭУ;
- продолжение работ по созданию систем управления СДПМ в составе привода поршневого компрессора, в том числе с использованием нейросетевых технологий и нечеткой логики, реализующих заданный закон движения подвижной части.

На основе проведенных исследований разработаны методики, алгоритмы проектирования тихоходных СМПМ в составе ВЭТК конкретного назначения и выполнены их программные реализации, позволяющие осуществить обоснованный выбор базовых конструкций магнитных систем в соответствии с заданным техническим заданием и режимом работы электрической машины.

В результате обобщения исследований, приведенных в диссертации, разработан общий подход к проектированию и созданию тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе ветроэнергетических установок и линейного магнитоэлектрического привода, представляющих собой набор методик, математических моделей, приведенных в главах диссертации. Предложенный подход представлен в виде методологии, суть которой заключается в обосновании базовой конструкции магнитной системы тихоходной синхронной магнитоэлектрической машины с постоянными магнитами на основе аналитических выражений, устанавливающих взаимосвязь между конструктивными параметрами машины и выходными параметрами комплекса, полученных при оптимизационном расчете по критерию минимума удельных электромагнитных потерь и последующего ее уточнения на основе исследования магнитного поля, что позволяет минимизировать материальные и временные затраты при проектировании и изготовлении тихоходной СМПМ и ВЭТК в целом. Цель работы достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аветисян, Д.А. Автоматизация проектирования электрических систем. – М.: Высш. шк., 1998.- 331 с.
2. Авилов, В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1995.- 237 с.
3. Адамов, А.А. К построению нелинейной модели вязкоупругого поведения наполненных резин при конечных деформациях. Каучук и резина, 1996, №5, с.27-30.
4. Адамов, А.А., Матвеев, В.П., Труфанов, Н.А., Шардаков, И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург:УрО РАН, 2003, 411 с.
5. Альтов, В. А. Сверхпроводниковые технологии в электромеханических преобразователях энергии / В. А. Альтов, Д. С. Дежин, Ю. Ю. Кавун, К. Л. Ковалев, Л. К. Ковалев, В. Т. Пенкин // Электричество. - 2009. - № 5. - С. 27-36.
6. Андреева, Е.Г. Ковалев, В.З. Математическое моделирование электромагнитных процессов электромеханических систем на основе метода конечных элементов: Учеб. пособие / Под общ. ред. Ю.З. Ковалева. – Омск: Изд.-во ОмГТУ, 1993. – 56 с.
7. Андреева, Е.Г., Ковалев, В.З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: Монография / Под общ. ред. Ю.З. Ковалева. – Омск: Изд.-во ОмГТУ, 1999. – 172 с.
8. Андреева, Е.Г. Построение алгоритма расчета магнитного поля электромагнитного двигателя методом конечных элементов на регулярной сетке. // Задачи динамики электрических машин. – Омск, 1987. – С. 126-131.
9. Андреева, Е.Г. Построение математической модели динамики электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного

движения и метод ее исследования. / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 1994. -14 с. – Деп. в ВИНТИ 14.11.94, № 2586 – В94.

10. Андреева, Е.Г., Татевосян, А.А. Имитационное трехмерное моделирование с помощью программного пакета ANSYS конструкции линейного магнитоэлектрического двигателя.// Омский научный вестник. – 2010. – №2. – С.141-144.

11. Андрейчиков, А.В., Андрейчикова, О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций // учеб. пособие для студентов ВУЗов, обучающихся по направлению «Прикладная математика и физика» или по направлениям и специальностям в области естественных наук, техники и технологии, системного анализа и управления/ А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. Москва, 2011 - 304 с.

12. Антипов, В.Н. Анализ и исследование соразмерного ряда синхронных машин как ветрогенераторов в диапазоне частот вращения 75-300 мин-1/ В.Н. Антипов, Я.Б. Данилевич// Электротехника. 2009. -№1. - С. 27-33.

13. Арнольд, Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. - М.: Энергия. 1969 - 184 с.

14. Балагуров, В.А., Галтеев, Ф.Ф. Электрические машины с постоянными магнитами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.

15. Балагуров, В.А., Гридин, В.М., Лозенко, В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. - М.: Энергия, 1975. -128 с.

16. Бартенев, Г.М. Релаксационные свойства и структура эластомеров.- Труды Краснодар. политехн. ин-т, 1977, вып. 242. Механика эластомеров, С. 7-21 .

17. Бахвалов, Н.С., Жидков, Н.П. Кобельков, Г.В. Численные методы – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002 г. – 632 с.: ил.

18. Бахвалов, Ю.А., Горбатенко, Н.И., Гречихин, В.В. Метод решения обратных задач магнитных измерений. // Измерительная техника - 2015 - №3 – С.58-60.

19. Безруких, П.П., Безруких, П.П., Грибков, С.В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. - М.: «ИнтехэнергоИздат», «Теплоэнергетик», 2014. - 304 с.

20. Беляков, П.Ю. Производство электроэнергии на базе энергии ветра/ П.Ю. Беляков // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008.- №1. С. 56-59.

21. Беспалов, В.Я., Бородин, Д.А., Бородин, В. Д. Постоянная Арнольда // Электричество. - 2012. - № 4. - С. 60-68.

22. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высш. шк., 1978. 528 с.

23. Брынский, Е.А., Данилевич, Я.Б., Яковлев, В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах.- Л.: Энергия, 1979. – 176 с.

24. Бусаров, С. С., Недовенчаный, А. В., Громов, А. Ю., Бусаров, И.С., Титов, Д.С. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора [текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2016. – № 6. – С. 6–10.

25. Бусаров, С.С., Васильев, В.К., Бусаров, И.С., Сажин, Б.С., Панин, Ю.Н. Параметрический анализ рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчета// Омский научный вестник №4 (154)/ - Омск, 2017 С.40-44.

26. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.: ил.

27. Вержбицкий, Л. Г. Экспериментальные исследования криогенного синхронного двигателя с радиально тангенциальными постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводящими элементами на роторе/Л.Г. Вержбицкий, Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев, В.Н. Полтавцев, Д.С. Дежин, Р.И. Ильясов, Д.В. Голованов//М.: Электричество №6, - 2010, –С.29-34.

28. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: монография / С.В. Тарасов, Ф.П. Шкрабец, В.А. Задонцев, С.В. Отчич; под общ. ред. В.А. Дзензерского и Г.Г. Пивняка. - Д.:НГУ, 2014. - 156 с.

29. Волков, А.Н., Мацко, О.Н., Мосалова, А.В. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 141–149. DOI: 10.18721/JEST.24414.

30. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студ. высш. учеб. заведений. 3-е изд., перераб. - Л. Энергия, 1978. - 832 с.

31. Высокоскоростные электрические машины [Электронный ресурс]. URL: <https://w-elm.a.com/catalog/vsem/>.

32. Высоцкий, В. С. Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике / Высоцкий В.С., Сытников В.Е., Илюшин К.В., Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Егошкина Л.А. // Электричество. - 2005. - № 7. -С . 31-40.

33. Гасников, А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска : учебное пособие / А. В. Гасников. – М. : МФТИ, 2018. – 286 с. – Изд. 2-е, доп. ISBN 978-5-7417-0667-1.

34. Горшков, А.Г., Старовойтов, Э.И., Тарлаковский, Д.В. Теория упругости и пластичности: Учеб.: Для вузов. – М.: Физматлит, 2002.- 416 с. – ISBN 5-9221-0229-X.

35. Гурко, А.Г., Плахтеев, А.П., Плахтеев, П.А. Повышение точности оценки состояния динамичных объектов комплексом MATLAB-ARDUINO при проектировании кибер-физических систем //Прогрессивные информационные технологии, 2016, DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-10.

36. Демирчян, К.С., Чечурин, В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.

37. Денисов, П. А. Метод идентификации намагниченности постоянных магнитов электромагнитной системы // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 12 марта 2013 г. Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 84–86.

38. Дмитриев, Д.О., Курбатов, П.А. Методы анализа динамических характеристик магнитоэлектрических линейных приводов // Электротехника. - 1998. - №1. – С. 13-17.

39. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

40. Елистратов, В.В. Концепция автономного энергоснабжения северных территорий с использованием энергетических модулей на основе ВИЭ//VIII Международный Конгресс «Энергосбережение и энергоэффективность – динамика развития». Сб. докл.–С.Петербург, 2018, С.49-52.

41. Ефимов, И.Г., Соловьев, А.В., Викторов, О.А. Линейный электромагнитный привод. – Л.: Издательство Ленинградского университета. 1990. – 212 с. ISBN 5-288-00476-5.

42. Жильцов, А. В., Стадник, И. П. Измерение намагниченности однородно намагниченных постоянных магнитов // Известия вузов. Электромеханика. 2000. № 2. С. 83–86.

43. Зарицкая, Е.И. Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок / Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников // Проблемы техники: Научно-технический журнал. – Одеса: ОНМУ, 2013. – Вип. 2. – С. 17-23.

44. Зенкевич, О., Морган, К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

45. Золотухин, И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Металлургия, 1986. 176 с.

46. Иванов-Смоленский, А. В., Абрамкин, Ю. В., Власов, А. И., Кузнецов, В. А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. / Под ред. А. В. Иванова-Смоленского. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 214 с.

47. Ивоботенко, Б.А., Ильинский, Н.Ф., Копылов, И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. -184 с.

48. Ильин, В.П. Численные методы решения задач электрооптики. – Новосибирск: Наука, 1974. – 202 с.

49. Исмагилов, Ф. Р. Обоснование целесообразности применения аморфной стали в магнитопроводах трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, Д. В. Гусаков, А. А. Меднов // Электричество. - 2018. - №5. - С. 8-15.

50. Исмагилов, Ф.Р., Герасин, А.А., Хайруллин, И.Х., Вавилов, В.Е. И87 Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. –М.: Машиностроение, 2014. –267 с.

51. Каханер, Д., Моулер, К., Нэш, С. Численные методы и программное обеспечение: Пер. с англ. – Изд. второе, стереотип. – М.: Мир, 2001.- 575 с., ил. ISBN 5-03-003392-0.

52. Кашин, Я.М., Кашин, А.Я., Князев, А.С., Копелевич, Л.Е., Самородов, А.В. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок//Вестник АГУ. - Вып. 1(196) - 2017, С. 95-106.

53. Ковалев, Ю.З., Андреева, Е.Г. Моделирование взаимодействующих динамических систем при определении электромагнитных характеристик // Информационные технологии в моделировании и управлении: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – СПб, 1996, - С. 80-81.

54. Ковалев Ю.З., Андреева Е.Г., Татевосян А.С. Расчет плоскопараллельного квазистационарного электромагнитного поля методом конечных элементов на неравномерной сетке // Алгоритмы и программы: Информ. бюл. – 1986. - №3. – С. 27.

55. Ковалев, Ю.З., Андреева, Е.Г., Татевосян, А.С. Расчет плоскопараллельного квазистационарного электромагнитного поля методом конечных элементов на неравномерной сетке // Алгоритмы и программы: Информ. бюл. – 1986. - №3. – С. 27.

56. Ковалев, Ю.З. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД/Ю.З. Ковалев, А.С. Татевосян, А.А. Татевосян: //Омский научный вестник №18, 2002, -С.118-122.

57. Ковалев, Ю.З. Разработка алгоритмов исследования динамики обобщенного электромеханического преобразователя энергии на ЭЦВМ: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Москва, 1980. – 40 с.

58. Ковалев, Ю.З., Татевосян, А.А. Программное обеспечение «Выбор». Исследование параметров оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров. М.: ВНТИЦ, 2004. - №50200400270.

59. Ковалев, Ю.З. Татевосян, А.С., Мягков, А.Д. Оптимизация параметров электромагнитных двигателей по максимуму КПД // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1987. - 7. – С.25 - 31.

60. Колтунов, М.А., Матвеев, В.П., Трояновский, И.Е. Оптимизационный, квазистатический и динамический расчет вязкоупругого осесимметричного тела. – Труды Краснодар. политехн. ин-т, 1980, вып. 101. Механика эластомеров, С. 5-12.

61. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / И. П. Копылов ; отв. ред. И. П. Копылов. - 4-е изд., пер. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. - 767 с.

62. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука: Гл. ред. физ.- мат. лит., 1970.- 720 с.

63. Кулагин, Р. Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами. Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 13(86) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. - С. 79-80.

64. Кулебакин, В. С. Производство, преобразование и распределение электрической энергии на самолетах : учебное пособие для авиационных вузов /В. С. Кулебакин, В. Т. Морозовский, И. М. Синдеев .- М. : Оборонгиз, 1956.- 479 с.

65. Кулешов, Е.В. Магнитоэлектрический синхронный ветрогенератор с емкостным компенсатором // Труды дальневосточного гос. техн. ун-та. 2003. С. 17–19.

66. Курбатов, П.А., Аринчин, С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.-168 с.

67. Курносов, М.Г., Пазников, А.А. Эвристические алгоритмы отображения параллельных π -программ на мультикластерные вычислительные и GRID-системы// Вычислительные методы и

программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14. № 2. С. 1-10.

68. Левин, А. В. Проектирование и обеспечение требуемого качества конструкции электрических агрегатов авиационной техники нового поколения // Диссертация на соискание ученой степени доктора тех. наук, М. -2004.

69. Лукутин, Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. - М.: Энергоатомиздат, 2008. - 231 с.

70. Лысенко, О.А. Исследование и расчет магнитной системы встроенных буксовых генераторов грузовых вагонов: DOI 10.25206/1813-8225-2020-174-52-56/ О.А. Лысенко, Л.Д. Федерова, С.Г. Шантаренко//Омский научный вестник, № 6 (174), Омск, -2020, С. 52-56.

71. Магниты «Мидора»//Интернет-ресурс: https://www.midora.ru/neodimovye_magnity/ Режим доступа 29.09.21 г.).

72. Мак-Кракен, Д., Дорн, У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе. – М.: Мтр, 1977.- 584 с.

73. Марчук, Г.И., Агошков, В.И. Введение в проекционно-сеточные модели - М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 416 с.

74. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 5-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.: ил. ISBN 5-7038-1860-5.

75. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплавов неодима с железом и бором. Технические условия ТУ 1984-001-18785310-2003. ООО "НПК «Магниты и магнитные технологии», Москва, 2003.

76. Михлин, С.Г. Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 512 с.

77. Накопители энергии : [Учеб. пособие для электроэнерг. и электромех. спец. вузов] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич; Под ред. Д. А. Бута. - М. : Энергоатомиздат, 1991. - 398 с.

78. Недовенчаный, А.В., Буханец, Д.И., Щербань, К.В. Верификация методики расчёта рабочих процессов бесшмазочных тихоходных длинноходовых поршневых ступеней высокого давления. Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2018. Т.2, №2. – С.19-25.

79. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / Кривцов В.С., Олейников А.М., и др. - ХАИ, 2003. - 400 с.

80. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / Кривцов В.С., Олейников А.М., и др. - ХАИ, 2004. - 519 с.

81. Нейман, В.Ю. Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 101–108.

