

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

ПЕТУХОВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
доцент Сериков А.В.

Комсомольск-на-Амуре- 2014

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	4
ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ СОСТРОЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ	9
1.1. Автономные источники переменного тока стабильной частоты	10
1.2. Трехфазные автономные источники с электромашинным формированием кривой выходного напряжения	20
1.3. Бесконтактные трехфазные автономные источники на базе совмещенного двухмашинного генератора	30
Выводы	33
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОВМЕЩЕННОМ ДВУХМАШИННОМ ГЕНЕРАТОРЕ	33
2.1. Обобщенная математическая модель трехфазной электрической машины в фазных координатах	34
2.2. Обобщенная математическая модель совмещенного двухмашинного генератора	40
2.3. Особенности математического описания совмещенного двухмашинного генератора	51
2.4. Построение модели совмещенного двухмашинного генератора в Matlab.	62
2.5. Результаты моделирования совмещенного двухмашинного генератора.	68
Выводы	76
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В СОВМЕЩЕННОМ ДВУХМАШИННОМ ГЕНЕРАТОРЕ	77
3.1. Расчет индуктивностей и сопротивлений	77
3.2. Программа и модель для исследования энергетических соотношений в совмещенном двухмашинном генераторе	82
3.3. Результаты исследования влияния параметров обмоток на энергетические соотношения.	89

3.4.	Аналитические выражения для токов совмещенного двухмашинного генератора.	92
	Выводы	101
ГЛАВА 4.	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ДВУХМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА	101
4.1.	Рекомендации по формированию обмоток, совмещенных в общем магнитопроводе	102
4.2.	Макетный образец совмещенного двухмашинного генератора	107
4.3.	Экспериментальные исследования	115
	Выводы	132
	Заключение	133
	Список использованных источников	135
	Приложения	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Области применения автономных источников переменного тока, преобразующих механическую энергию вращения, довольно широки. Энергия двигателей автомобильной техники, летательных аппаратов, водного транспорта частично преобразуется генераторами в электроэнергию для питания бортовой аппаратуры. Механическая энергия дизельных, бензиновых и др. электростанций полностью используется для вращения вала генератора, снабжающего электроэнергией различных потребителей. Несмотря на большое разнообразие используемых в настоящее время автономных источников переменного тока, не прекращается работа по поиску новых технических решений в этой области, поскольку существующие решения не в полной мере способны удовлетворить возрастающие требования потребителей. В связи с этим, получение стабильной и регулируемой частоты в автономных системах электропитания, работающих при переменных частотах вращения первичного двигателя, является актуальной задачей в электроснабжении.

Степень разработанности темы исследования. Для получения переменного тока стабильной частоты в автономных источниках электропитания применяются устройства различного принципа действия и сложности изготовления. Одними из первых были разработаны автономные источники с использованием устройств, предназначенных для стабилизации скорости вращения генератора при переменной скорости приводного двигателя. Устройства подобного рода получили в литературе название приводов постоянной скорости (ППС). Получение стабильной частоты в автономных системах с ППС достигается путём воздействия на механическую часть установки. Механические устройства стабилизации частоты вращения вала являются чрезвычайно громоздкими и сложными в изготовлении, а кроме того - обладают низкими показателями быстродействия и надежности. Все эти обстоятельства явились определяющими для отказа от подобного способа стабилизации частоты.

В современном производстве автономных источников энергии основное предпочтение отдается автономным энергоблокам с синхронными генераторами и коллекторными машинами, но такие системы уже не в полной мере удовлетворяют все возрастающим требованиям к качеству и надежности, к сроку службы, статическим и динамическим показателям автономной системы электроснабжения. Отдельной ветвью развития автономных систем электроснабжения стабильной частоты являются машинно-вентильные системы. Разработке, расчету, конструированию и исследованию различных вариантов построения машинно-вентильных систем посвящено значительное количество работ.

Ряд научных работ последнего десятилетия (Сипайлова Г.А., Цукублин А.Б., Кузьмин В.М., Киница О.И., Дубровский И.Н.) был посвящен разработке машинно-вентильных систем стабильной частоты с предварительным формированием кривой напряжения в электромашинном генераторе и прямоугольным законом управления преобразователем частоты на его выходе. Такие источники стабильной частоты имеют простую схему управления вентильным преобразователем, неплохие показатели качества выходного напряжения и динамические показатели, но электромашинная часть подобных устройств имеет усложненную конструкцию. В связи с изложенным выше, разработка новых типов автономных источников переменного тока стабильной частоты, обеспечивающих высокое качество выходного напряжения, продолжает быть актуальной задачей.

Целью работы является дальнейшее развитие теории, разработка, моделирование, создание и исследование бесконтактного автономного источника электроснабжения переменного тока, позволяющего получить выходное напряжение требуемого качества без использования полупроводникового преобразователя на выходе генератора.

Задачами исследования являются:

- анализ результатов известных исследований и технических решений автономных источников переменного тока стабильной частоты;

- разработка нового технического решения, теоретическое описание и создание математической модели электромашинной части;
- теоретические исследования разработанной математической модели;
- получение аналитических зависимостей амплитуд и фаз токов и электромагнитного момента электромашинной части автономного источника в установившемся режиме от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки;
- создание опытного образца электромашинной части предлагаемого технического решения автономного источника;
- экспериментальные исследования опытного образца.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработано новое техническое решение по созданию трехфазного источника переменного тока стабильной частоты для автономных систем энергоснабжения, использующее последовательное электромеханическое преобразование энергии в разнополюсных электрических машинах с согласованными обмотками, позволяющее сформировать переменное напряжение стабильной частоты при переменной частоте вращения ротора бесконтактным методом без использования полупроводникового преобразователя на выходе системы;
- предложено теоретическое описание электротехнического комплекса на базе двух асинхронных машин совмещенных в общем магнитопроводе системой дифференциальных уравнений замкнутых контуров (далее – электротехнический комплекс), включающей в себя уравнения разнополюсных электрических машин и параметры нагрузки, позволяющей уменьшить количество уравнений в системе;
- получены аналитические зависимости амплитуд и фазовых сдвигов токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса преобразованием описывающей его системы дифференциальных уравнений, которые позволяют исследовать установившиеся режимы его работы методами математического анализа.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- произведена модернизация существующей математической модели электрической машины в фазной системе координат с включением в нее уравнений всех обмоток электротехнического комплекса и параметров нагрузки, что обеспечивает получение новых результатов по теме диссертации;
- предложено новое техническое решение бесконтактного автономного источника электроснабжения переменного тока стабильной частоты;
- последовательное преобразование системы дифференциальных уравнений, разработанное автором для получения аналитических зависимостей токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки, может использоваться для любой электромеханической системы, описанной дифференциальными уравнениями;
- представлены рекомендации по выбору параметров обмоток, которые в совокупности с аналитическими выражениями для токов и электромагнитного момента позволяют провести теоретический поиск оптимального варианта построения электротехнического комплекса по выбранному критерию;
- создан и испытан опытный образец для проведения экспериментальных исследований режимов работы источника.

Методы исследования. Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, основывались на применении методов теории электромеханического преобразования энергии, теории дифференциальных уравнений, матричного анализа. При решении задач исследования динамических режимов систем, определения структуры и параметров предложенных моделей использовались методы численного моделирования на основе пакета Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования проводились на изготовленном автором опытном образце.

Положения, выносимые на защиту:

- новое техническое решение автономного источника электроснабжения переменного тока;

- математическая модель СДМГ и ее реализация в пакете Simulink программ моделирования Matlab;
- результаты теоретических исследований СДМГ;
- аналитические выражения для токов и электромагнитного момента СДМГ;
- опытный образец СДМГ;
- результаты экспериментальных исследований опытного образца.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность теоретических расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями опытного образца. Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (г.Комсомольск-на-Амуре, 2010г.); пятой международной научно-практической заочной конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии» (г.Липецк, 2011 г.); 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов (г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.); Всероссийской научно – практической конференции «Электропривод транспорта и промышленности» (г. Хабаровск, 2013 г.).

Личный вклад заключается в разработке новой конструкции автономного источника электроснабжения переменного тока; создании математической модели разработанного электротехнического комплекса на базе двух совмещенных в общем магнитопроводе асинхронных машин; выводе аналитических выражений для амплитуд, фазовых сдвигов токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса; разработке рекомендаций по выбору параметров обмоток для исключения взаимовлияния электрических машин при совмещении их в общем магнитопроводе; создании опытного образца электротехнического комплекса; исследовании модели и испытании опытного образца.

Реализация работы осуществлена в рамках научного направления кафедры электромеханики ГОУВПО «КнАГТУ», «Разработка и исследование систем децентрализованного энергообеспечения на основе нетрадиционных электромеханических преобразователей энергии». Результаты работы переданы в

форме технической документации и методик расчетов на ОАО «Эра», г. Комсомольск-на-Амуре для рассмотрения возможности использования при разработке, проектировании и подготовке производства автономных источников электропитания переменной частоты. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 140601 «Электромеханика» и бакалавров по направлениям 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», 140200 «Электроэнергетика» и 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации. По результатам исследований, отраженных в диссертации опубликовано восемь научных работ, в том числе три – в изданиях рекомендованных ВАК, получен патент на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 126 страницах машинописного текста, списка литературы из 62 наименований и приложений. В работе содержится 50 рисунков, 5 таблиц.

ГЛАВА1. ПРИНЦИПЫ НОСТРОЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

1.1. Автономные источники переменного тока стабильной частоты

История развития источников переменного тока берет свое начало со времен открытия магнитной индукции электрического тока. Первые упоминания о генераторах переменного тока, продемонстрированных научному сообществу, приходятся на конец 19 века. Эти упоминания связаны с именами таких известных ученых, как Майкл Фарадей, Никола Тесла и ряда других именитых ученых той эпохи.

Требований к стабильности частоты разработанных в то время источников, как таковых, не предъявлялось, но повсеместное внедрение в жизнь человека электричества, появление электрических приборов различного назначения, стандартизации параметров электрических сетей и электроприемников привели к появлению требований к стабильности частоты и напряжения вырабатываемой электрической энергии.

Автономные источники переменного тока должны в полной мере соответствовать этим требованиям, а при обеспечении электроэнергией специализированных комплексов – электроприемников, к источникам могут быть предъявлены и дополнительные, специфические требования. Многолетний труд отечественных и зарубежных ученых в области создания автономных источников переменного тока стабильной частоты привел к разработке устройств стабилизации частоты, различающихся между собой как принципом действия, так и особенностями конструктивного исполнения.

При всем существующем многообразии систем стабилизации, их можно разделить на две группы, основываясь на способе получения стабильной частоты при переменной частоте вращения вала первичного двигателя:

а) системы с приводом постоянной скорости (ППС), в которых изменяющаяся частота вращения первичного двигателя преобразуется с помощью специальных устройств в постоянную частоту вращения генератора;

б) системы с переменной скоростью вращения генератора и постоянной выходной частотой (ПСПЧ), в которых изменяющаяся частота вращения преобразуется в стабильную частоту либо с помощью самого генератора, либо переменная частота на выходе генератора преобразуется с помощью статических преобразователей частоты в стабильную частоту.

Многие авторы [1-3] приводят классификацию систем стабилизации, основываясь на поэтапном преобразовании энергии при прохождении ее от первичного двигателя к потребителям переменного тока стабильной частоты и конструктивных особенностях (рис.1.1). Отличие разветвленных схем устройств стабилизации частоты от неразветвленных в том, что в первом случае энергия в систему электропитания поступает от первичного двигателя по двум параллельным каналам – основному и регулируемому, а во втором – вся энергия для питания потребителей преобразуется в каждом элементе схемы.

Получение стабильной частоты в автономных системах с ППС достигается установкой между первичным двигателем и генератором устройства, которое при изменении скорости вращения вала первичного двигателя поддерживает скорость вращения вала генератора неизменной [4-7].

В ППС в качестве промежуточного устройства могут применяться гидравлические и пневматические трансформаторы, многоступенчатые механические редукторы, механические бесступенчатые вариаторы, пневмо- и гидроприводы, гидромеханические пневматические и электромеханические системы с дифференциальным редуктором, а также каскадные электромашинные системы. Проведенные исследования показали, что лучшими по энергетическим и массогабаритным показателям являются гидромеханические и механические ППС [8]. Однако они сложны в изготовлении, ненадежны, громоздки, имеют высокую стоимость и малый срок службы. Остальные ППС уступают по энергетическим и массогабаритным показателям.