82. Нейман, В.Ю. Сравнение геометрически подобных систем электромагнитов по условию постоянства теплового критерия / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2011. – № 12. – С. 14а–16.

83. Нейман, Л.А. Конечно-элементное моделирование магнитного поля для расчета статических параметров линейных электромагнитных машин / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, В.К. Терехов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – № 2. – С. 26–30.

84. Никитенко, А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / А.Г. Никитенко. – М.: Высш. школа, 1983. – 192 с.

85. Никитенко, А.Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 135 с.

86. НПО «Электросфера»//<http://electrosfera.ru>.

87. Олейников, А.М., Канов, Л.Н., Матвеев, Ю.В., Зарицкая, Е.И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами. *Электротехника та електроенергетика*. 2010. № 2. С. 62-67.

88. Олейников, А.М., Матвеев, Ю.В., Солодкий, А.В. Опыт конструирования автономной вертикально-осевой ветроэлектрической установки малой мощности. *Водный транспорт*. 2012. № 1 (13). С. 83-89.

89. Ортега, Дж., Пул, У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений.: Пер. с англ.- М.: Наука, 1986.- 288 с.

90. Основы автоматического управления / Под ред. В.С. Пугачева. – М.: Наука, 1967, 680 с.

91. Павлов, П.А., Паршин, Л.К., Мельников, Б.Е., Шерстнев, В.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / Под ред. Б.Е. Мельникова – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 528 с.

92. Пат. РФ № 2303849, МПК H02K 21/18. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / Шкондин В. В., опубл. 27.07.07, Бюл. № 28.

93. Пат. №2516270 РФ. МПК H02K 21/12 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян. Заявка №2012138233/07; Опубл. 20.05.2014, Бюл. №14. – 8 с.: ил.

94. Пат. №2565775 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2014140005/07; Опубл. 20.10.2015, Бюл. №29. – 8 с.: ил.

95. Пат. №2585279 РФ. МПК H02K 1/27 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян, Б.И. Огорелков. Заявка №2015122572/07; Опубл. 27.05.2016, Бюл. №15. – 12 с.: ил.

96. Пат. №2604051 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2015140379/07; Оpubл. 10.12.2016, Бюл. №34. – 10 с.: ил.

97. Пат. №2632817 РФ. МПК H02K 23/00 (2006.01). Способ получения повышенного выходного напряжения/ А.А.Татевосян. Заявка №2016118977; Оpubл. 10.10.2017, Бюл. №28. – 8 с.: ил.

98. Пат. №2660945 РФ. МПК H02K 3/12 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Корнев. Заявка №2016147632; Оpubл. 11.07.2018, Бюл. №20. – 14 с.: ил.

99. Пат. №2667661 РФ. МПК H02K 23/26 (2006.01). Способ изготовления усовершенствованной магнитоэлектрической машины/А.А. Татевосян. Заявка №2017136935; Оpubл. 24.09.2018, Бюл. №27. – 13 с.: ил.

100. Пат. №2687964 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2018136868; Оpubл. 17.05.2019, Бюл. №14. – 9 с.: ил.

101. Пат. №2693011 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор модульного типа с постоянными магнитами/ А.А.Татевосян. Заявка №2018146967; Оpubл. 01.07.2019, Бюл. №19. – 12 с.: ил.

102. Пат. №2707559 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Линейная магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, С.С. Сирوماха, С.С. Бусаров Заявка №2019117544 Оpubл. 28.11.2019, Бюл. №34. – 12 с.: ил.

103. Пат. №2718641 РФ. МПК. G01N 24/08 (2006.01) Способ и устройство идентификации постоянных магнитов по объемной намагниченности/ А.А.Татевосян. Заявка №2019127858; Оpubл. 10.04.2020, Бюл. №10. – 10 с.: ил.

104. Пат. №2720882 РФ. МПК. H02K 41/03 (2006.01) Электротехнический комплекс поршневого компрессора на основе линейной

магнитоэлектрической машины /А.А.Татевосян, С.С. Бусаров, С.С. Сиромеха. Заявка №2019127825; Оpubл. 13.05.2020, Бюл. №14. – 12 с.: ил.

105. Пат. №2743072 РФ. МПК. G01N 24/08 (2006.01) Способ и устройство идентификации постоянных магнитов по объемной намагниченности/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2020120695; Оpubл. 15.02.2021, Бюл. №5. – 2 с.: ил.

106. Пластинин, П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 2006. – 456 с.

107. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Пятина Ю.М. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

108. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная, В. Н. Меркушев, В. Н. Пашков. - Учеб. пособие по курсовому проектированию. - ХАИ, 2003. - 125 с.

109. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭЦВМ. / Под ред. Л.В. Данилова, С.И. Филиппова. – Л.: Высш. шк. , 1982. – 420 с.

110. Ряшенцев, Н.П., Ковалев, Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. – Новосибирск: Наука, 1974. – 186 с.

111. Самарский, А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983 . – 616 с.

112. Сафин, А.Р. Методы проектирования и создание синхронных магнитоэлектрических машинс постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов//Дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. - Казань, -2019 -С. 330.

113. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020617967 ФИПС. Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе электротехнических комплексов по критерию

максимума КПД: заявл. 2020616972, опубл. 15.07.2020. / А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

114. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021660370 Российская Федерация. Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов модульного типа в составе электротехнических комплексов по максимуму удаленной мощности: №2021619730; заявл. 25.06.2021, опубл. 25.06.2021/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

115. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №3146 ИОУ РАО ОФЭРНиО. Программное обеспечение «Деформация». Исследование напряженно-деформированного состояния осесимметричной модели упругих материалов и расчет их релаксационных характеристик. /Ю.З. Ковалев, А.А. Татевосян. Дата регистрации 2004 год – 19 с.: ил.

116. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №3287 ИОУ РАО ОФЭРНиО. Программное обеспечение «Выбор». Исследование параметров оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров. /Ю.З. Ковалев, А.А. Татевосян, Н.А. Дудина. Дата регистрации 2004 год, – 22 с.: ил.

117. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №3605 ИОУ РАО ОФЭРНиО. Программное обеспечение «Синтез многоконтурной схемы замещения по моделированию вязкоупругих свойств эластомеров» /Ю.З. Ковалев, А.А. Татевосян, Н.А. Дудина. Дата регистрации 2004 год.

118. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №3875 ИОУ РАО ОФЭРНиО. Программное обеспечение «Эластомер» для исследования параметров многоконтурной схемы замещения вязкоупругих свойств материалов на основе процесса релаксации /Ю.З. Ковалев, А.А. Татевосян. Дата регистрации 2004 год – 9 с.: ил.

119. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №2013619811 ФИПС. Расчет оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по исследованию вязкоупругих свойств эластомеров/А.А. Татевосян. Дата регистрации 20.12.2013 год – 1 с.: ил.

120. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №2014619695 ФИПС. Оптимизация магнитной системы электромагнитов постоянного тока/А.А. Татевосян. Дата регистрации 20.10.2014 год – 1 с.: ил.

121. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №2015612665 ФИПС. Расчет индуцированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины /А.А. Татевосян, Б.И. Огорелков. Дата регистрации 20.03.2015 год – 1 с.: ил.

122. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №2019614129 ФИПС. Оптимизация электромагнитных параметров синхронного генератора модульного типа с постоянными магнитами и определение основных размеров его магнитной системы/А.А. Татевосян. Дата регистрации 01.04.2019 год – 1 с.: ил.

123. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №2019661236 ФИПС. Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения/А.А. Татевосян. Дата регистрации 23.08.2019 год – 1 с.: ил.

124. Свойства неодимовых магнитов - Интернет ресурс - <https://supermagnet.ru/content/info.html>.

125. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир., 1979. – 392 с.

126. Сергеев, М.Ю. Импульсный генератор на базе асинхронной машины с вентильным возбуждением. Автореф диссертации на соискание ученой степени канд. Техн. наук, 1998.

127. Симонов, Б.Ф. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
128. Сипайлов, Г.А., Кононенко, Е.В., Хорьков, К.А. Электрические машины (специальный курс). - М. Высшая школа, 1987-287 с.
129. Системы регулирования электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением / В.Д. Кочетков, Л.Х. Дацковский, А.В. Бирюков, Ю.М. Гусяцкий, В.И. Роговой // Электротехн. пром-сть. Сер. 08. Электропривод: Обзор. информ. 1989, Вып. 26. С. 1-80.
130. Солодовников, В.В., Плотников, В.Н., Яковлев, А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с..
131. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: учебное пособие / под ред. А. И. Бертинова. - М.: Энергоиздат, 1982. - 552 с.
132. Станкевич, И.В., Яковлев, М.Е., Си Ту Хтет. Разработка алгоритма контактного взаимодействия на основе альтернирующего метода Шварца // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки», М.: -2011 С. 134-140.
133. Тамм, И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 504 с.
134. Татевосян, А. А. Линейный магнитоэлектрический привод: монография /А.А. Татевосян; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 108 с.: ил.
135. Татевосян, А.А., Андреева, Е.Г. Методика формирования численного проекционно-сеточного алгоритма на основе «трехмерного регулярного элемента» для расчета 3D-моделей магнитного поля в

цилиндрической системе координат для синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологических электротехнических комплексов //Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 40-45.

136. Татевосян, А.А., Андреева, Е.Г. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами// Промышленная энергетика. – 2019. – №4. 15 – С.20-28.

137. Татевосян, А.А., Бубнов, А.В. Формирование общего подхода к оптимальному проектированию высокотехнологических энергоэффективных электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин //Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 46-51.

138. Татевосян, А.А. Выбор оптимальной конструкции, экспериментальное исследование и математическое моделирование магнитного поля низкооборотного синхронного генератора на постоянных магнитах//Омский научный вестник. – 2018. – №6. – С.86-93.

139. Татевосян, А.А. Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов на их энергетические характеристики //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – №2. –т. 15 – С.15-25.

140. Татевосян, А.А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа. //А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева, И.А. Семина// Омский научный вестник. – 2010. – №1. – С.110-113.

141. Татевосян, А.А. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в магнитоэлектрическом приводе тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД// Омский научный вестник. – 2020. – №3 (171). –С. 37-41.

142. Татевосян, А.А., Мищенко, В.С. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами //Омский научный вестник. – 2016. – №4. – С. 90-93.

143. Татевосян, А.А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок//Омский научный вестник №1 (175), - Омск, С. 32-38.

144. Татевосян, А.А. Общий подход к построению математической модели магнитоэлектрического привода с учетом вязкоупругих свойств эластомеров//Энергетика на рубеже веков: Сб. матер. Науч.-практ. конф. тез. докл: Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. С. 204.

145. Татевосян, А.А., Огорелков, Б.И., Татевосян, А.С. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения. Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). - С. 179-183.

146. Татевосян, А.А. Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения. №2019661236 /Св-во о регистрации программного продукта -2019.

147. Татевосян, А.А. Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети / А.А. Татевосян// Электричество, №7, – 2021, С. 61-70.

148. Татевосян, А.А. Расчет параметров оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров. // Омский научный вестник, 2004.

149. Татевосян, А.А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения//Омский научный вестник. – 2019. – №4 (166). – С.48-51.

150. Татевосян, А.А. Синтез многоконтурной схемы замещения эластомеров. // Электротехнические и информационные комплексы и системы – 2013. – №3. – С.24-31.

151. Татевосян, А.А. Сравнительный анализ магнитоэлектрического привода с существующими линейными приводами тихоходных одноступенчатых поршневых агрегатов/А.А. Татевосян, С.С. Бусаров, Т.А. Замиралова// Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Матер. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Омск, –2020. С. 183-185.

152. Татевосян, А.А., Татевосян, А.С., Бельский, А.А., Добуш, В.С. Разработка стенда для испытания синхронных генераторов с постоянными магнитами // Промышленная энергетика. – 2019. № 12. – С. 57-62.

153. Татевосян, А.А., Татевосян, А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения//Известия томского политехнического института. – 2014. – т. 325. – №4. –С. 121-133.

154. Татевосян, А.А. Численное моделирование физических процессов в электротехническом комплексе для испытания эластомеров с использованием метода конечных элементов. // Наука. Технологии. Инновации. /Материалы докладов всерос. науч. конф. молодых ученых. Часть 1. Новосибирск: 2003, С.155-156.

155. Татевосян, А.А. Экспериментальная оценка характеристик системы «компрессорная ступень–линейный магнитоэлектрический привод / С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, И. С. Бусаров, А. О. Жуков.//Омский научный вестник. Серия Авиационно- ракетное и энергетического машиностроение Т.5, №2, – 2021, С.59 – 65.

156. Татевосян, А.С., Татевосян, А.А. Магнитоэлектрическая дисковая машина. Патент на полезную модель №116714, 2011.

157. Твердотельные реле серии SSR, TSR. Руководство пользователя. // http://www.fotek.com.ua/webfm_send/148 (дата обращения 17.05.2021).
158. Телешова, Н.С. Математическая модель магнитоэлектрической синхронной машины // Электроавтоматика: Сб. матер, юбилейной научной конф. Вологдинские чтения. - Владивосток: ДВГТУ, 2009. - С. 146-148.
159. Тозони, О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
160. Туровский, Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
161. Угаров, Г.Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.
162. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
163. Фотин, Б.С. Рабочие процессы поршневых компрессоров: автореф. дис. канд. техн. наук / Б.С. Фотин. – Л.:ЛПИ им М.И. Калинина, 1974. – 34 с.
164. Френкель, М.И. Поршневые компрессоры. – Л.: Машиностроение, 1969. – 744с.
165. Харитонов, В.П. Автономные ветроэлектрические установки/ В. П. Харитонов М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006.-280с.
166. Хейгеман, Л., Янг, Д. Прикладные итерационные методы: Пер. с англ.- М.: Мир, 1986. – 448 с.
167. Хитерер, М.Я., Овчинников, И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона принт 2004. – 368 с. ISBN 5- 7931- 0306-6.
168. Чиликин, М.Г, Ключев, В.И., Сандлер, А.С. Теория автоматизированного электропривода.- М.:Энергия, 1979, -614 с.
169. Численное моделирование стационарных магнитных полей магнитоэлектрических систем методом конечных и граничных элементов

/ Бахвалов Ю.А., Никитенко А.Г., Гринченков В.П., Косиченко М.Ю. // Электротехника. – 1999. - №1. – С. 29-32.

170. Шарафеддин, К.Ф., Цырук, С.А., Сангов, Х.С., Михеев, Д.В. Система автоматического регулирования напряжения трехфазного самовозбуждающегося асинхронного генератора ветроэнергетической установки. //Промышленная энергетика, 2018, №12, С. 33-41.

171. Шевченко, А.Ф. Многополюсные магнитоэлектрические генераторы с дробными однозубцовыми обмотками для ветроэлектрических установок //Электротехника. 1997, №9. С. 13.

172. Шымчак, П. Дисковые синхронные машины с постоянными магнитами: современное состояние и тенденции развития / П. Шымчак // Электричество. - 2009. - №8. - С. 36-46.

173. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Распоряжение Правительства Российской Федерации №1715-р от 13.11.2019 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902187046> (дата обращения: 23.01.2020).