Источники переменного тока с системой ПСПЧ классифицируются по способам стабилизации частоты:

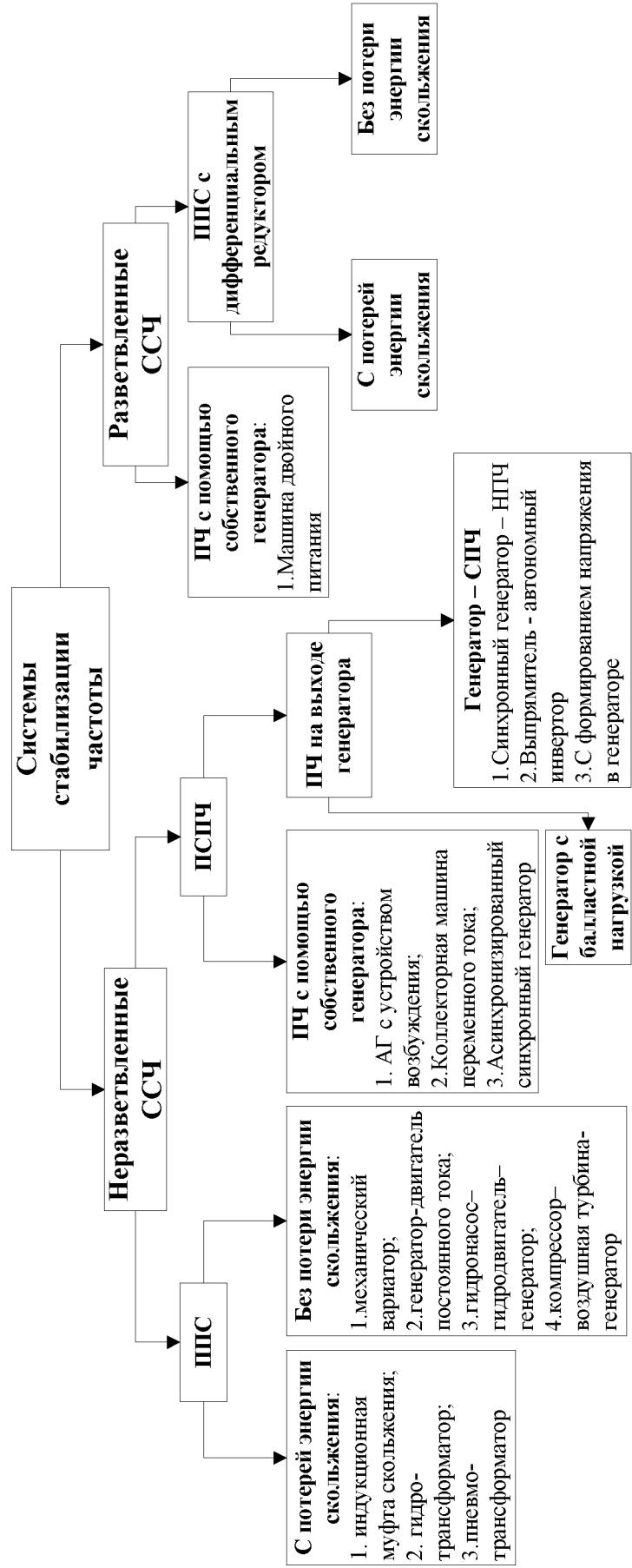
- с помощью статического преобразователя частоты;
- с использованием собственного генератора;
- с электромашинным формированием напряжения в генераторе.

К системам ПСПЧ с использованием собственного генератора относятся машины двойного питания, асинхронные генераторы с устройством возбуждения, асинхронизированный синхронный генератор и коллекторные машины переменного тока.

В известных автономных системах возбуждение асинхронного генератора со стороны статора осуществляется от синхронной машины, работающей параллельно с асинхронным генератором или с помощью конденсаторов.

В автономных системах на базе асинхронного генератора с самовозбуждением постоянная частота на выходе может поддерживаться в ограниченном диапазоне изменения скорости регулировкой сопротивления, вводимого в цепь ротора. При таком способе регулирования КПД системы очень низкий, поскольку потери в роторной цепи такой машины пропорциональны скольжению, и в добавочном сопротивлении потери мощности будут большими. Более того, для обеспечения самовозбуждения требуется значительная реактивная мощность конденсаторов, в результате чего ухудшаются массогабаритные показатели системы в целом, и увеличивается стоимость установки.

В автономных системах на базе асинхронного генератора с возбуждением от синхронной машины, источником реактивной мощности является синхронная машина. Достоинством таких систем является простота включения их в параллельную работу, что удобно, когда необходимо иметь несколько источников переменного тока, вращаемых двигателями внутреннего сгорания. ПСПЧ с асинхронными генераторами, возбуждаемыми со стороны статора, широкого распространения не получили, так как диапазон изменения их скорости ограничен и требуются значительные по массе и объему источники реактивной энергии.



1.1. Классификация систем стабилизации частоты.

Использование коллекторных машин в автономных источниках электроснабжения переменного тока [9] является невыгодным из-за сложности и малой надежности устройств стабилизации частоты при переменной частоте вращения вала первичного двигателя, в связи с чем подобные системы широкого применения не нашли.

Энергетические показатели автономных систем на основе асинхронизированного синхронного генератора [10-12] зависят от диапазона изменения частоты вращения приводного двигателя. Эффективнее всего применение асинхронизированного синхронного генератора в диапазоне частот вращения, когда машина работает в зоне положительных скольжений при $0 < S < 1$.

Структурная схема автономной системы с машиной двойного питания показана на рисунке 1.2. Напряжение возбуждения АГ переменной частоты формируется преобразователем частоты ПЧ из напряжения синхронного возбудителя СВ, который расположен на том же валу, что и основной генератор АГ. В качестве ПЧ обычно используется полупроводниковый преобразователь частоты. Величину напряжения на нагрузке можно регулировать либо изменением напряжения возбудителя с помощью регулятора напряжения РН, либо с помощью преобразователя ПЧ.

Достоинствами такой системы являются выполнение преобразователя частоты на мощность, необходимую только для возбуждения АГ, что в узком диапазоне частот вращения АГ обеспечивает хорошие массогабаритные показатели, и невысокие требования к форме напряжения ПЧ. За счет высоких фильтрующих свойств МДН [13] форма выходного напряжения генератора близка к синусоидальной даже при питании его роторной обмотки напряжением прямоугольной формы. Преобразователь частоты в этом случае значительно упрощается [9].

Недостатками системы с асинхронизированным синхронным генератором являются необходимость во вспомогательном генераторе для возбуждения МДП, плохие энергетические показатели при увеличении диапазона частот вращения. Кроме того, необходимо отметить, что достаточно простое использование

системы с МДП возможно только при наличии скользящих контактов в цепи ротора. Создание бесконтактного источника электропитания возможно только при значительном усложнении конструкции машины, либо при размещении преобразователя частоты на роторе.

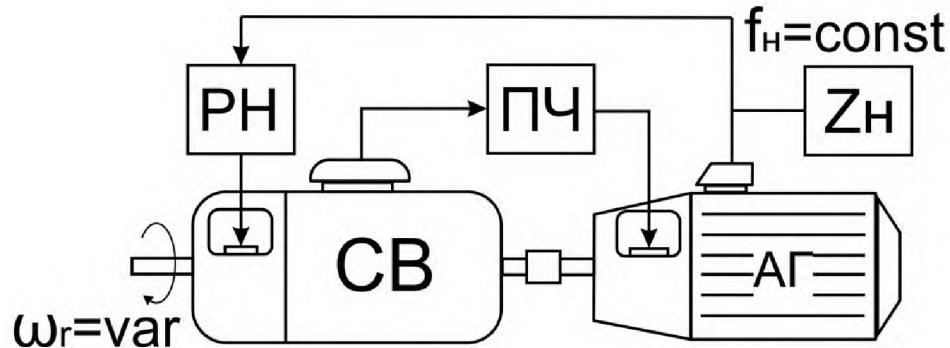


Рис. 1.2. Схема автономного источника переменного тока стабильной частоты на базе машины двойного питания.