174. Юша, В. Л., Бусаров, С. С., Недовенчаный, А. В. Оценка взаимосвязи между законом перемещения поршня тихоходной длинноходовой ступени и характеристиками привода компрессорного агрегата [текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2018. – № 2. – С. 11–15.

175. Юша, В. Л., Бусаров, С. С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.

176. Юша, В.Л., Бусаров, С.С., Гошля, Р.Ю., Недовенчаный, А.В. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания // Омский

научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение Т.2, №2./ –Омск, 2018 – С.13-18.

177. Юша, В.Л. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объемного действия для автономных мобильных установок: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Москва, 2008. – 32 с.

178. Anderson, P. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 320, Issue 20, October 2008, Pages e589-e593.

179. Anikin, A. [et al.]. Modern efficient numerical approaches to regularized regression problems in application to traffic demands matrix calculation from link loads // Proceedings of International conference ITAS – 2015. – Russia, Sochi, September, 2015. – 16 p. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1508/1508.00858.pdf>.

180. Arduino Support from MATLAB [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>.

181. Arduino Support from Simulink [Electronic resource]. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/index.html>. (дата обращения 17.05.2021). [21.052021].

182. ASTM Designation: D 5992 – 96 Standard Guide for Dynamic Testing of Vulcanized Rubber and Rubber-Like Materials Using Vibratory Methods.

183. Bondar, R.P. Research of the magnetoelectric linear oscillatory motor characteristics during operation on elastoviscous loading. Electrical engineering & electromechanics, 2019, no.1, pp. 9-16. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.02.

184. Cristian, A. Hybrid electric propulsion technologies 1mw high efficiency generator [Электронныйресурс]. URL: [http://www.nianet.org/ODM/presentations/Cristian_Anghel_-_Honeywell__Honeywell_Technologies_for_Hybrid_Electric_Propulsion_\(002\).pdf](http://www.nianet.org/ODM/presentations/Cristian_Anghel_-_Honeywell__Honeywell_Technologies_for_Hybrid_Electric_Propulsion_(002).pdf).

185. DIN 53535- Bestimmung der visco-elastischen Eigenschaften von Elastimere n. Testing of rubber; determination of the visco-elastic property of rubber under forced vibration beyond resonance.

186. Dixon, J.W., Ooi, B.T. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 35. №4. November 1988. P. 508-515.

187. Galea, M. Design of a high force density tubular permanent magnet motor / M. Galea, C. Gerada, T. Raminosa, P. Wheeler // The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM. - 2010. - P. 1-6.

188. Ganey, E. High-reactance permanent magnet machine for high-performance power generation systems / Ganey E. // SAE Tech. Papers, Power Syst. Conf - 2006. DOI: 10.4271/2006-01-3076.

189. Ganey, E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power Generation Systems / E. Ganey // IEEE Electrification Magazine. - 2014. - P. 1-13.

190. Gieras, J. F. PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review / J. F. Gieras // XX th Int. Conf. Elect. Mach., 13132472. - 2012. - P. 2573-2579. DOI: 10.1109/ICEIM ach.2012.6350248.

191. H. Vetter, "The Sulzer Oil-Free Labyrinth Piston Compressor" in International Compressor Engineering Conference, (Purdue University, West Lafayette, 1972), pp. 221–228.

192. Habetler, T.G. A space vector rectifier regulator for AC/DC/AC converters//IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 8, №1, 1993, P.30-36.

193. How to parallelize the Gaussian Elimination algorithm[Электронный ресурс]//<https://stackoverflow.com/questions/52884743/how-to-parallelize-the-gaussian-elimination-algorithm/52884805>. - Режим доступа 27.09.2021.

194. Huynh Co , Zheng Liping, Acharya Dipjyoti. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – March 2009. – Vol. 131.

195. Ismagilov, F. R. High-Speed Magneto-Electric Slotless Generator, Integrated into Auxiliary Power Unit / Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Bekuzin V.I., Ayguzina V.V. // Design and Experimental Research of a Scaled-Size Prototype International Review of Aerospace Engineering. - 2016. - Vol. 9 (5). - P. 173-179.

196. Ismagilov, F. R. Multidisciplinary Design of Ultra-High-Speed Electrical Machines / F. R. Ismagilov, N. Uzhegov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin, V. V. Ayguzina // IEEE Trans. Energy Convers. - 2018. - Vol. 33, №3. P. 1203-1212. DOI: 10.1109/TEC.2018.2803146.

197. Jahns, T. M. Flux-weakening regime operation of an interior permanent magnet synchronous motor drive / T. M. Jahns // IEEE Trans. Ind. Appl. - 1987. - Vol. IA-23, №4. - P. 681-689.

198. Jang-Young, Choi, Han-Bit, Kan. Comparison and dynamic behavior of moving-coil linear oscillatory actuator with/without mechanical spring driven by rectangular voltage source. Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2014, vol.3, no.4, pp. 394-397. doi: 10.11142/jicems.2014.3.4.394.

199. Jian, L. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation / L. Jian, K. Chau, J. Jiang // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2009. - Vol. 45. № 3. - P. 954-962.

200. Kolondzovski, Z., Arkkio, A., Larjola, J. Power Limits of High-Speed Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011. Vol. 26. № 1. P. 73–82.

201. Kyu-Hwan, Hwang, Yun-Hyun, Cho. Design and dynamic characteristics analysis of moving magnet linear actuator for human. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004, pp. 251-254. doi: 10.1109/ICMECH.2004.1364447.

202. Marrocco, A. Pironneau, O. Optimum design with Lagrangian finite elements: Design of an electromagnet. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 15, Issue 3, September 1978, Pages 277-308.

203. McPhee, A.J., Klimpke, B., MacGregor, S.J. Use of the boundary element method for pulsed power electromagnetic field design // 11th IEEE Int. Puls. Power Conf., Baltimore, Md, June 29 – July 2, 1997: Dig. Techn. Pap. Vol. 2. – Piscataway (N.Y.), 1997. – P. 1245-1250.

204. Nesterov, Yu. Implementable tensor methods in unconstrained convex optimization // CORE Discussion Papers. 2018/5. – 2018. – 22 p. – URL: https://alfresco.uclouvain.be/alfresco/service/guest/streamDownload/workspace/SpacesStore/aabc2323-0bc1-40d4-9653-1c29971e7bd8/coredp2018_05web.pdf?guest=true.

205. Okunev, V.D. A Changes in cluster magnetism and suppression of local superconductivity in amorphous FeCrB alloy irradiated by Ar⁺ ions. / V. D. Okunev, Z. A. Samoilenko, H. Szymczak, A. Szewczyk, R. Szymczak, S. J. Lewandowski, P. Aleshkevych. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 399, 1 February 2015, Pages 192-198.

206. Papini, L. A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains / L. Papini, T. Raminosa, D. Gerada, C. Gerada // IEEE Trans. Ind. Electron.- 2013.- Vol. 61, № 6. - P. 3071-3080. DOI: 10.1109/TIE.2013.2282604.

207. Ruddy, B.P. High Force Density Linear Permanent Magnet Motors: “Electromagnetic Muscle Actuators”// Massachusetts Institute of Technology -2012, 202 p. <https://core.ac.uk/download/pdf/10129772.pdf> - Интернет ресурс 14.11.2020.

208. Saban, M., Gonzalez-Lopez, D., Bailey, C. Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46. № 5. P. 1769–1777.

209. Saban, M. Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines / M. Saban, D. Gonzalez-Lopez, C. Bailey // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2010. - Vol. 46, № 5. - P. 1769-1777.

210. Tatevosyan, A.A. Determination of conditions for optimal control of a permanent magnet synchronous motor of a single-stage reciprocating compressor for a proposed law of motion for ensuring the maximum efficiency/A.A. Tatevosyan DOI:10.1088/1742-6596/1901/1/012080// Journal of Physics: Conference Series. – 1901 (2021) 012080. – P. 1-7.

211. Tatevosyan, A.A., Fokina, V.V. The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetoelectric generator. // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings, art. № 7147255.

212. Tatevosyan, A.A. Modeling Of Magnetoelectric Drive For The Research Of Rheological Properties Of Elastomers // AIP Conference Proceedings, 2018.

213. Tatevosyan, A.A., Tatevosyan, A.S. The study of magnetic characteristics of amorphous alloys at various frequencies and ranges of magnetic flux. // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings, art. № 7147236.

214. Tatevosyan, A.S., Tatevosyan, A.A. Investigation of Elastomer Rheological Properties Based on Multi-Circuit Scheme Synthesis of the Experimental Sample Substitution.//Oil and Gas Engineering Conference: Omsk State Technical University, AIP Conference Proceedings, Omsk, 2017, T.1876 №020015.

215. Tatevosyan, A.S., Tatevosyan, A.A., Zaharova, N.V. The study of the electrical steel and amorphous ferromagnets magnetic properties.// International

Conference on Oil and Gas Engineering (OGE): proceedings, Omsk, April 25-30, 2016 – Омск, 2016 p.727-734.

216. Tikhonova, O., Malygin, I., Beraya, R., Sokolov, N., Plastun, A. Loss calculation of induction motor with ring windings by “ANSYS Maxwell”//Сб. науч. тр. междунар.- конф. «Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ-2017», г. Екатеринбург, 13-16 нояб. 2017, С.63-66.

217. Uehara, M. Microstructure and permanent magnet properties of a perpendicular anisotropic NdFeB/Ta multilayered thin film prepared by magnetron sputtering // Journal of Magnetism and Magnetic. 2004. Vol. 284. P. 281–286.

218. Yusha, V.L. Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time / V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyi // AIP Conference Proceedings 2007, 030057 (2018); – p.030057-1 – 030057-6.

219. Yusha, V.L., Busarov, S.S., Gromov, A, Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and petroleum engineering. 2017. Chemical and Petroleum Engineering, 53(7–8). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>.

ПРИЛОЖЕНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НТК«Криогенная техника»
А.В.Громов
5 » 12 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов докторской диссертации А.А.Татевосяна
на тему: «Высокотехнологические электротехнические комплексы на
основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин»

Настоящий акт удостоверяет, что результаты диссертационного исследования, выполненные Татевосяном Андреем Александровичем в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», использованы при расчете и проектировании электротехнических комплексов с тихоходными синхронными линейными магнитоэлектрическими машинами с постоянными магнитами.

В частности, произведен расчет линейного магнитоэлектрического двигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами для привода поршневого компрессора на развиваемое тяговое усилие 100 Н и 3000 Н по предложенным Татевосяном А.А. методикам оптимального проектирования.

Использование предложенных методик по расчету и проектированию тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами позволяет определить для исследуемых конструкций машин геометрию магнитной системы, массо-габаритные показатели, удовлетворяющие критерию оптимальности максимума КПД.

Заместитель генерального директора
по научной работе, к.т.н.

В.И.Ляпин

Начальник отдела

Д.Л.Курочкин

Начальник отдела

М.В.Липин



Акционерное общество «Янтарьэнерго»
Россия, 236022, г. Калининград,
Театральная ул., 34,
Почтовый адрес: 236035, а/я № 5065
www.yantarenergo.ru

19.11.2019 № ЯЭ/01/1928

тел: (4012) 57-64-59
факс: (4012) 53-00-26
e-mail: public@yantarenergo.ru

Об использовании результатов
докторской диссертации

Акт

об использовании результатов докторской диссертации А.А. Татевосяна
на тему: «Высокотехнологические электротехнические комплексы на основе
тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин»
в производственной деятельности АО «Янтарьэнерго»

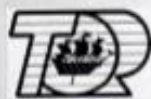
Настоящий акт удостоверяет, что результаты диссертационного исследования, выполненные Татевосяном Андреем Александровичем в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», использованы при расчёте и проектировании электротехнических комплексов ветроэнергетических установок с тихоходными синхронными магнитоэлектрическими машинами в рамках выбора ветроэнергетических установок при проектировании ветропарка в Калининградской области.

В частности, произведён расчёт ветроэнергетической установки по предложенным Татевосяном А.А. методикам оптимального проектирования синхронного магнитоэлектрического генератора с общим круговым магнитопроводом, а также синхронного генератора модульного типа с независимыми магнитопроводами.

Использование предложенных методик по расчёту и проектированию тихоходных магнитоэлектрических генераторов в составе ветроэнергетических установок позволило определить оптимальные конструктивные и массо-габаритные показатели актуальных конструкций генераторов, имеющих максимально возможный коэффициент полезного действия и максимум удельной полезной мощности.

Генеральный директор

К.А. Юткин



ООО «Тор»

Общество с ограниченной ответственностью

«Тор»

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов докторской диссертации А.А. Татевосяна
на тему: «Высокотехнологические электротехнические комплексы на основе
тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин»

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационного исследования, выполненные Татевосяном Андреем Александровичем в ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» по разработке алгоритмов расчета осесимметричного и трехмерного магнитных полей на основе введения понятия "регулярного элемента" для формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в конечно-элементной области использованы в ООО «Тор» в части уравнений магнитостатики для двумерного осесимметричного и трехмерного анализа относительно векторного магнитного потенциала, записанные для треугольного и тетраэдрического конечных элементов первого порядка.

Указанные уравнения прошли стадию проверки и использованы в программе ELCUT в качестве элементных уравнений магнитостатики в осесимметричном анализе, записанных относительно функции потока. Указанные уравнения также планируется к применению в разрабатываемой версии ELCUT для трехмерной задачи магнитостатики.

Директор ООО «Тор»



Дубицкий С.Д.

11.11.2019

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, лит. Т, пом. 5Н.

Тел/факс: (812) 710-1659

info@tor.ru, сайт www.tor.ru

ИНН 7838461098, КПП 783801001, ОГРН 1117847248496, ОКПО 46899276, ОКАТО 40262564000, ОКВЭД 72.20.

Р/с 40702810739000006916 в филиале ОПЕРУ Банка ВТБ (ПАО) в Санкт-Петербурге, г. Санкт-Петербург,

к/с 30101810200000000704, БИК 044030704.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной
деятельности ФГБОУ ВО

«Омский государственный
технический университет»

 А.С. Поляничкин

« 11 »



Акт

об использовании результатов докторской диссертации А.А. Татевосяна
на тему: «Методология проектирования и разработка тихоходных
синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологичных
электротехнических комплексов»
в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы
доцента Татевосяна А.А. «Методология проектирования и разработка
тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе
высокотехнологичных электротехнических комплексов» внедрены в учебный
процесс кафедры «Электрическая техника» и используются при разработке
лекционного курса, проведении лабораторных работ по дисциплинам
«Моделирование электротехнических устройств», «Методы идентификации
объектов электротехнических комплексов и систем» и подготовке выпускных
квалификационных работ для студентов направлений 13.03.02 и 13.04.02 -
Электроэнергетика и электротехника ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет».

Использование указанных результатов позволило повысить качество
образовательного процесса.

Заведующий кафедрой
«Электрическая техника»

д.т.н., профессор



А.В. Бубнов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2718641

**СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ИДЕНТИФИКАЦИИ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПО ОБЪЕМНОЙ
НАМАГНИЧЕННОСТИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (ОмГТУ) (RU)*

Авторы: *Татевосян Андрей Александрович (RU),
Татевосян Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019127858

Приоритет изобретения 04 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 10 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 сентября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2687964

**БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЙ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С
ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Татевосян Андрей Александрович (RU),
Татевосян Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2018136868

Приоритет изобретения 19 октября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 октября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2543054

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013142776

Приоритет изобретения **19 сентября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 января 2015 г.**

Срок действия патента истекает **19 сентября 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2542322

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2013129793

Приоритет изобретения **28 июня 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 января 2015 г.**

Срок действия патента истекает **28 июня 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020617967

Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе электротехнических комплексов по критерию максимума КПД

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (RU)*

Автор: *Татевосян Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2020616972

Дата поступления 08 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивалиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020613416

Численный расчет магнитного поля осесимметричных конструкций синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (RU)*

Автор: *Татевосян Андрей Александрович (RU)*

Заявка № **2020612340**

Дата поступления **06 марта 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **16 марта 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019661236

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА
КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (RU)*

Автор: *Татевосян Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2019660163

Дата поступления 20 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 августа 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614129

«Оптимизация электромагнитных параметров синхронного генератора модульного типа с постоянными магнитами и определение основных размеров его магнитной системы»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (RU)**

Автор: **Татевосян Андрей Александрович (RU)**

Заявка № **2019613026**Дата поступления **25 марта 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **01 апреля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015612665

**Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС)
синхронного магнитоэлектрического генератора на базе
асинхронной электрической машины**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования "Омский государственный технический
университет" (RU)*

Авторы: *Татевосян Андрей Александрович (RU),
Огорелков Борис Иванович (RU)*

Заявка № 2014663558

Дата поступления 25 декабря 2014 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 24 февраля 2015 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

Методика и пример расчета синхронного генератора модульного типа с постоянными магнитами на основе сплава NdFeB мощностью 500 ВА для безредукторной ВЭУ с вертикальной осью вращения.

Исходные данные

1. Номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 5$ кВт, $\cos\varphi_{\text{нагр.}} = 0.8$, фазное напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В, частота $f = 20$ Гц. Постоянные магниты: остаточная индукция $B_r = 1.15$ Тл, коэрцитивная сила $H_c = 955$ кА / м.
2. Число полюсов $2p = 6$.
3. Число электромагнитов $N_{\text{эм}} = 8$.
4. Число катушек электромагнита $N_{\text{кат}} = 2$.
5. Высота рабочего зазора $\ell_d = 0.01$ м.
6. Обмоточный коэффициент $k_{\text{об}} = 0.9$.
7. Линейная токовая нагрузка $A = 2 \cdot 10^4$ А / м.
8. Индукция в воздушном зазоре $B_\delta = 0.4$ Тл.
9. Индукция в стали $B_c = 0.9$ Тл.
10. Расчетные коэффициенты: $\beta = 1.1$ (от 1.1 до 1.5), $\lambda = 0.6$, коэффициент формы $k_\phi = 1.11$, $k_0 = 0.652$, $k_{\text{ад}} = 0.85$ (от 0.82 до 0.87), $k_{\text{кз}} = 1.5$ (от 2 до 3), $k_3 = 0.4$, $u_{\text{опт}} = U_{\text{ном}}/E = 0.8$, $k_c = 0.8$.

Порядок расчета

1. Определение скорости вращения ротора

$$n = 60f / p = 60 \cdot 20 / 3 = 400 \text{ об / мин} \quad (\text{П4.1})$$

2. Коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = 0.75 \quad (\text{П4.2})$$

3. Диаметр индуктора

$$D_{\text{инд}} = \sqrt[3]{\frac{6.1 S_{\text{ном}} \cdot 2p}{\pi \lambda \alpha_{\delta} k_{\phi} k_0 A B_{\delta} n}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 500 \cdot 2 \cdot 3}{3.14 \cdot 0.6 \cdot 0.75 \cdot 1.11 \cdot 0.652 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0.4 \cdot 400}} = 0.177 \text{ м} \quad (\text{П4.3})$$

4. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D_{\text{инд}}}{2p} = \frac{3.14 \cdot 0.177}{2 \cdot 3} = 0.093 \quad (\text{П4.4})$$

5. Коэффициент использования

$$k_{\text{и}} = u_{\text{опт}} \left(\sqrt{1 - (u_{\text{опт}} \cos \varphi)^2} - u_{\text{опт}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \right) =$$

$$= 0.8 \left(\sqrt{1 - (0.8 \cdot 0.8)^2} - 0.8 \sqrt{1 - 0.8^2} \right) = 0.231 \quad (\text{П4.5})$$

6. ЭДС синхронного генератора с постоянными магнитами

$$E = \frac{U_{\text{ном}}}{u_{\text{опт}}} = \frac{220}{0.8} = 275 \text{ В} \quad (\text{П4.6})$$

7. Номинальный ток генератора с постоянными магнитами

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{500}{220} = 2.272 \text{ А} \quad (\text{П4.7})$$

8. Ток короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = I_{\text{ном}} k_{\text{кз}} = 2.272 \cdot 1.5 = 3.41 \text{ А} \quad (\text{П4.8})$$

9. Реактивное сопротивление обмотки

$$X_{\text{а}} = \frac{E_0}{I_{\text{кз}}} = \frac{275}{3.41} = 80.67 \text{ Ом} \quad (\text{П4.9})$$

10. Индуктивность обмотки

$$L_{\text{а}} = \frac{X_{\text{а}}}{2\pi f} = \frac{80.67}{2 \cdot 3.14 \cdot 20} = 0.642 \text{ Гн} \quad (\text{П.4.10})$$

11. Полное число ампервитков

$$IW = A\pi D_{\text{инд}} = 2 \cdot 10^4 \cdot 3.14 \cdot 0.177 = 11151 \text{ A} \quad (\text{П4.11})$$

12. Ампер-витки катушки электромагнита

$$IW_{\text{эм}} = \frac{IW}{N_{\text{кат}} N_{\text{эм}}} = \frac{11151}{2 \cdot 8} = 697 \text{ A} \quad (\text{П4.12})$$

13. Площадь сечения катушки электромагнита

$$S_{\text{кат}} = \frac{IW_{\text{эм}}}{Jk_3} = \frac{697}{2 \cdot 10^6 \cdot 0.4} = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (\text{П4.13})$$

14. ЭДС электромагнита

$$E_{\text{эм}} = \frac{E_0}{2\sqrt{1+2.41^2}} = \frac{275}{2 \cdot \sqrt{1+2.41^2}} = 52.68 \text{ В} \quad (\text{П4.14})$$

15. ЭДС одной катушки

$$E_{\text{кат.эм}} = \frac{E_{\text{эм}}}{2} = \frac{52.68}{2} = 26.34 \text{ В} \quad (\text{П4.15})$$

16. Суммарное число витков синхронного генератора

$$W_{\text{обм}} = \frac{IW}{I_{\text{кз}}} = \frac{11151}{3.4} = 3271 \quad (\text{П4.16})$$

17. Число витков катушки

$$W_{\text{кат.эм}} = \frac{W_{\text{обм}}}{2N_{\text{эм}}} = \frac{3271}{2 \cdot 8} = 204 \quad (\text{П4.17})$$

18. Радиус магнита

$$r_{\text{м}} = \frac{1.41 \cdot 30 \cdot E_{\text{кат.эм}}}{\pi B_c D_{\text{инд}} n W_{\text{кат.эм}}} = \frac{1.41 \cdot 30 \cdot 26.34}{3.14 \cdot 0.9 \cdot 0.177 \cdot 400 \cdot 204.42} = 0.027 \text{ м} \quad (\text{П4.18})$$

19. Площадь поперечного сечения сердечника

$$S_{\text{серд}} = \frac{\pi R_{\text{м}}^2}{k_c} = \frac{3.14 \cdot 0.027^2}{0.8} = 0.0029 \text{ м}^2 \quad (\text{П4.19})$$

20. Размеры сердечника $a \times b$, при $a = b$

$$a = \sqrt{S_{\text{серд}}} = \sqrt{0.0029} = 0.053 \text{ м} \quad (\text{П4.20})$$

21. Активная длина

$$\ell_a = \tau \lambda = 0.093 \cdot 0.6 = 0.056 \text{ м} \quad (\text{П4.21})$$

22. Высота магнита

$$\begin{aligned} \ell_M &= 2 \frac{\frac{\lambda_\delta B_r}{\mu_0} + 1.41 I_{\text{кз}} W_{\text{кат.эм}}}{H_c} = \\ &= 2 \frac{\frac{0.01 \cdot 1.1}{4\pi \cdot 10^{-7}} + 1.41 \cdot 3.4 \cdot 204}{837000} = 0.023 \text{ м} \end{aligned} \quad (\text{П4.22})$$

23. Оптимальное соотношение $\frac{S_{\text{кат}}}{S_{\text{серд}}}$

$$n_{\text{опт}} = 1 + \frac{\pi S_{\text{кат}} k_3 \gamma_M}{S_{\text{серд}} k_c \gamma_c} = 1 + \frac{3.14 \cdot 0.00087 \cdot 0.4 \cdot 8900}{0.0029 \cdot 0.8 \cdot 7800} = 1.54 \quad (\text{П4.23})$$

Далее используются результаты численного моделирования СГПМ. Из расчета магнитного поля, например, с использованием метода конечных элементов, для полученной геометрии определяется уточненное значение ЭДС холостого хода $E_{0.\text{опт}}$ и индуктивность обмотки $L_{a.\text{опт}}$. Из расчета поля получено $E_{0.\text{опт}} = 275 \text{ В}$, $L_{a.\text{опт}} = 0.608 \text{ Гн}$.

24. Реактивное сопротивление обмотки СГПМ

$$X_{a.\text{опт}} = 2\pi f L_{a.\text{опт}} = 2 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 0.608 = 76.4 \text{ Ом} \quad (\text{П4.24})$$

25. Ток короткого замыкания для оптимальной конструкции СГПМ

$$I_{\text{кз.опт}} = \frac{E_{0.\text{опт}}}{X_{a.\text{опт}}} = \frac{275}{76.4} = 3.6 \text{ А} \quad (\text{П4.25})$$

26. Уточняется кратность тока короткого замыкания

$$k_{\text{кз.опт}} = \frac{I_{\text{кз.опт}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{3.6}{2.27} = 1.58 \quad (\text{П4.26})$$

27. Высота магнита

$$\begin{aligned} \ell_{\text{м}} &= 2 \frac{\frac{\lambda_{\delta} B_{\Gamma}}{\mu_0} + 1.41 I_{\text{кз}} W_{\text{кат.эм}}}{H_{\text{с}}} = \\ &= 2 \frac{\frac{0.01 \cdot 1.1}{4\pi \cdot 10^{-7}} + 1.41 \cdot 3.6 \cdot 204}{837000} = 0.023 \text{ м} \end{aligned} \quad (\text{П4.27})$$

28. Масса магнита

$$m_{\text{м.опт}} = 4\gamma_{\text{с}} \pi r_{\text{м}}^2 \ell_{\text{м.опт}} = 4 \cdot 7800 \cdot 3.14 \cdot 0.0027^2 \cdot 0.023 = 1.7 \text{ кг} \quad (\text{П4.28})$$

29. Суммарная масса магнитов

$$m_{\text{м.сум}} = 2\rho m_{\text{м.опт}} = 2 \cdot 3 \cdot 1.7 = 10.2 \text{ кг} \quad (\text{П4.29})$$

30. Длина катушки

$$d_{\text{к.опт}} = \frac{S_{\text{кат}}}{n_{\text{опт}}} = \frac{0.00087}{1.53} = 0.024 \text{ м} \quad (\text{П4.30})$$

31. Высота катушки

$$h_{\text{к.опт}} = \sqrt{S_{\text{кат}} n_{\text{опт}}} = \sqrt{0.00087 \cdot 1.53} = 0.036 \text{ м} \quad (\text{П4.31})$$

32. Масса катушки

$$\begin{aligned} m_{\text{кат.опт}} &= S_{\text{кат}} \pi (d_{\text{к.опт}} + a) \gamma_{\text{м}} = \\ &= 0.00087 \cdot 3.14 \cdot (0.024 + 0.053) \cdot 8900 = 1.89 \text{ кг} \end{aligned} \quad (\text{П4.32})$$

33. Суммарная масса обмоток

$$m_{\text{сум.кат.опт}} = m_{\text{кат.опт}} N_{\text{эм}} \cdot 2 = 1.89 \cdot 8 \cdot 2 = 30.25 \text{ кг} \quad (\text{П4.33})$$

34. Масса сердечника

$$\begin{aligned} m_{\text{серд.опт}} &= 2\gamma_c S_{\text{серд}} (a + d_k + h_{\text{к.опт}}) = \\ &= 2 \cdot 7800 \cdot 0.00289 (0.053 + 0.023 + 0.036) = 5.16 \text{ кг} \end{aligned} \quad (\text{П4.34})$$

35. Суммарная масса сердечников

$$m_{\text{сум.серд.опт}} = m_{\text{серд.опт}} N_{\text{эм}} = 5.16 \cdot 8 = 41.3 \text{ кг} \quad (\text{П4.35})$$

Методика и пример расчета синхронного генератора с постоянными магнитами на основе сплава NdFeB мощностью 10 кВА для безредукторной ВЭУ.

Исходные данные

1. Номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$, $\cos\varphi_{\text{нагр.}} = 1$, фазное напряжение $U_{\text{ф.ном}} = 133 \text{ В}$, число оборотов $n_{\text{ном}} = 125 \text{ об/мин}$, число фаз $m = 3$.
2. Постоянные магниты: остаточная индукция $B_r = 1,15 \text{ Тл}$, коэрцитивная сила $H_c = 955 \text{ кА/м}$.
3. Тип обмотки статора - однослойная вспыная.
4. Фазы обмотки соединены в звезду.
5. Форма паза –прямоугольный открытый.
6. Число пазов статора $Z = 72$
7. Число полюсов $2p = 22$
8. Обмоточный коэффициент $k_{\text{об}} = 0,9$.
9. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия $\alpha' = 0,8$.
10. Коэффициент формы $k_{\text{ф}} = 1,11$.
11. Линейная токовая нагрузка $A = 2,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$.
12. Индукция в воздушном зазоре $B_{\delta} = 0,7 \text{ Тл}$.
13. Отношение активной длины к диаметру ротора $\lambda = \ell' / D_i = 0,23$.
14. Произведение $A \cdot B_{\delta} = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 0,7 = 17,5 \cdot 10^3 \text{ Тл} \cdot \text{А/м}$.

Порядок расчета

- 15.. Определение диаметра ротора по формуле

$$D_i = 3 \sqrt{\frac{C_A \cdot P_{\text{ном}}}{2 \cdot u_{\text{опт}}^* \cdot \lambda \cdot n_{\text{ном}}}} \quad (\text{П5.1})$$

$$C_A = \frac{6,1}{A \cdot B_{\delta} \cdot \alpha' \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ф}}} = \frac{6,1}{2,5 \cdot 10^4 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,11} =$$

$$= 4,362 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot (\text{об/мин}) / \text{В} \cdot \text{А} \quad (\text{П5.2})$$

16. Внутренний диаметр ротора

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{4,362 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,707 \cdot 0,23 \cdot 125}} = 0,475 \text{ м} \quad (\text{П5.3})$$

17. Коэффициент использования для явнополюсного синхронного генератора

$$k_u = u^* \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{u^{*2} Q_d^2}{1 + Q_d^2}} - \frac{u^*}{\sqrt{1 + Q_d^2}} \right], \quad (\text{П5.4})$$

где $Q_d = \frac{X_a}{R_a}$ - добротность фазы обмотки статора.