В системах с использованием балластной нагрузки регулировка частоты основывается на зависимости частоты вращения турбины от развиваемой ею мощности, которая в автономных системах электроснабжения потребляется электрической нагрузкой. Частота вращения вала генератора стабилизируется выбором соответствующей нагрузки источника электропитания. Величина нагрузки, а соответственно и частота выходного напряжения автономного источника электропитания изменяется включением на выход генератора регулируемой балластной нагрузки.

На практике в качестве балластной используется некоторая полезная нагрузка и данным способом стабилизации частоты осуществляется автоматическое перераспределение электрической мощности между некоторыми потребителями, частью из которых допускается снижение величины питающего напряжения или полное его отключение. Схема энергоустановки с автобалластным регулированием выходных параметров показана на рисунке 1.3.

Достоинством этого способа является исключение электромеханических устройств из системы стабилизации частоты вращения генератора. Качество

выходного напряжения источника электропитания с такой системой регулирования достаточно хорошее в связи с высоким быстродействием системы. Благодаря стабилизации частоты вращения приводного двигателя в рассматриваемых типах энергоустановок могут применяться общепромышленные генераторы без большого запаса механической прочности ротора.

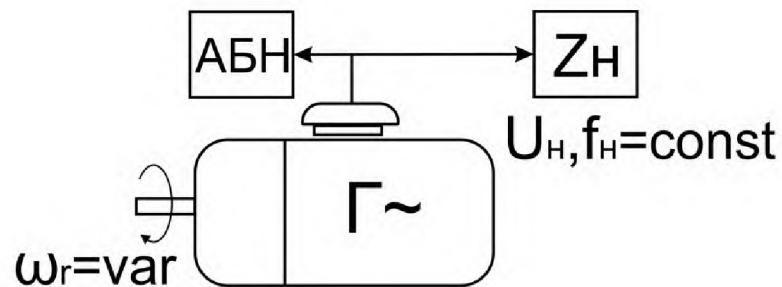


Рис. 1.3. Схема энергоустановки с автобалластным регулированием выходных параметров.

Стабилизация выходного напряжения при помощи автобалластной нагрузки применяется на микроГЭС, установленных на равнинных реках с постоянной скоростью течения.

При использовании для стабилизации выходных параметров автономного источника переменного тока статического преобразователя частоты (СПЧ) энергия переменного тока генератора преобразуется в выходную энергию переменного тока с другими параметрами (рисунок 1.4). Схемная реализация СПЧ в таких источниках осуществляется по трем вариантам:

- СПЧ со звеном постоянного тока состоящий из выпрямителя и автономного инвертора (В-АИ);
- непосредственные преобразователи частоты с искусственной коммутацией вентилей (НПЧ ИК).
- непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией вентилей (НПЧ ЕК).

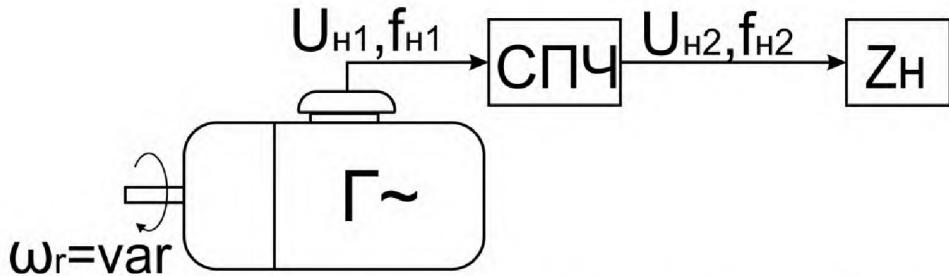


Рис. 1.4. Источник на основе генератора переменного тока и статического преобразователя частоты

Автономные источники с СПЧ первого типа представляют собой вентильные генераторы со звеном постоянного тока, в которых переменный ток генератора частоты f_1 преобразуется сначала в постоянный ток, а затем постоянный ток в автономном инверторе — в переменный ток выходной частоты f_2 . В общем случае величина и частота инвертированного напряжения на выходе СПЧ регулируются по любому заданному закону. Рабочая частота инвертора определяется только его системой управления и может быть весьма стабильной. Регулированием напряжения генератора, либо выпрямленного напряжения, либо выходного напряжения с помощью инвертора добиваются стабилизации напряжения на нагрузке источника электропитания.

Регулирование напряжения генератора является не очень эффективным, поскольку быстродействие системы регулирования напряжения, определяемое величиной постоянной времени обмотки возбуждения генератора, сравнительно низкое. Улучшение динамических свойств автономного источника со звеном постоянного тока возможно применением управляемого выпрямителя, однако сложность схемы преобразователя при этом возрастает, а коэффициент мощности эквивалентной нагрузки синхронного генератора существенно понижается.

СПЧ с регулированием выходного напряжения инвертором отличаются высоким быстродействием, и коэффициент мощности генератора при этом не снижается, но схема инвертора при этом значительно усложняется. Применение того или иного способа регулирования напряжения, а в некоторых случаях — комбинации этих способов, осуществляется исходя из требований к источнику электропитания и от условий его работы.

Для получения в автономных источниках с СПЧ кривой выходного напряжения, достаточно близкой к синусоидальной, применяются фильтры или специальные схемы инверторов с широтно-импульсной модуляцией, со ступенчатым способом формирования кривой выходного напряжения.

В качестве генератора в подобных энергетических установках чаще всего используется асинхронный генератор. При этом включением в схему автономного источника электропитания тиристорного источника реактивной мощности (ТИРМ) реализуется совмещение функций самовозбуждения и регулирования напряжения генератора с его выпрямлением. Структурная схема такой установки показана на рис. 1.5.

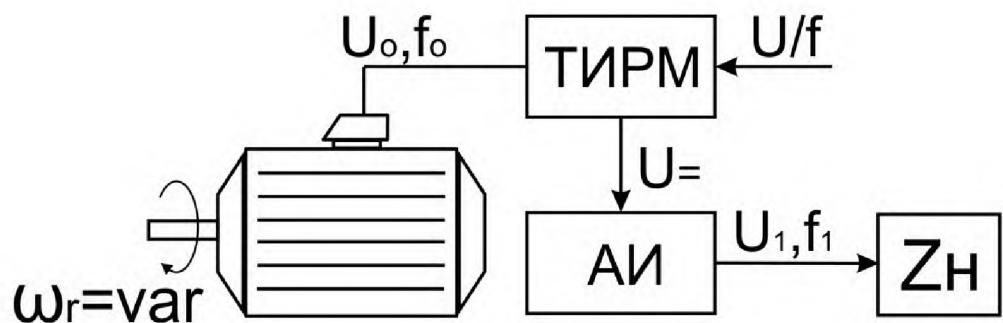


Рис. 1.5. Автономный источник переменного тока типа АГ-ТИРМ-АИ.