Условие $\frac{dk_u}{du^*} = 0$ позволяет найти оптимальное значение $u_{\text{опт}}^*$ в зависимости от добротности обмотки якоря $Q_d = \frac{X_a}{R_a}$, при которой мощность синхронного генератора максимальна. Максимальное значение $u_{\text{опт}}^* = 1/\sqrt{2} = 0,707$ при $Q_d \rightarrow \infty$, то есть когда активное сопротивление обмотки $R = 0$. Примем предварительно $u_{\text{опт}}^* = 1/\sqrt{2} = 0,707$.

18. Активная длина статора

$$\ell' = 0,23 \cdot D_i = 0,23 \cdot 0,475 = 0,109 \text{ м}. \quad (\text{П5.5})$$

19. Диаметр вала

$$D_B = 0,3 \cdot D_i = 0,3 \cdot 0,475 = 0,142 \text{ м}. \quad (\text{П5.6})$$

20. Полные ампервитки генератора

$$m \cdot I_{\text{ном}} w_{\phi} = \pi \cdot D_i \cdot A = \pi \cdot 0,475 \cdot 2,5 \cdot 10^4 = 37288 \text{ А} \quad (\text{П5.7})$$

$$I_{\text{ном}} w_{\phi} = 37288 / 3 = 12429 \text{ А}. \quad (\text{П5.8})$$

21. Номинальный фазный ток при активной нагрузке

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{m U_{\phi, \text{ном}} \cos \varphi_{\text{нагр.}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{3 \cdot 133 \cdot 1} = 25,1 \text{ А}. \quad (\text{П5.9})$$

22. Число витков фазы

$$w_{\phi} = \frac{12429}{25,1} = 495 \quad (\text{П5.10})$$

23. Число секций находящихся в последовательном соединении при отсутствии параллельных ветвей

$$\frac{Z}{6} = \frac{72}{6} = 12 \quad (\text{П5.11})$$

24. При наличии двух параллельных ветвей ($a = 2$)

$$w_{\text{пар}} = 495 \quad (\text{П5.12})$$

25. Ток в параллельной ветви

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{2} = \frac{25,1}{2} = 12,55 \text{ А} \quad (\text{П5.13})$$

26. Число проводников в пазу без параллельных ветвей (12 секций)

$$u_{\text{п}} = \frac{495}{12} = 41 \quad (\text{П5.14})$$

27. При наличии параллельных ветвей число проводников в пазу (6 секций)

$$u_{\text{п}} = \frac{495}{6} = 82 \quad (\text{П5.15})$$

28. Площадь поперечного сечения эффективного проводника определяется по допустимой плотности тока статора $J_{\text{доп}} = (4...6)10^6 \text{ А/м}^2$.

Для плотности тока $J_{\text{доп}} = 4,4 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ суммарное сечение обмоточного провода при отсутствии параллельных ветвей

$$\Sigma q_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ф.НОМ}}}{J_{\text{доп}}} = \frac{25,1}{4,4 \cdot 10^6} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (\text{П5.16})$$

29. Суммарное сечение обмоточного провода при наличии двух параллельных ветвей

$$\Sigma q_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ф.НОМ}}}{J_{\text{доп}}} = \frac{12,5}{4,4 \cdot 10^6} = 2,84 \cdot 10^{-6} \quad (\text{П5.17})$$

30. ЭДС холостого хода при естественной стабилизации

$$E_0 = \frac{U_{\text{ф.НОМ}}}{u_{\text{опт}}^*} = \frac{133}{0,707} = 188,1 \text{ В}. \quad (\text{П5.18})$$

31. Частота

$$f = \frac{n_{\text{НОМ}} \cdot p}{60} = \frac{125 \cdot 11}{60} = 22,9 \text{ Гц}. \quad (\text{П5.19})$$

32. Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_0 = \frac{E_0}{4 \cdot k_{\text{ф}} \cdot f \cdot w_{\text{ф}} \cdot k_{\text{об}}} \quad (\text{П5.20})$$

$$\Phi_0 = \frac{188,1}{4 \cdot 1,11 \cdot 22,9 \cdot 495 \cdot 0,9} = 4,15 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

33. Магнитный поток при нагрузке

$$\Phi_H = 1,08 \cdot \Phi_{m0} = 1,08 \cdot 4,14 \cdot 10^{-3} = 4,47 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (\text{П5.21})$$

34. Индукция в зазоре при холостом ходе

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_0}{\alpha' \cdot \tau \cdot \ell'} = \frac{4,15 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 68 \cdot 10^{-3} \cdot 0,109} = 0,698 \approx 0,7 \text{ Тл.} \quad (\text{П5.22})$$

35. Магнитная индукция в воздушном зазоре при нагрузке

$$B_{\delta H} = 1,08 \cdot B_{\delta 0} = 1,08 \cdot 0,7 = 0,76 \text{ Тл.} \quad (\text{П5.23})$$

36. Зубцовое деление для обмотки статора с прямоугольными открытыми пазами

$$t_z = \frac{\pi D_i}{Z} = \frac{\pi \cdot 0,475}{72} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{П5.24})$$

37. Ширина зуба

$$b_{z \min} = \frac{t_z \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot B'_{z \max}} = \frac{21 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7}{0,95 \cdot 1,8} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{П5.25})$$

где $k_c = 0,95$ - коэффициент заполнения сталью.

Примем предварительное значение магнитной индукции $B'_{z \max} = 1,8$ Тл в узком месте зуба (по табл. 9-16 для защиты IP23).

38. Ширина открытого паза в штампе стального листа марки сплава 49К2Ф

$$b'_n = t_z - b_{z \min} = (21 - 8,6) \cdot 10^{-3} = 12,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{П5.26})$$

39. Высота спинки паза статора

$$h_c = \frac{\Phi_0}{2 \cdot k_c \cdot \ell' \cdot B_c} = \frac{4,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 0,109 \cdot 1,2} = 16,7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (\text{П5.27})$$

где $B_c = 1,2$ Тл - индукция в стали.

40. Предварительный внешний диаметр статора

$$D_i = 69 + 0,72 D_a. \quad (\text{П5.28})$$

$$D_a = \frac{D_i - 0,069}{0,72} = \frac{0,475 - 0,069}{0,72} = 0,563 \text{ м.} \quad (\text{П5.29})$$

41. Высота паза

$$h_{\Pi} = \frac{D_a - D_i}{2} - h_c = \frac{0,563 - 0,475}{2} - 16,7 \cdot 10^{-3} = 27,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{П5.30})$$

42. Площадь поперечного сечения паза в свету с учетом припусков на шихтовку и сборку сердечников (под укладку проводов)

$$S_{\Pi} = b'_{\Pi} \cdot h_{\Pi} = 12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 27,2 \cdot 10^{-3} = 337,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (\text{П5.31})$$

43. Доля поперечного сечения паза, которая может быть занята с изоляцией

$$S'_{\Pi} = S_{\Pi} \cdot f_{\Pi} = 337,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 = 135 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (\text{П5.32})$$

44. Суммарное сечение обмоточного провода

$$\Sigma q'_{\text{пр}} = S_{\Pi} - S'_{\Pi} = (337,3 - 135) \cdot 10^{-6} = 202 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $f_{\Pi} = 0,3 \div 0,4$ - коэффициент заполнения паза, определяющий долю поперечного сечения паза, которая может быть занята изоляцией. Для однослойной обмотки $f_{\Pi} = 0,4$.

45. Полусное деление

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,475}{22} = 68 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{П5.33})$$

46. Расчетная площадь поперечного сечения воздушного зазора

$$Q_{\delta} = \tau \cdot \ell' = 68 \cdot 10^{-3} \cdot 0,109 = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (\text{П5.34})$$

47. Число витков

$$w_{\Phi} = \frac{60 \cdot E_0}{2 \cdot B_{\delta} \cdot \alpha' \cdot \ell' \cdot \pi \cdot D_i \cdot n_{\text{ном}} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{\text{об}}}. \quad (\text{П5.35})$$

$$w_{\Phi} = \frac{188,1 \cdot 60}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,109 \cdot \pi \cdot 0,475 \cdot 125 \cdot 1,11 \cdot 0,9} = 496 \approx 495. \quad (\text{П5.36})$$

Примем для изоляции класса нагревостойкости F провод марки ПЭТП-155.

48. Относительные потери в СГПМ

$$P_{r\text{опт}}^* = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{J_{\text{доп}}}{u_{\text{опт}}^* \cdot B_{\delta} \cdot \alpha' \cdot D_i \cdot n \cdot \gamma_{\text{пр}} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{об}} \cdot k} \quad (\text{П5.37})$$

где $k = \frac{\ell'}{\ell_{\text{ср}}}$ - отношение расчетной длины сердечника к средней длине витка

(секции) обмотки статора.

$$P_{r\text{опт}}^* = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{4,4 \cdot 10^6}{0,707 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,475 \cdot 125 \cdot 58 \cdot 10^6 \cdot 1,11 \cdot 0,9 \cdot 0,5} \approx 0,061 \text{ о.е.} \quad (\text{П5.38})$$

49. КПД синхронного генератора

$$\eta_r = \left(1 + P_r^*\right)^{-1} = \left(1 + 0,061\right)^{-1} = 0,94 \text{ о.е.} \quad (\text{П5.39})$$

50. Потери в обмотке якоря

$$\Delta P_{\text{я}} = (1 - 0,94) \cdot 10 \cdot 10^3 = 600 \text{ Вт} \quad (\text{П5.40})$$

51. Эквивалентное активное сопротивление фазы обмотки якоря при отсутствии параллельных ветвей

$$R_{\text{я}} = \frac{\Delta P_{\text{я}}}{3 \cdot I_{\text{ном}}^2} = \frac{600}{3 \cdot 25,1^2} = 0,317 \text{ Ом.} \quad (\text{П5.41})$$

52. Эквивалентное активное сопротивление фазы обмотки якоря при наличии двух параллельных ветвей

$$R_{\text{пар}} = \frac{\Delta P_{\text{я}}}{3 \cdot I_{\text{пар}}^2} = \frac{600}{3 \cdot 2 \cdot 12,5^2} = 0,64 \text{ Ом} \quad (\text{П5.42})$$

53. Активное сопротивление фазы обмотки статора при 20°C и отсутствии параллельных ветвей

$$R_{\text{я}} = \frac{\ell_{\text{ср}} \cdot w_{\phi}}{\gamma_{\text{обм}} \cdot \sum \rho_{\text{пр}}} \quad (\text{П5.43})$$

54. Средняя длина витка

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\gamma_{\text{пр}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \sum q_{\text{пр}}}{w_{\phi}} = \frac{58 \cdot 10^6 \cdot 0,317 \cdot 5,76 \cdot 10^{-6}}{495} = 0,21 \text{ м. (П5.44)}$$

55. Активное сопротивление фазы обмотки статора при 20°C и наличии двух параллельных ветвей

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\gamma_{\text{пр}} \cdot R_{\text{пар}} \cdot \sum q_{\text{пр}}}{w_{\text{пар}}} = \frac{58 \cdot 10^6 \cdot 0,64 \cdot 2,84 \cdot 10^{-6}}{495} = 0,21 \text{ м. (П5.45)}$$

56. Проверка расчета коэффициента

$$k = \frac{\ell'}{\ell_{\text{ср}}} = \frac{0,109}{0,21} = 0,52 \approx 0,5. \quad (\text{П5.46})$$

57. Масса обмоточного провода не зависит от числа параллельных ветвей

$$m_{\text{обм}} = m \cdot \ell_{\text{ср}} \cdot \sum q_{\text{пр}} \cdot w_{\phi} \cdot \gamma_{\text{обм}} = 3 \cdot 0,21 \cdot 5,76 \cdot 10^{-6} \cdot 495 \cdot 8900 \approx 16 \text{ кг} \quad (\text{П5.47})$$

Так как в расчете принято $\ell_{\text{ср}} = 2\ell'$, то полученная масса обмотки является ее активной частью.

58. Магнитная энергия ПМ сплава NdFeB

Класс	Остаточная магнитная индукция, миллиТесла	Коэрцитивная сила, КилоАмпер/ метр	Магнитная энергия, килоДжоуль/м3	Рабочая температура, градус Цельсия
N40	1250-1280	≥ 955 (≥ 12)	302-326	80

$$(BH)_{\text{max}} = \frac{B_r \cdot H_c}{4} = \frac{1,25 \cdot 955 \cdot 10^3}{4} = 298,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/м3.} \quad (\text{П5.48})$$

59. Условие максимума удельной электрической мощности

$$k_{\text{МОПТ}} = \frac{m_{\text{обм.акт}}}{m_{\text{М}}} = 1. \quad (\text{П5.49})$$

$$n_{\text{ОПТ}} = \frac{d}{\delta_3} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_{\text{М}}} k_3} = \sqrt{\frac{1,25}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 955 \cdot 10^3} \cdot \frac{8900}{7500}} \cdot 0,4 \approx 0,7, (\text{П5.50})$$

где δ_3 - эквивалентный зазор, $k_3 = 0,4$ - коэффициент заполнения по меди.

60. Активная площадь обмоточного провода

$$S_{\text{обм. акт}} = \frac{I_{\text{ном}} W_{\phi}}{k_3 \cdot J_{\text{доп}}} = \frac{12429}{0,4 \cdot 4,4 \cdot 10^6} = 7,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (\text{П5.51})$$

61. Масса активной части витков обмотки

$$m_{\text{обм. акт}} = 2 \cdot m \cdot S_{\text{обм. акт}} \cdot \ell' \cdot \gamma_{\text{обм}} \cdot k_3. \quad (\text{П5.52})$$

$$m_{\text{обм. акт}} = 2 \cdot 3 \cdot 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,109 \cdot 8900 \cdot 0,4 = 16,4 \approx 16 \text{ кг}. \quad (\text{П5.53})$$

62. Масса ПМ

$$m_{\text{М}} = m_{\text{обм. акт}} = 16 \text{ кг}. \quad (\text{П5.54})$$

63. Коэффициент полюсного перекрытия $\alpha' = \frac{b_{\text{П}}}{\tau}$, отсюда находим ширину

полюса ПМ

$$b_{\text{М}} = \alpha' \cdot \tau = 0,8 \cdot 68 \cdot 10^{-3} = 54,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (\text{П5.55})$$

64. Объем ПМ

$$V_{\text{М}} = \frac{m_{\text{М}}}{\gamma_{\text{М}}} = \frac{16}{7500} = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \quad (\text{П5.56})$$

65. Длина ПМ равна длине статора

$$\ell_{\text{М}} = \ell' = 0,109 \text{ м}. \quad (\text{П5.57})$$

66. Высота полюса

$$d = \frac{V_{\text{М}}}{2p \cdot \ell' \cdot b_{\text{М}}} = \frac{2,13 \cdot 10^{-3}}{22 \cdot 0,109 \cdot 54,4 \cdot 10^{-3}} = 16,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (\text{П5.58})$$

67. Эквивалентный зазор

$$\delta_{\text{э}} = \frac{d}{n_{\text{опт}}} = \frac{16,3 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 23,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (\text{П5.59})$$

68. Относительная магнитная проводимость зазора

$$\lambda_{\delta}^* = \mu_0 \cdot \frac{Q_{\delta}}{Q_{\text{М}}} \cdot \frac{H_{\text{с}}}{B_{\text{r}}} \cdot \frac{d}{\delta_{\text{э}}}. \quad (\text{П5.60})$$

69.Площадь полюса

$$Q_M = \frac{m_M}{2 \cdot d \cdot \gamma_M \cdot p} = \frac{16}{2 \cdot 16,3 \cdot 10^{-3} \cdot 7500 \cdot 11} = 5,94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (\text{П5.61})$$

$$\lambda_{\delta}^* = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{7,4 \cdot 10^{-3}}{5,94 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{955 \cdot 10^3}{1,25} \cdot \frac{16,3 \cdot 10^{-3}}{23,3 \cdot 10^{-3}} = 0,836 \quad (\text{П5.62})$$

70.Индукция в нейтральном сечении магнита

$$B_m = B_r \frac{\lambda_{\delta}^*}{1 + \lambda_{\delta}^*} = 1,25 \cdot \frac{0,836}{1 + 0,836} = 0,569 \text{ Тл} \quad (\text{П5.63})$$

71.Коэффициент рассеяния

$$\sigma_p = \frac{B_{\delta} \cdot \alpha' \cdot Q_{\delta}}{B_m \cdot Q_M} = \frac{0,7 \cdot 0,8 \cdot 7,4 \cdot 10^{-3}}{0,569 \cdot 5,94 \cdot 10^{-3}} = 1,18 \quad (\text{П5.64})$$

72.Максимум удельной электрической синхронного генератора мощности

$$P_{\text{уд.эл.}} = \frac{\pi \cdot u_{\text{опт}}^* \cdot D_i \cdot J_{\text{доп}} \cdot n_{\text{ном}} \cdot \sigma_p \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ф}}}{120} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{max}} \cdot k_3}{\gamma_{\text{обм}} \cdot \gamma_M}} \quad (\text{П5.65})$$

$$P_{\text{уд.эл.}} = \frac{\pi \cdot 0,707 \cdot 0,475 \cdot 4,4 \cdot 10^6 \cdot 125 \cdot 1,18 \cdot 0,9 \cdot 1,11}{120} \times \quad (\text{П5.66})$$

$$\times \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 298,4 \cdot 10^3 \cdot 0,4}{8900 \cdot 7500}} \approx 270 \text{ Вт / кг}$$

Проверка

$$P_{\text{уд.эл.}} = \frac{P_{\text{ном}}}{m_{\text{обм.акт}} + m_M} = \frac{10000}{16 + 16} = 312 \text{ Вт/кг}. \quad (\text{П5.67})$$

Методика и пример расчета синхронного двигателя с постоянными магнитами намагниченными в радиальном направлении (магнитная система с двумя воздушными каналами) на основе сплава NdFeB с развиваемым электромагнитным усилием 100 Н для испытательного стенда для исследования вязкоупругих свойств эластомеров.

Исходные данные

1. Заданное электромагнитное усилие $F_z = 100 \text{ Н}$.
2. Индукция в сердечнике $B_c = 1.6 \text{ Тл}$.
3. Плотность тока в обмотке $J = 2 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2$.
4. Коэффициент заполнения по меди $k_z = 0.4$.
5. Коэффициент рассеяния магнитного потока $k_{11} = 1.1$.
6. Радиус стержня $r_0 = 0 \text{ м}$.
7. Амплитуда хода якоря $x_m = 0.005 \text{ м}$

Порядок расчета

1. Удельное развиваемое тяговое усилие, $F_{уд}$:

$$F_{уд} = 0.25 k_z J \sqrt{\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{обм} \gamma_M}} = 0.25 \cdot 0.4 \cdot 2 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 750000 \cdot 1}{8900 \cdot 7500}} = 23.76 \text{ Н} \quad (\text{П6.1})$$

где $\gamma_{обм} = 8900 \text{ кг / м}^3$ - плотность меди, $\gamma_M = 7500 \text{ кг / м}^3$ - плотность постоянного магнита.

2. Оптимальные соотношения:

$$n_{опт} = \frac{1}{k_{M1.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_M}}, \quad r_{опт} = \frac{1}{k_{M2.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_M}} \quad (\text{П6.2})$$

$$k_{M1.опт} + k_{M2.опт} = 1.$$

3. Суммарная масса обмоток и постоянных магнитов, $m_{сум}$, кг

$$m_{сум} = \frac{F_z}{F_{уд}} = \frac{100}{23.76} = 4.2 \text{ кг} \quad (\text{П6.3})$$

4. Масса обмотки и масса постоянного магнита, кг

$$m_{обм} = m_{сум} / 4 = 4.2 / 4 = 1.05 \text{ кг}$$

$$m_M = m_{сум} / 4 = 4.2 / 4 = 1.05 \text{ кг} \quad (\text{П6.4})$$

5. При этом оптимальное отношение площадей рабочего зазора и нейтрального сечения постоянного магнита будет

$$k_{\sigma} = \left(\frac{Q_{\delta}}{Q_m} \right) = \sqrt{\frac{B_r \gamma_m}{\mu_0 H_c \gamma_{обм}}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 755000 \cdot 1000} \frac{7500}{8900}} = 0.95 \quad (\text{П6.5})$$

6. В оптимальной конструкции магнитной системы привода индукция в нейтральном сечении магнита, Тл

$$B_m = 0.5B_r = 0.5 \cdot 1 = 0.5 \text{ Тл} \quad (\text{П6.6})$$

7. Среднее значение индукции в зазоре, Тл

$$B_{cp} = \frac{B_m}{k_{\sigma}} = \frac{0.5}{0.95} = 0.53 \text{ Тл} \quad (\text{П6.7})$$

8. На основе решения задачи оптимизации

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_m}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 755000 \cdot 1000} \frac{8900}{7500}} = 1.122 \quad (\text{П6.8})$$

9. Итерационным способом уточняется площадь поверхности постоянного магнита. Процедура итерации

9.1. $Q_m = Q_{нач}$, где, например, $Q_{нач} = 1$.

конечное значение $Q_m = 0.0177 \text{ м}^2$

$$9.2. \quad r_1 = \sqrt{\frac{B_m Q_m}{B_c \pi} + r_0^2}, \text{ где } r_0 - \text{ радиус штока, м.} \quad (\text{П6.9})$$

$$\text{конечное значение } r_1 = \sqrt{\frac{B_m Q_m}{B_c \pi} + r_0^2} = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 0.0177}{1.6\pi}} = 0.042 \text{ м}$$

при отсутствии r_0 .

9.2.1. Толщина обмотки, δ , м

$$\delta = \frac{2r_1 \left(k_{11} - \sqrt{\frac{B_r \gamma_m}{\mu_0 H_c \gamma_{обм}}} \right)}{\left(2 + \left(\sqrt{\frac{B_r \gamma_m \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_m}} \right) \sqrt{\frac{B_r \gamma_m}{\mu_0 H_c \gamma_{обм}}} - k_{11} \right)}. \quad (\text{П6.10})$$

конечное значение $\delta = 0.007 \text{ м}$

$$9.3. \quad Q_{m1} = \frac{F_z}{2B_m k_z J \delta}; \quad (П6.11)$$

конечное значение $Q_{m1} = 0.0177 \text{ м}^2$

$$9.4. \quad \text{Сравнивается значение } Q_m \text{ и } Q_{m1}, \text{ если } e = \frac{|Q_m - Q_{m1}|}{Q_m} > 0.01, \text{ то}$$

$$Q_m = Q_{m1} \text{ и расчет повторяется с 9.1 до тех пор пока}$$

$$e = \frac{|Q_m - Q_{m1}|}{Q_m} \leq 0.01 \quad (П6.12)$$

10. Длина постоянного магнита по оси намагничивания, d , м.

$$d = \delta \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_M}{\gamma_{обм}} \frac{\gamma_{обм}}{\gamma_M}} =$$

$$= 0.007 \cdot \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{7500}{755000 \cdot 1000} \cdot \frac{8900}{8900} \cdot \frac{8900}{7500}} = 0.008 \text{ м} \quad (П6.13)$$

11. Высота постоянного магнита, λ , м

$$\lambda = \frac{Q_m}{\pi(2r_1 + 2\delta + d)} = \frac{0.0177}{\pi(2 \cdot 0.042 + 2 \cdot 0.007 + 0.008)} = 0.053 \text{ м} \quad (П6.14)$$

12. Высота активной части обмотки, ℓ_a , м

$$\ell_a = k_{11} \lambda = 1.1 \cdot 0.053 = 0.058 \text{ м}. \quad (П6.15)$$

13. Высота обмотки, ℓ_k , м

$$\ell_k = \ell_a + 2x_m = 0.058 + 2 \cdot 0.005 = 0.068 \text{ м}. \quad (П6.16)$$

14. Средний радиус постоянного магнита, $r_{ср.м}$, м

$$r_{ср.м} = r_1 + \delta + 0.5d = 0.042 + 0.007 + 0.5 \cdot 0.008 = 0.053 \text{ м}. \quad (П6.17)$$

15. Средний радиус обмотки, $r_{ср.обм}$, м

$$r_{ср.обм} = r_1 + 0.5\delta = 0.042 + 0.5 \cdot 0.008 = 0.045 \text{ м} \quad (П6.18)$$

16. Радиус обмотки, r_2 , м

$$r_2 = r_1 + \delta = 0.042 + 0.007 = 0.049 \text{ м} \quad (П6.19)$$

17. Радиус постоянного магнита, r_3 , м

$$r_3 = r_1 + \delta + d = 0.042 + 0.007 + 0.008 = 0.057 \text{ м} \quad (\text{П6.20})$$

18. Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_4 , м

$$r_4 = \sqrt{r_1^2 - r_0^2 + r_3^2} = \sqrt{0.042^2 + 0.057^2} = 0.07 \text{ м} \quad (\text{П6.21})$$

19. Толщина стенки внешнего сердечника магнитопровода Δ , м

$$\Delta = r_4 - r_3 = 0.07 - 0.057 = 0.0138 \text{ м}. \quad (\text{П6.22})$$

20. Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, $(IW)_a$, А

$$(IW)_a = Jk_z \delta \ell_a = 2 \cdot 10^6 \cdot 0.4 \cdot 0.007 \cdot 0.06 = 329.38 \text{ А}. \quad (\text{П6.23})$$

21. Проводимость постоянного магнита на пару полюсов, λ_m , Гн

$$\lambda_m = \frac{B_r Q_m}{H_c d}. \quad (\text{П6.24})$$

22. Проводимость воздушного зазора, λ_δ , Гн

$$\lambda_\delta = \frac{\mu_0 Q_\delta}{\delta}. \quad (\text{П6.25})$$

23. Относительная проводимость воздушного зазора, $\lambda_{\delta, \text{отн}}$

$$\lambda_{\delta, \text{отн}} = \frac{\lambda_\delta}{\lambda_m} \quad (\text{П6.26})$$

24. Масса обмоток, кг

$$\begin{aligned} m_{\text{обм.1}} &= 0.4 \cdot 2m_m = 0.4 \cdot 2 \cdot 1.05 = 0.84 \text{ кг} \\ m_{\text{обм.2}} &= 0.6 \cdot 2m_m = 0.6 \cdot 2 \cdot 1.05 = 1.26 \text{ кг} \end{aligned} \quad (\text{П6.27})$$

25. Толщина обмоток, м

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta / 2 = 0.007 / 2 = 0.0035 \text{ м}. \quad (\text{П6.28})$$

26. Итерационным способом уточняется площадь поверхности постоянного магнита. Процедура итерации

$$26.1 \quad Q_{\text{нач}} = Q_m = \frac{m_m}{\gamma_M d} = \frac{1.05}{7500 \cdot 0.0078} = 0.0177 \text{ м}^2. \quad (\text{П6.29})$$

$$26.2 \quad r_1 = \sqrt{\frac{B_m Q_m}{B_c \pi}} = \sqrt{\frac{0.577 \cdot 0.0176}{1.6 \pi}} = 0.042 \text{ м}, \quad (\text{П6.30})$$

26.3 Длина постоянного магнита по оси намагничивания

$$d = \frac{m_m}{\gamma_M Q_m} = \frac{1.05}{7500 \cdot 0.0176} = 0.0079 \text{ м}. \quad (\text{П6.31})$$

26.4 Площадь боковой поверхности первой обмотки, $Q_{\delta_1}, \text{ м}^2$

$$Q_{\delta_1} = \frac{k_{11} Q_m (2r_1 + \delta_1)}{2r_1 + 2\delta_1 + d} = \frac{1.1 \cdot 0.0176 \cdot (2 \cdot 0.042 + 0.0035)}{2 \cdot 0.042 + 2 \cdot 0.0035 + 0.0078} = 0.0173 \text{ м}^2. \quad (\text{П6.32})$$

26.5 Толщина первой обмотки, $\delta_1, \text{ м}^2$

$$\delta_1 = \frac{m_{\text{обм.1}}}{2\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta_1}} = \frac{0.842}{2 \cdot 8900 \cdot 0.0173} = 0.0273 \text{ м}. \quad (\text{П6.33})$$

26.6 Площадь боковой поверхности второй обмотки, $Q_{\delta_2}, \text{ м}^2$

$$Q_{\delta_2} = \frac{k_{11} Q_m (2r_1 + 2\delta_1 + 2d + \delta_2)}{2r_1 + 2\delta_1 + d} = \frac{1.1 \cdot 0.0177 (2 \cdot 0.042 + 2 \cdot 0.0273 + 2 \cdot 0.008 + 0.00351)}{2 \cdot 0.042 + 2 \cdot 0.00273 + 0.008} = 0.0032 \text{ м}^2. \quad (\text{П6.34})$$

26.7 Толщина второй обмотки, $\delta_2, \text{ м}^2$

$$\delta_2 = \frac{m_{\text{обм.2}}}{2\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta_2}} = \frac{1.262}{2 \cdot 8900 \cdot 0.0218} = 0.0032 \text{ м}. \quad (\text{П6.35})$$

26.8 Высота активной части первой обмотки, $\ell_a, \text{ м}$

$$\ell_{a1} = \frac{Q_{\delta_1}}{\pi(2r_1 + \delta_1)} = \frac{0.0173}{\pi(2 \cdot 0.042 + 0.00273)} = 0.063 \text{ м}. \quad (\text{П6.36})$$