Выходное напряжение асинхронного генератора (АГ) регулируется воздействием на частоту ТИРМ, подключенного к статору АГ. Переменный ток выходной частоты формируется автономным инвертором (АИ), преобразующим электрическую энергию постоянного тока на выходе ТИРМ.

Возможность выпрямления и регулирования напряжения АГ с помощью одного устройства (ТИРМ) является достоинством этой схемы.

В то же время автономным источникам со звеном постоянного тока присущи и недостатки:

- двойное преобразование электрической энергии снижает КПД всей системы и ухудшает массогабаритные показатели;
- при повышении требований к качеству выходного напряжения и существующих ограничениях по массе и габаритам происходит усложнение

схемы;

- сбалансированный обмен реактивной энергией между источником и нагрузкой осуществляется только при принятии специальных мер.

В автономном источнике переменного тока стабильной частоты на базе НПЧ с естественной коммутацией генератором повышенной частоты питаются два встречно параллельных выпрямительно-инверторных моста, работающих поочередно в соответствии с сигналами блока управления [14, 15]. Плавным периодическим законом (синусоидальным, треугольным и др.) изменения углов управления вентилями мостов форма выходного напряжения приближается к синусоидальной. Достоинствами такой схемы являются:

- естественная коммутация вентиляй НПЧ;
- увеличение КПД источника по сравнению с СПЧ со звеном постоянного тока за счет однократного преобразования мощности генератора;
- возможность двустороннего обмена реактивной мощностью между генератором и нагрузкой;
- улучшение массогабаритных показателей НПЧ в связи с отсутствием в его составе компенсирующих емкостей.

Существенными недостатками НПЧ с естественной коммутацией являются: ухудшение использования мощности генератора за счет переменного угла управления вентилями, и необходимость повышения частоты на выходе генератора в несколько раз для получения хорошей формы выходного напряжения и тока.

Введением искусственной коммутации в НПЧ расширяется диапазон выходных частот и получается частота выходного напряжения не только ниже, но и выше частоты синхронного генератора, что особенно важно при низких частотах вращения вала генератора. Кроме того за счет принудительного выключения тиристоров значительно повышается коэффициент мощности НПЧ.

Устройства на базе высокочастотного генератора и НПЧ с искусственной коммутацией используются для создания специализированных источников небольшой мощности для привода двигателей, питания приборов и других

нагрузок, требующих переменный ток с достаточно высоким уровнем стабилизации напряжения и частоты.

Недостатком преобразователей частоты с непосредственной связью является необходимость повышать частоту напряжения генератора в 4—5 раз выше выходной. Это можно осуществить либо повышением частоты вращения генератора, либо увеличением полюсности генератора. Необходимость в повышенной частоте напряжения генератора по сравнению с выходной определяет область применения машинно-вентильных источников электропитания с НПЧ для создания неразветвленных систем электроснабжения, в которых вся генерируемая электроэнергия преобразуется в переменный ток постоянной частоты и напряжения.

В последние годы для разработки и создания генераторов используется перспективный метод получения стабильной частоты на основе электромашинного формирования кривой выходного напряжения [16-35].

1.2. Трехфазные автономные источники с электромашинным формированием кривой выходного напряжения

Трехфазные автономные источники переменного тока стабильной частоты на основе электромашинного генератора по принципу формирования кривой выходного напряжения подразделяются на три группы:

1. источники с пульсирующим магнитным потоком электромашинного генератора;
2. источники с формированием напряжения электромашинного генератора сложением ЭДС близких частот;
3. источники на базе совмещенного двухмашинного генератора

Периодические изменения магнитодвижущей силы обмотки возбуждения или изменения магнитной проводимости магнитопровода генератора вызывают в электромашинном генераторе изменения магнитного потока. Для получения пульсаций магнитодвижущей силы в синхронном генераторе обмотки индуктора

питаются постоянным и переменным током или синусоидальным [20,23]. В случае питания обмотки возбуждения синхронного генератора синусоидальным током, в его якорной обмотке наводится электродвижущая сила

$$e = 2E_m \sin(\omega_r t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (1.1)$$

где f_0 – частота питающего синусоидального тока;

ω_r – угловая скорость вращения генератора.

В описываемом случае происходит модуляция ЭДС вращения генератора частотой питания обмотки возбуждения. Как известно из электротехники, для качественного выделения огибающей модуляционного процесса необходимо превосходство несущей частоты над максимальной гармоникой модулирующего процесса в несколько раз. В рассматриваемом случае модулирующее колебание является процессом, состоящим из одной гармоники, что существенно упрощает расчеты. Для выделения огибающей модулированного колебания генератора с пульсирующим потоком индуктора (рисунок 1.6) используется силовой полупроводниковый коммутатор (СК), который выполняется по схеме НПЧ с прямоугольным законом модуляции угла управления тиристорами.

Как видно из графика (рис.1.6) гармонический состав напряжения на нагрузке U_h автономного источника с пульсирующим магнитным потоком при возбуждении синусоидальным током содержит дополнительные составляющие. Интенсивность этих составляющих уменьшается с ростом частоты вращения относительно частоты возбуждения. Таким образом, применение генераторов переменного тока с пульсирующим магнитным потоком целесообразно при большом отношении частот вращения и возбуждения ($K \geq 10$) [22,36]. По причине значительных потерь в цепи возбуждения, такие источники имеют низкие энергетические показатели.

Энергетические показатели источника с пульсирующим магнитным потоком при возбуждении генератора постоянным и переменным током (рис. 1.7) улучшаются. В этом случае обмоткой индуктора создается магнитный поток с

постоянной составляющей, в результате действия которого при вращении ротора с угловой скоростью ω_r , в якорной обмотке возбуждается ЭДС:

$$e = E_{1m} [1 + a \cdot \sin(2\pi f_0 t)] \sin \omega_r t, \quad (1.2)$$

где a – глубина амплитудной модуляции напряжения генератора.