26.9 Высота активной части второй обмотки, ℓ_a , м

$$\begin{aligned} \ell_{a2} &= \frac{Q_{\delta_2}}{\pi(2r_1 + 2\delta_1 + 2d + \delta_2)} = \\ &= \frac{0.0218}{\pi(2 \cdot 0.042 + 2 \cdot 0.00273 + 2 \cdot 0.008 + 0.0032)} = 0.064 \text{ м} \end{aligned} \quad (\text{П6.37})$$

26.10 Высота постоянного магнита, λ , м

$$\lambda = \frac{\ell_{a1}}{k_{11}} = \frac{0.0634}{1.1} = 0.0576 \text{ м} \quad (\text{П6.38})$$

26.11 Индукция в зазоре, B_{m1} , Тл

$$\begin{aligned} B_{m1} &= \frac{\mu_0 H_c Q_{\delta_1} Q_{\delta_2}}{Q_m} \frac{d}{Q_{\delta_1} \delta_2 + Q_{\delta_2} \delta_1 + \mu_0 H_c Q_{\delta_1} Q_{\delta_2} \frac{d}{B_r Q_m}} = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 750 \cdot 10^3 \cdot 0.0173 \cdot 0.0218}{0.0178} \times \\ &\times \frac{0.008}{0.0173 \cdot 0.0324 + 0.0218 \cdot 0.00273 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 750 \cdot 10^3 \cdot 0.0173 \cdot 0.0218 \frac{0.008}{1 \cdot 0.0178}} = \\ &= 0.577 \text{ Тл} \end{aligned} \quad (\text{П6.39})$$

26.12 Площадь боковой поверхности постоянного магнита

$$\begin{aligned} Q_{m1} &= \pi(2r_1 + 2\delta_1 + d)\lambda = \pi(2 \cdot 0.0042 + 2 \cdot 0.00273 + 0.008) \cdot 0.0576 = \\ &= 0.0176 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (\text{П6.40})$$

26.13 Сравнивается значение Q_m и Q_{m1} , а также B_m и B_{m1} , и если

$$e = \frac{|Q_m - Q_{m1}|}{Q_m} > 0.001, \text{ или } e_1 = \frac{|B_m - B_{m1}|}{B_m} > 0.001, \text{ то } Q_m = Q_{m1} \text{ и } B_m = B_{m1} \text{ и}$$

расчет повторяется с Пб.11 до тех пор пока $e = \frac{|Q_m - Q_{m1}|}{Q_m} < 0.001$ и

$$e_1 = \frac{|B_m - B_{m1}|}{B_m} < 0.001.$$

27. Расчетное электромагнитное усилие, F, Н

$$\begin{aligned} F &= 2B_m Q_m Jk_z (\delta_1 + \delta_2) = \\ &= 2 \cdot 0.5 \cdot 0.0177 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0.4 \cdot (0.00273 + 0.00324) = 98.2 \text{ Н} \end{aligned} \quad (\text{П6.41})$$

28. Намагничивающая сила активной части обмотки на пару полюсов, $(IW)_a$, А

$$\begin{aligned} (IW)_a &= Jk_z \ell_a (\delta_1 + \delta_2) = \\ &= 2 \cdot 10^6 \cdot 0.4 \cdot 0.0596 (0.00271 + 0.00329) = 287.02 \text{ А} \cdot \end{aligned} \quad (\text{П6.42})$$

29. Масса постоянных магнитов, m_m , кг

$$m_m = 2\gamma_m Q_m d = 2 \cdot 7500 \cdot 0.0176 \cdot 0.008 = 2.1 \text{ кг} . \quad (\text{П6.43})$$

30. Масса обмоток, кг

$$\begin{aligned} m_{\text{обм.1}} &= 2\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta 1} \delta_1 = 2 \cdot 8900 \cdot 0.0174 \cdot 0.00271 = 0.841 \text{ кг} \\ m_{\text{обм.2}} &= 2\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta 2} \delta_2 = 2 \cdot 8900 \cdot 0.0215 \cdot 0.00329 = 1.262 \text{ кг} \end{aligned} \quad (\text{П6.44})$$

30. Проводимость постоянного магнита на пару полюсов λ_m , Гн

$$\lambda_m = \frac{B_r Q_m}{H_c d} = \frac{1 \cdot 0.0176}{750 \cdot 10^3 \cdot 0.008} = 2.961 \cdot 10^{-3} . \quad (\text{П6.45})$$

31. Проводимость воздушного зазора на пару полюсов $\lambda_{\delta 1}, \lambda_{\delta 2}$, Гн

$$\begin{aligned} \lambda_{\delta 1} &= \frac{\mu_0 Q_{\delta 1}}{\delta_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.0174}{0.00271} = 8.06 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \\ \lambda_{\delta 2} &= \frac{\mu_0 Q_{\delta 2}}{\delta_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.0215}{0.00329} = 8.2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \end{aligned} \quad (\text{П6.46})$$

32. Эквивалентная проводимость воздушного зазора на пару полюсов λ_{δ} , Гн

$$\lambda_{\delta} = \frac{\lambda_{\delta 1} \lambda_{\delta 2}}{\lambda_{\delta 1} + \lambda_{\delta 2}} = \frac{8.06 \cdot 10^{-6} \cdot 8.2 \cdot 10^{-6}}{8.06 \cdot 10^{-6} + 8.2 \cdot 10^{-6}} = 4.07 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} . \quad (\text{П6.47})$$

33. Относительная проводимость воздушного зазора $\lambda_{\delta, \text{отн}}$

$$\lambda_{\delta, \text{отн}} = \frac{\lambda_{\delta}}{\lambda_{\text{м}}} = \frac{4.07 \cdot 10^{-6}}{2.96 \cdot 10^{-6}} = 1.37. \quad (\text{П6.48})$$

34. Высота обмотки, $l_{\text{к}}$, м

$$l_{\text{к}} = l_{\text{а}} + 2x_{\text{м}} = 0.059 + 2 \cdot 0.005 = 0.07 \text{ м}. \quad (\text{П6.49})$$

35. Радиус внутренней обмотки, r_2 , м

$$r_2 = r_1 + \delta_1 = 0.0042 + 0.00271 = 0.0477 \text{ м}. \quad (\text{П6.50})$$

36. Радиус магнита, r_3 , м

$$r_3 = r_2 + d = 0.048 + 0.008 = 0.056 \text{ м}. \quad (\text{П6.51})$$

37. Радиус внешней обмотки, r_4 , м

$$r_4 = r_3 + \delta_2 = 0.056 + 0.00329 = 0.059 \text{ м}. \quad (\text{П6.52})$$

38. Радиус внешнего сердечника магнитопровода, r_5 , м

$$r_5 = \sqrt{r_1^2 - r_0^2 + r_4^2} = \sqrt{0.045^2 + 0.059^2} = 0.074 \text{ м}. \quad (\text{П6.53})$$

39. Толщина стенки внешнего сердечника магнитопровода, Δ , м

$$\Delta = r_5 - r_4 = 0.074 + 0.059 = 0.0152 \text{ м}.$$

(П6.54)

40. Средний радиус магнита, $r_{\text{ср.м}}$, м

$$r_{\text{ср.м}} = \frac{r_2 + r_3}{2} = \frac{0.047 + 0.055}{2} = 0.052 \text{ м}. \quad (\text{П6.55})$$

41. Средний радиус внутренней обмотки, $r_{\text{ср.обм.1}}$, м

$$r_{\text{ср.обм.1}} = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{0.045 + 0.047}{2} = 0.046 \text{ м}. \quad (\text{П6.56})$$

42. Средний радиус внешней обмотки, $r_{\text{ср.обм.2}}$, м

$$r_{\text{ср.обм.2}} = \frac{r_3 + r_4}{2} = \frac{0.055 + 0.059}{2} = 0.057 \text{ м.} \quad (\text{П6.57})$$

43. Среднее значение индукции во внутреннем зазоре, $B_{\text{ср.}\delta 1}$, м

$$B_{\text{ср.}\delta 1} = \frac{B_m Q_m}{Q_{\delta 1}} = \frac{0.578 \cdot 0.0176}{0.0174} = 0.586 \text{ Тл.} \quad (\text{П6.58})$$

44. Среднее значение индукции во внешнем зазоре, $B_{\text{ср.}\delta 2}$, м

$$B_{\text{ср.}\delta 2} = \frac{B_m Q_m}{Q_{\delta 2}} = \frac{0.578 \cdot 0.0176}{0.0215} = 0.474 \text{ Тл.} \quad (\text{П6.59})$$

Методика и пример расчета синхронного двигателя с постоянными магнитами намагниченными в радиальном направлении (магнитная система с двумя воздушными каналами) на основе сплава NdFeB с развиваемым электромагнитным усилием 2000 Н для привода одноступенчатого длиноходового тихоходного поршневого компрессора.

Исходные данные

1. Диаметр поршня $d_{\text{пор}} = 0.02 \text{ м}$.
2. Создаваемое давление в цилиндре $P_d = 8 \cdot 10^6 \text{ Па}$.
3. Коэффициент $\lambda = k \frac{\ell_{\text{ср}}}{\ell} = 0.75$.
4. Среднее значение индукции $B_{\text{ср}} = 0.5 \text{ Тл}$.
5. Частота $f = 1 \text{ Гц}$.
6. Половина хода индуктора $x_m = 0.1 \text{ м}$.
7. Линейная токовая нагрузка $A = 4 \cdot 10^4 \text{ А / м}$.
8. Значение остаточной индукции $B_r = 1.3 \text{ Тл}$.
9. Коэрцитивная сила $H_c = 955 \text{ кА / м}$.
10. Плотность меди $\gamma_{\text{обм}} = 8900 \text{ кг / м}^3$.
11. Плотность сплава постоянного магнита $\gamma_m = 7500 \text{ кг / м}^3$.
12. Плотность тока $J_{\text{доп}} = 3 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2$.
13. Коэффициент заполнения по меди $k_z = 0.5$
14. Форма постоянного магнита: прямоугольная призма $50 \times 50 \times 25 \text{ мм}$.
15. Число катушек обмотки якоря на пару полюсов $n = 8$.
16. Коэффициент полюсного перекрытия $k = 0.75$.

Порядок расчета

1. Площадь поперечного сечения поршня

$$S_{\text{пор}} = \frac{\pi d_{\text{пор}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{4} = 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (\text{П7.1})$$

2. Максимальное прижимное усилие

$$F_{\text{эл. макс}} = S_{\text{пор}} P_d = 3.14 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^6 = 2513.27 \text{ Н} \quad (\text{П7.2})$$

3. Суммарная общая длина обмотки

$$\ell = \sqrt{\frac{F_{\text{эл.макс}}}{B_{\text{ср}} \lambda A}} = \sqrt{\frac{2513.27}{0.5 \cdot 0.75 \cdot 4 \cdot 10^4}} = 0.41 \text{ м} \quad (\text{П7.3})$$

4. Максимальная потребляемая мощность

$$\begin{aligned} P &= 0.5 B_{\text{ср}} x_M 2\pi f A \sqrt{\ell \lambda} = \\ &= 0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot \sqrt{0.41} \cdot 0.75 \cdot 10^4 = 789 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (\text{П7.4})$$

5. Исходя из решения задачи оптимизации независимые переменные

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\frac{B_r \gamma_{\text{обм}}}{\mu_0 H_c \gamma_M}} = \sqrt{\frac{1.3}{4\pi \cdot 10^{-7}} \frac{8900}{7500}} = 1.13 \\ k_M &= 1 \end{aligned} \quad (\text{П7.5})$$

6. Масса медного провода (активной части витков обмотки)

$$m_{\text{обм}} = \frac{F_{\text{эл.макс}} \gamma_{\text{обм}}}{B_{\text{ср}} k_{\text{доп}}} = \frac{2513.27 \cdot 8900}{1.3 \cdot 0.75 \cdot 3 \cdot 10^6} = 21.3 \text{ кг} \quad (\text{П7.6})$$

7. Масса постоянных магнитов

$$m_M = k_M m_{\text{обм}} = 1 \cdot 21.3 = 21.3 \text{ кг} \quad (\text{П7.7})$$

8. Полное число ампервитков обмотки

$$IW_a = A \ell = 4 \cdot 10^4 \cdot 0.41 = 16373 \text{ А} \quad (\text{П7.8})$$

9. Величина воздушного зазора

$$\delta = n_{\text{опт}} d = 1.13 \cdot 0.025 = 0.02834 \text{ м} \quad (\text{П7.9})$$

10. Площадь, занятая обмоткой с током

$$S_{\text{обм}} = 0.41 \cdot 0.0283 \cdot 0.5 = 0.0058 \text{ м}^2 \quad (\text{П7.10})$$

11. Уточненное значение плотности тока

$$J_{\text{доп.уг}} = \frac{IW_a}{S_{\text{обм}}} = 2.82 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2 \quad (\text{П7.11})$$

12. Относительная проводимость

$$\lambda_{\delta}^* = \frac{\mu_0 H_c}{B_r n_{\text{опт}}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 955 \cdot 10^3}{1.3 \cdot 1.13} = 1.05 \quad (\text{П7.12})$$

13. Площадь обмотки

$$S_{\text{пр}} = \frac{IW_a}{J_{\text{доп}} \cdot k_z} = \frac{IW_a}{3 \cdot 10^6 \cdot 0.5} = 0.011 \text{ м}^2 \quad (\text{П7.13})$$

14. Площадь, занятая одной катушкой

$$S_{\text{кат}} = \frac{S_{\text{пр}}}{n} = \frac{0.011}{8} = 0.0014 \text{ м}^2 \quad (\text{П7.14})$$

15. Площадь, занятая одной катушкой с учетом коэффициента заполнения

$$S_{\text{кат.уг}} = S_{\text{кат}} k_3 = 0.0014 \cdot 0.5 = 0.0007 \text{ м}^2 \quad (\text{П7.15})$$

16. Площадь поперечного сечения провода

$$q_{\text{пр}} = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{(1.8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (\text{П7.16})$$

17. Ток в обмотке

$$I = J_{\text{доп}} q_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6 \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} = 7.63 \text{ А} \quad (\text{П7.17})$$

18. Число витков активной части обмотки

$$W_{\text{обм}} = \frac{IW_a}{I} = \frac{16373}{7.63} = 2144 \quad (\text{П7.18})$$

19. Число витков катушки

$$W_{\text{кат}} = \frac{W_{\text{обм}}}{n} = \frac{2144}{8} = 268 \quad (\text{П7.19})$$

20. Напряжение питания

$$U_{\text{пит}} = \frac{P}{I} = \frac{789}{7.63} = 103.4 \text{ В} \quad (\text{П7.20})$$

21. Относительные потери

$$P_r = \frac{J_{\text{доп}}}{\gamma_{\text{обм}} B_{\text{ср}} k x_M 2\pi f} = \frac{3 \cdot 10^6}{8900 \cdot 0.5 \cdot 0.75 \cdot 0.1 \cdot 2\pi \cdot 1} = 0.24 \quad (\text{П7.21})$$

22. КПД

$$\eta = \frac{1}{1 + P_r} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + 0.24} \cdot 100\% = 80.4\% \quad (\text{П7.22})$$

г. Омск
19.05.2020

Испытание теплового режима
обмотки линейного магнитоэлектрического двигателя
для тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора

Схема подключения обмотки: две группы катушек по 4. Катушки в группе включены последовательно согласно. Группы подключены последовательно встречно. Направление намотки в двух группах – разное.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 1.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 8.

Охлаждение обмоток – принудительная циркуляция воздуха (обдув).

Измерение температуры проводилось двумя независимыми приборами: ртутным термометром и прибором М890С.

Измерение индукции проводилось прибором ТПУ

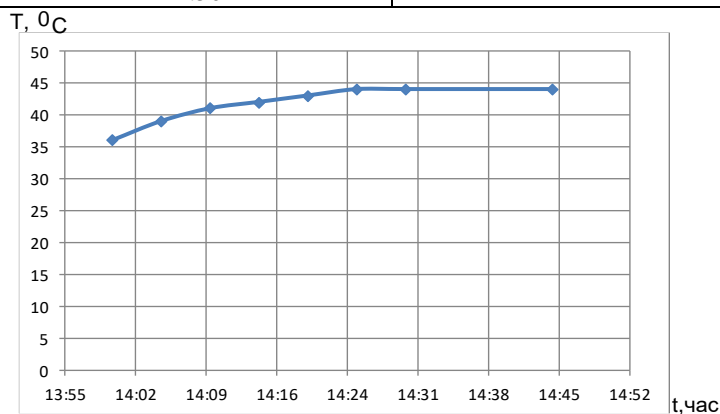
Температура окружающей среды 27 °С.

Ток в обмотке двигателя – поддерживается равным 5 А.

Напряжение, подаваемое на обмотку 149.3 В

Мощность, отдаваемая источником 780 Вт

№ п/п	Время, час	Температура, С
1	13.58	27
2	14.00	36
3	14.05	39
4	14.10	41
5	14.15	42
6	14.20	43
7	14.25	44
8	14.30	44
9	14.50	44



В 14.50 эксперимент завершен.

Ток в обмотке – 5 А.

Напряжение, подаваемое на обмотку – 183 В.

Мощность, отдаваемая источником – 930 Вт.

Среднее значение индукция в зоне обмотки $B=440$ мТл.

Вывод: для выхода на установившийся режим естественной циркуляции воздуха для охлаждения обмотки недостаточно. Требуется дополнительно установка системы охлаждения обмотки.

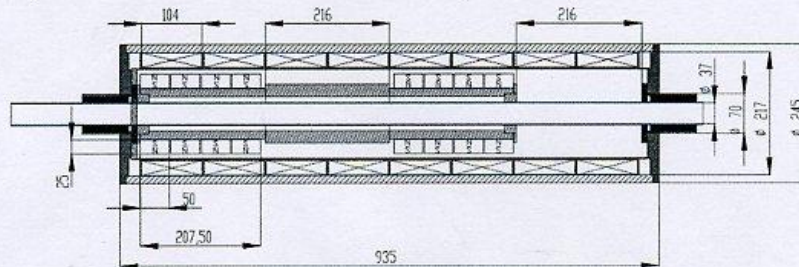
г. Омск
05.06.2020

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №1

статических характеристик тихоходного линейного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) для привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора

1. Объект испытаний:

Опытный образец тихоходного линейного СДПМ возвратно-поступательного движения, используемый в составе привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. Постоянные магниты в опытном образце выполнены на основе сплава FeNdB (марка N40). Максимальная плотность тока в эксперименте $3,8 \cdot 10^6$ А/м².



Тихоходный линейный СДПМ возвратно-поступательного движения

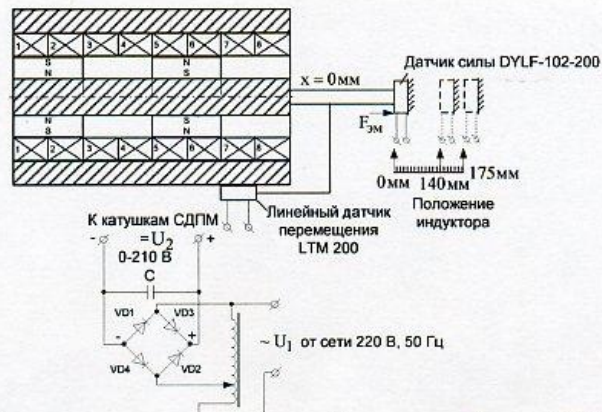
2. Цель испытаний: Проверка тихоходного СДПМ по развиваемому двигателем тяговому электромагнитному усилию на штоке при различных режимах работы обмотки.

3. Испытательное оборудование и средства измерений

- датчик силы DYLF-102-200 и прибором M890C при различном стабилизированном токе I в обмотке и различном положении индуктора: 0, 140, 175 мм. Измерение положения индуктора контролируется датчиком перемещения LTM 200, который неподвижно закреплен на корпусе СДПМ.

4. Условия и метод проведения испытаний

Схема подключения обмотки: две группы из: а) 4, б) 3, в) 2 катушек. Катушки в группе включены последовательно согласно. Группы подключены последовательно встречно. Направление намотки в двух группах – встречное. Источник питания: регулируемый однофазный автотрансформатор 220 В, на обмотку СДПМ подается выпрямленное напряжение с выхода диодного моста. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения применяется конденсатор емкостью 200 мкФ.



Электрическая схема испытаний опытного образца СДПМ

Отсчет положения индуктора ($x=0$ мм) ведется слева направо от торца якоря (по направлению движения). Измерение проводится в режиме $x=0$ мм, $x=140$ мм и $x=175$ мм (на схеме эксперимента индуктор смещается вправо).

Для режимов:

а) при $x=0$ мм, $x=140$ мм и $x=175$ мм

Используются 8 катушек: 1,2,3,4 и 5,6,7,8.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 1.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 8.

б) при $x=0$ мм и $x=140$ мм используются катушки 1,2,3 и 5,6,7.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 1.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 7.

при $x=175$ мм используются катушки 2,3,4 и 6,7,8.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 2.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 8.

в) при $x=0$ мм используются катушки 1,2 и 5,6.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 1.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 6.

при $x=140$ мм используются катушки 2,3 и 6,7.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 2.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 7.

при $x=175$ мм используются катушки 3,4 и 7,8.

- вывод + источника подключен к клемме начала катушки 3.

- вывод – источника подключен к клемме конца катушки 8.

Охлаждение обмоток – естественное.

Измерение проводилось датчиком DYLF-102-200 и прибором M890C при различном стабилизированном токе I в обмотке и различном положении индуктора.

Температура окружающей среды 27°C .

Ток в обмотке двигателя – поддерживается одинаковым в диапазонах: а) от 1 до 6 А, б) от 1 до 8 А, в) от 1 до 10 А.

Напряжение на выводах обмотки якоря регулировалось до 210 В.

Режимы работы обмотки:

а) две группы по 4 катушки,

б) две группы по 3 катушки,

в) две группы по 2 катушки.

Результаты испытаний:

а) две группы по 4 катушки

Развиваемое электромагнитное усилие $F_{эм} = f(x)$, Н

I, A x, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	115,758	295,1829	451,4562	613,5174	775,5786	902,9124				
140	127,3338	289,395	451,4562	601,9416	729,2754	833,4576				
175	92,6064	243,0918	393,5772	532,4868	659,8206	775,5786				

б) две группы по 3 катушки

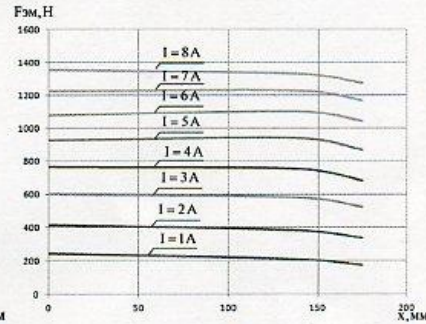
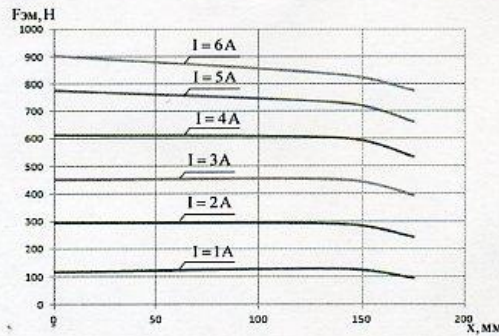
Развиваемое электромагнитное усилие $F_{эм} = f(x)$, Н

I, A x, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	243,09	416,728	601,94	764,002	926,06	1076,54	1225	1354,36		
140	208,36	382,001	578,79	752,427	937,639	1099,701	1227,035	1331,217		
175	173,637	335,6982	520,911	682,9722	868,185	1041,822	1169,156	1273,338		

в) две группы по 2 катушки

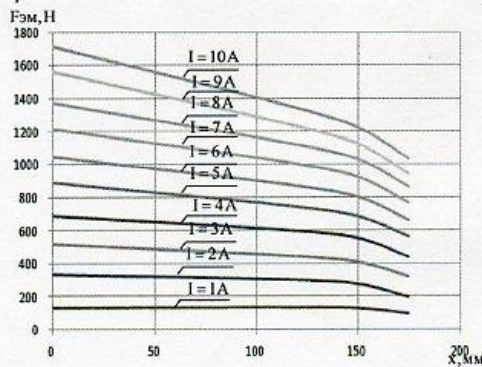
Развиваемое электромагнитное усилие $F_{эм} = f(x)$, Н

I, A x, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	132,0	334,96	515,36	684,486	887,435	1045,28	1214,40	1372,25	1563,0	1710,50
140	132,0	289,86	425,16	571,737	707,036	831,060	955,084	1067,83	1169,3	1270,7
175	98,19	199,66	323,69	436,439	560,46	661,937	763,411	864,885	943,80	1034,0



а)

б)



в)

5. Замечания и рекомендации

Замечаний и рекомендаций нет.

6. Выводы и заключения

Снижение электромагнитного усилия от перемещения вызвано влиянием ампервитков обмотки якоря, которые находятся вне зоны расположения индуктора.

Опытный образец тихоходного линейного СДПМ возвратно-поступательного движения прошел проверку по указанной методике испытаний. При питании обмотки выпрямленным

током целесообразно применять режим работы, когда обмотки разделены на две группы по две катушки. Уменьшение количества катушек до двух в одной паре приводит к уменьшению потерь мощности и уменьшению падения напряжения в обмотке. При большем количестве подключенных катушек индуктор при движении оказывается вне зоны активных ампервитков, что приводит к тому, что магнитный поток, создаваемый этими витками, взаимодействует с потоком рассеяния постоянных магнитов и создает меньшее электромагнитное усилие, действующее на поршень компрессора.

Полученное в эксперименте максимальное тяговое электромагнитное усилие составляет 1710.5 Н. Сопоставление результатов проектирования тихоходного линейного СДПМ возвратно-поступательного движения по предложенной Татевосяном А.А. методике с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о соответствии опытного образца тихоходного СДПМ, предназначенного для привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.

В 17.30 эксперимент завершен.

Члены комиссии

От АО «НТК «Криогенная техника»
заместитель генерального директора
по гражданской продукции, к.т.н.

А.Ю. Громов

От ФГБОУ ВО ОмГТУ
проректор по научной и
инновационной деятельности, к.х.н.

В.Ф. Фефелов

г. Омск
08.06.2020

Испытание параметров обмотки тихоходного линейного СДПМ по опыту затухания постоянного тока при различном положении индуктора для тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора

Схема подключения обмотки: две группы по 2 катушки. Катушки в группе включены последовательно согласно. Группы подключены последовательно встречно. Направление намотки в двух группах – разное.

- вывод + источника подключен к клемме: а) начала катушки 1, б) начала катушки 2, в) начала катушки 3.
- вывод – источника подключен к клемме а) конца катушки 6, б) конца катушки 7, в) конца катушки 8.

Охлаждение обмоток – естественное.

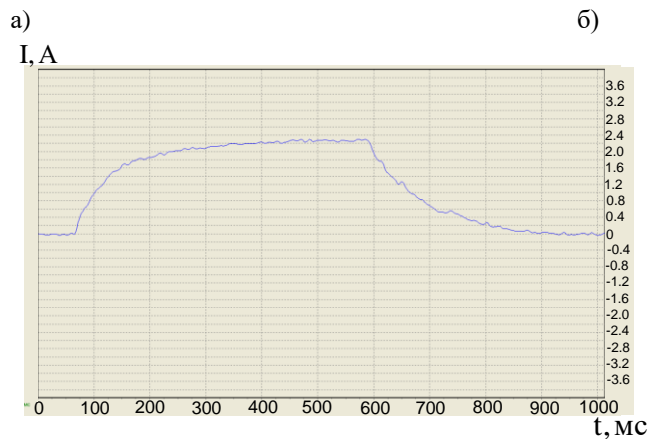
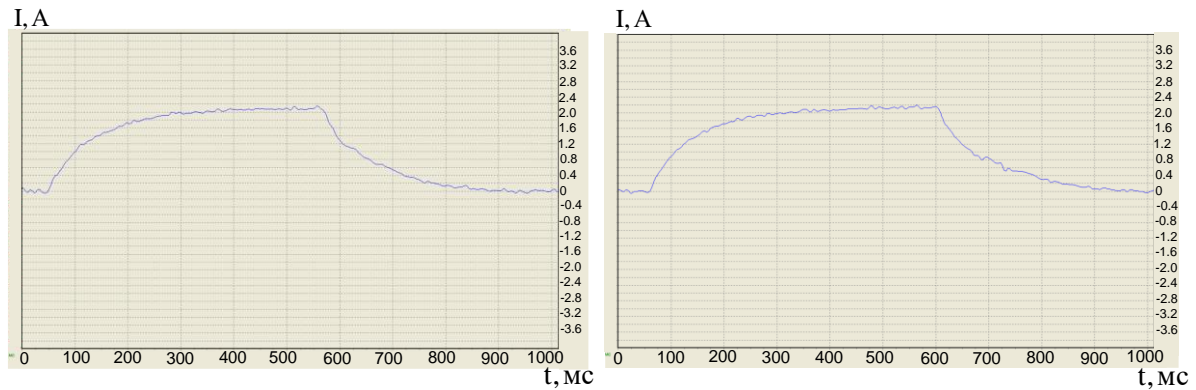
Измерение проводилось цифровым USB-осциллографом VM8020 и прибором M890C при различном стабилизированном токе I в обмотке и различном положении индуктора: а) – 0 мм, б) – 140 мм, в) 175 мм.

Общее активное сопротивление постоянному току обмотку, состоящей из двух групп катушек: а) 16 Ом; б) 16 Ом; в) 15 Ом.

Температура окружающей среды 27 °С.

Ток в обмотке двигателя – поддерживается равным 2 А.

Напряжение, подаваемое на обмотку до 32 В.



в)

Время переходного процесса: а) 253 мс; б) 255 мс; в) 275 мс.

Постоянная времени затухания при принятом условии окончания переходного процесса 5τ : а) $\tau = 0.056$ с, б) $\tau = 0.051$ с, в) $\tau = 0.046$ с

Общая индуктивность обмотки, состоящей из двух групп катушек: а) 809.6 мГн, б) 816 мГн, в) 825 мГн.

В 16.25 эксперимент завершен.