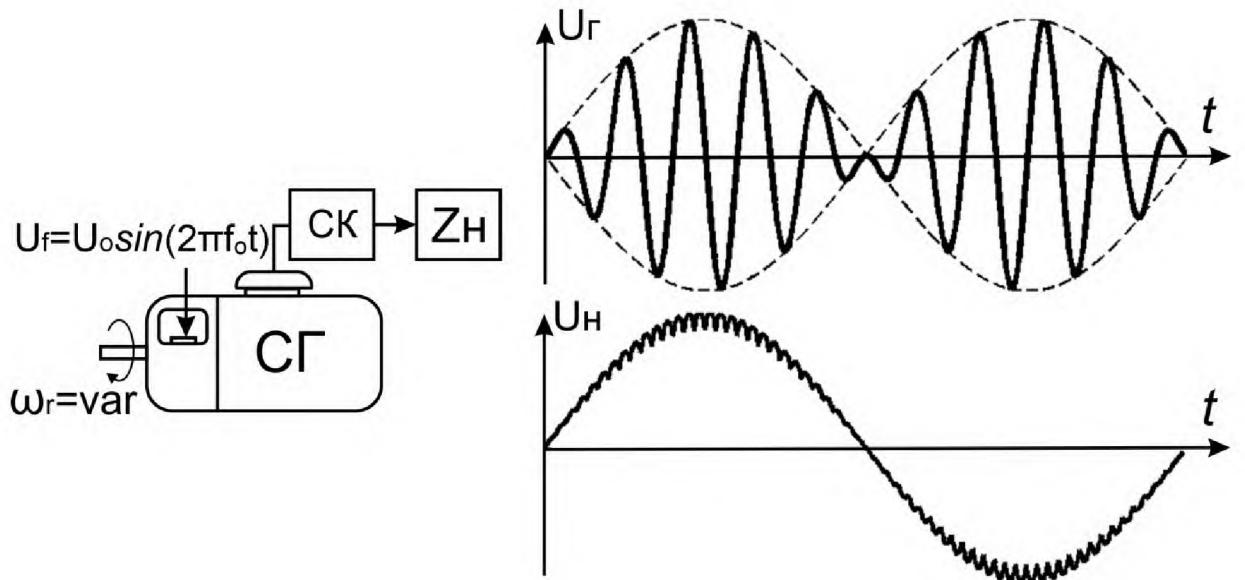


Рис. 1.6. Принцип работы автономного источника с пульсирующим магнитным потоком индуктора при возбуждении синусоидальным током

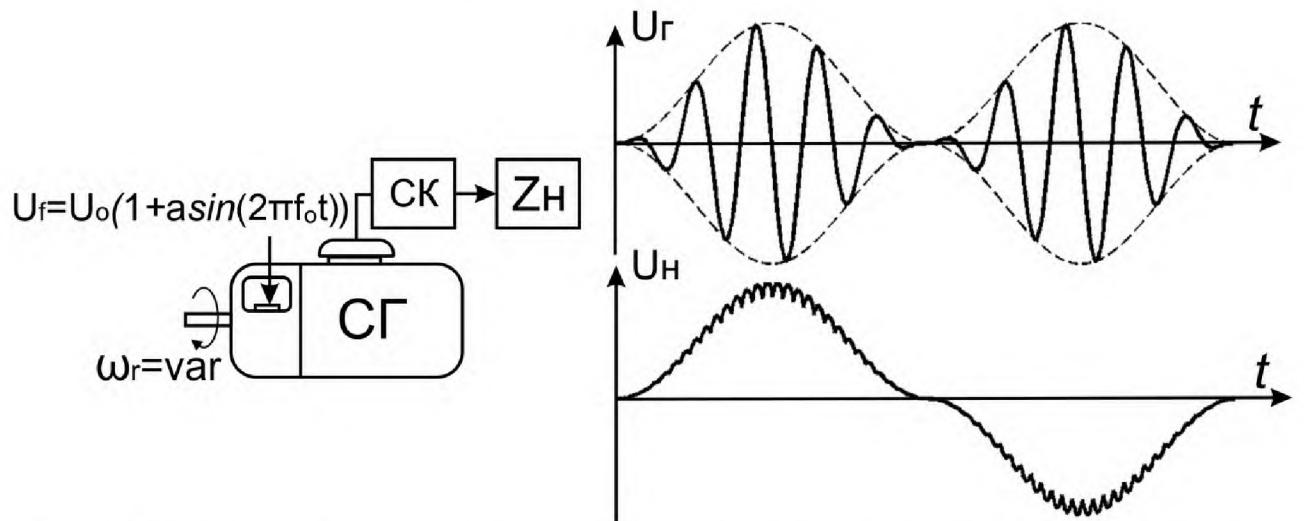


Рис. 1.7. Принцип работы автономного источника с пульсирующим магнитным потоком индуктора при возбуждении переменным и постоянным током.

Регулировка глубины модуляции при возбуждении генератора постоянным и переменным током ухудшает гармонический состав напряжения на нагрузке.

Сравнительный анализ графиков напряжений на рисунках (1.6) и (1.7) показывает, что гармоники во втором случае оказывают существенное влияние на форму напряжения на нагрузке.

Следующим вариантом реализации автономного источника с пульсирующим магнитным потоком является источник на основе синхронного генератора с подмагничивающей обмоткой (рисунок 1.8), в котором кривая выходного напряжения генератора формируется изменением магнитной проводимости магнитопровода [36].

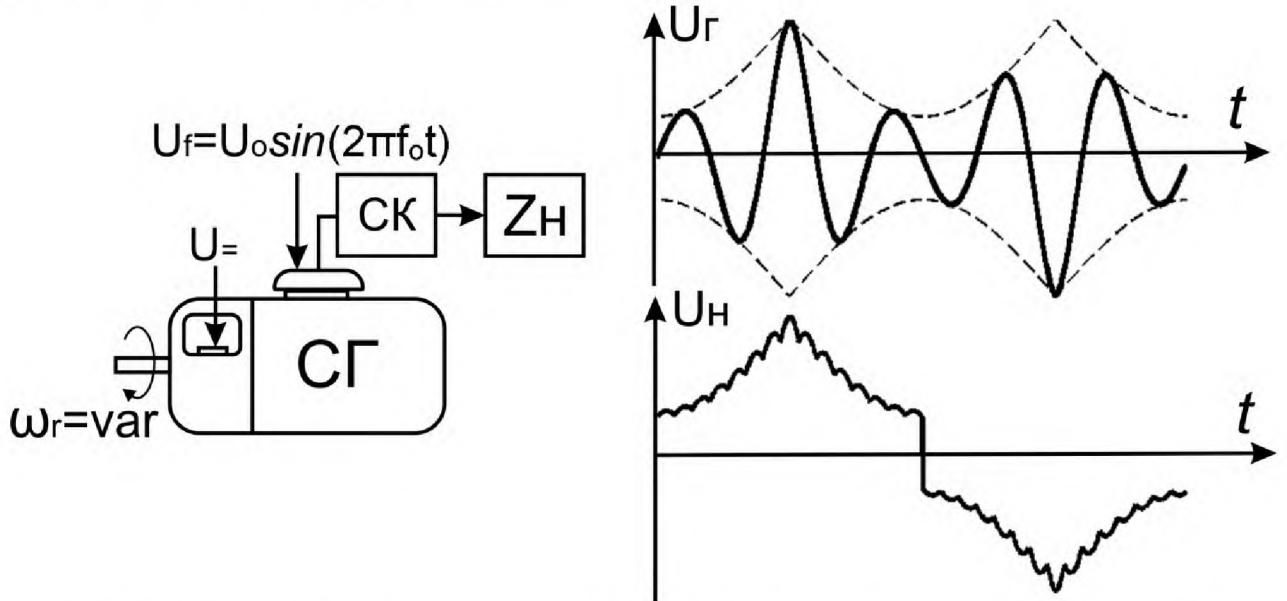


Рис. 1.8. Принцип работы автономного источника на основе синхронного генератора с подмагничивающей обмоткой.

Изменение магнитной проводимости магнитопровода осуществляется с помощью расположенной на статоре генератора подмагничивающей обмотки синхронного генератора. Частота ЭДС якоря определяется количеством его полюсов и частотой вращения индуктора генератора. Питание подмагничивающей обмотки осуществляется от источника переменного тока постоянной частоты. Подмагничивающей обмоткой создается магнитный поток Φ_{Π} , действием которого вызывается изменение магнитной проводимости статора с заданной частотой. Периодическими изменениями магнитной проводимости статора осуществляется модуляция основного магнитного потока. Таким образом, основной магнитный поток и амплитуда ЭДС якорной обмотки генератора

изменяются с частотой тока подмагничивающей обмотки. Существенным недостатком такого способа модуляции магнитного потока являются значительные потери в магнитопроводе.

В результате проведенного анализа автономных источников переменного тока с пульсирующим магнитным потоком генератора выявлены их низкие энергетические характеристики.

Получение стабильной частоты в автономных источниках с формированием напряжения электромашинного генератора сложением ЭДС близких частот основывается на образовании биений постоянной частоты на выходе генератора с последующим выделением огибающей. Принцип действия одного из вариантов источника переменного тока с формированием кривой выходного напряжения путем сложения ЭДС близких частот в электромашинном генераторе поясняется на рис. 1.9.

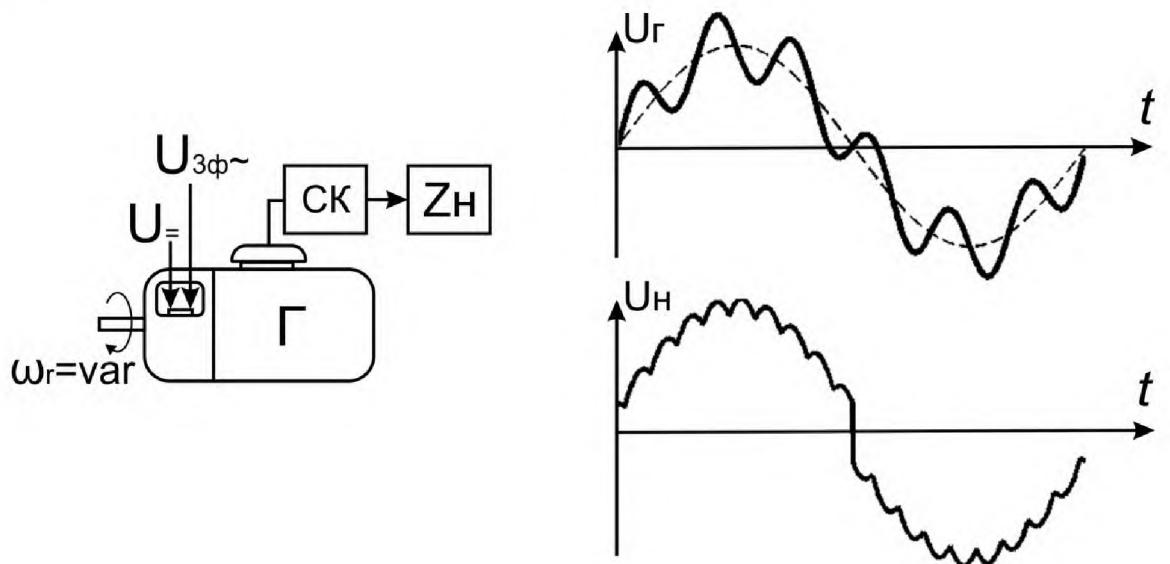


Рис. 1.9. Принцип работы автономного источника переменного тока с формированием кривой выходного напряжения путем сложения ЭДС близких частот.

Для образования ЭДС близких частот в машине создаются два магнитных потока. Первый – неподвижный относительно индуктора. Угловая скорость его вращения относительно статора ω_1 определяется количеством полюсов машины и частотой вращения вала. Второй магнитный поток создается трехфазной обмоткой возбуждения питаемой переменным током с частотой f_0 . В якорной

обмотке от каждого магнитного потока наводятся ЭДС с частотами $\frac{\omega_1}{2\pi}$ и $\frac{\omega_1}{2\pi} + f_0$ соответственно. При выполнении условия равенства амплитуд этих ЭДС ($E_{1m} = E_{2m} = E_m$), результирующая ЭДС якоря генератора записывается в виде:

$$e = E_{1m} \sin \omega_1 t + E_{2m} \sin(\omega_1 + 2\pi f_0) t = 2E_m \sin([\omega_1 + \pi f_0]t) \cos \pi f_0 t \quad (1.3)$$

Сравнивая полученное выражение с (1.1) можно подчеркнуть схожесть полученных выражений, но в (1.3) частота изменения амплитуды ЭДС на выходе генератора оказывается в два раза меньше частоты тока возбуждения. Напряжение практически синусоидальной формы на нагрузке получается при выделении с помощью силового коммутатора огибающей модулированного напряжения.

Возможность регулирования глубины модуляции напряжения в широких пределах является достоинством данной схемы – получаются хорошие энергетические показатели источника при высоком качестве формы выходного напряжения. Наличие индуктивной связи между обмотками возбуждения приводит к возрастанию потерь в цепи индуктора и является недостатком этой схемы.

Следующий вариант построения автономного источника, формирующего кривую выходного напряжения сложением ЭДС близких частот (рис. 1.10), состоит из асинхронного возбудителя (АВ) и синхронного генератора (СГ), выполненных в одном корпусе. Обмотки электрических машин этого источника выполняются с различным числом пар полюсов. С помощью этого обеспечивается независимость частоты огибающей выходного напряжения от частоты вращения вала.

К обмотке ротора асинхронного возбудителя через выпрямитель подключается обмотка возбуждения синхронного генератора. Статорная обмотка синхронного генератора подключается к силовому коммутатору, а статорная обмотка АВ – к фазосдвигающему устройству. Трехфазная дополнительная обмотка укладывается на роторе синхронного генератора и подключается к роторной обмотке АВ. Три однофазных обмотки с полным шагом, разнесенные в

пространстве на угол $2\pi/3$ электрических градусов являются выходной обмоткой синхронного генератора.

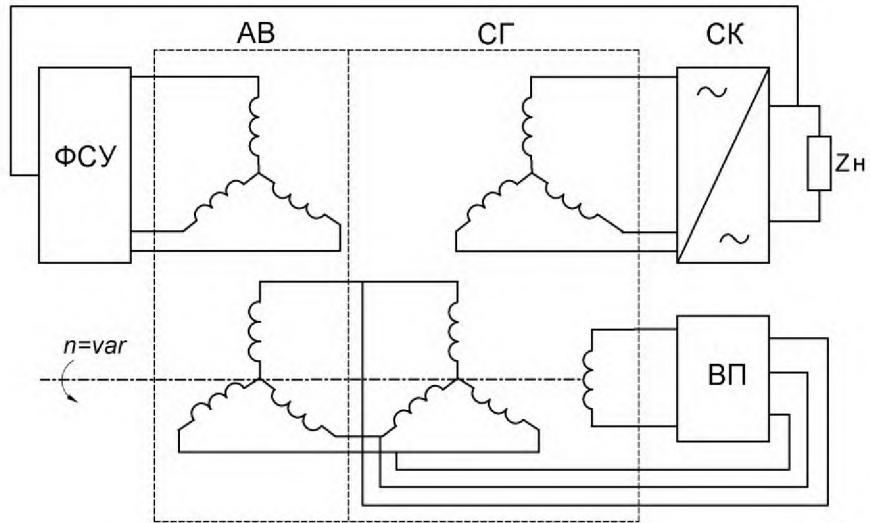


Рис.1.10. Принцип работы автономного источника переменного тока с электромашинным генератором, на основе синхронного генератора и асинхронного возбудителя.

Работа источника осуществляется следующим образом. Статорная обмотка АВ питается трехфазной системой переменных токов с частотой f_0 . При вращении ротора с угловой частотой n в обмотке ротора асинхронного возбудителя индуцируется ЭДС с частотой

$$f_2 = \frac{n}{60} p_1 + f_0.$$

Токи, вызванные этой ЭДС, питают дополнительную трехфазную обмотку ротора синхронного генератора. От обмотки возбуждения постоянного тока и от дополнительной трехфазной обмотки в якорной обмотке синхронного генератора индуцируются ЭДС с частотами $\frac{n}{60} p_2$ и $(\frac{n}{60}(p_1 + p_3) + f_0)$ соответственно.

Таким образом, результирующая ЭДС на входе силового коммутатора:

$$\begin{aligned} e &= E_{1m} \sin\left(\frac{n}{60} p_2 t\right) + E_{2m} \sin\left[\left(\frac{n}{60}(p_1 + p_3) + \omega_0\right)t\right] = \\ &= 2E_m \sin\left[\frac{1}{2}\left(\frac{n}{60}(p_1 + p_2 + p_3) + \omega_0\right)t\right] \cos\left(\frac{\omega_0}{2}t\right), \end{aligned}$$

где P_1 - число пар полюсов обмоток асинхронного возбудителя;

P_2 - число пар полюсов обмоток синхронного генератора;

P_3 - число пар полюсов дополнительной обмотки синхронного генератора;

ω_1 - угловая частота вращения ротора;

ω_0 - угловая частота токов статора АВ.

Электродвижущими силами, индуцированными в разнесенных в пространстве на угол $2\pi/3$ электрических градусов выходных однофазных обмотках синхронного генератора, образуется трехфазная система модулированных напряжений. С помощью СК выделяется огибающая, и получается однофазное напряжение близкое к синусоидальному. Выходное напряжение не зависит от изменения частоты вращения вала генератора, а частота его равна половине частоты переменного тока возбуждения АВ. Процесс формирования выходного напряжения автономного источника из ЭДС синхронного генератора поясняется на рис. 1.11.

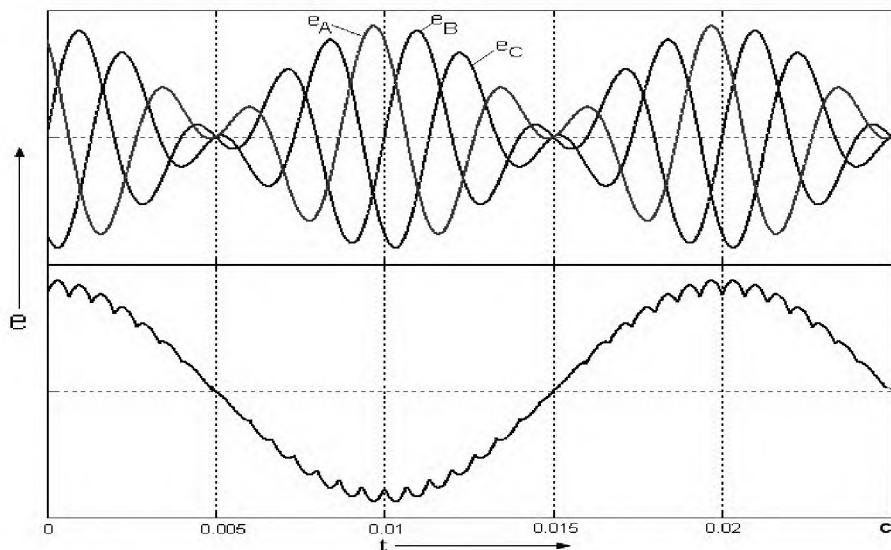


Рис.1.11. ЭДС якорных обмоток генератора и огибающая выходного напряжения.

Отсутствие скользящих контактов и повышение за счет этого надежности системы является достоинством устройства.

Условия возбуждения генератора обеспечиваются введением дополнительных элементов в цепи обратной связи. Стабилизация амплитуды и

частоты выходного напряжения осуществляется по двум каналам: цепи вентильного преобразователя и регулирования возбуждения. Хорошие энергетические показатели источника при высоком качестве формы выходного напряжения достигаются регулированием глубины модуляции напряжения в широких пределах.

Сложность конструкции электромашинного генератора, большие ЭДС в обмотке постоянного тока, усложнение схемы при установке на ротор управляемых вентилей являются недостатками автономной системы на основе синхронного генератора и асинхронного возбудителя.

Следующая разновидность автономного источника (рис. 1.12), формирующего кривую выходного напряжения сложением ЭДС близких частот, представляет собой источник, выполненный на базе генератора состоящего из двух электрических машин переменного тока с последовательно соединенными статорными обмотками [25,37-39,40]. Источник состоит из двух асинхронных машин с фазным ротором. Обмотки ротора соединяются между собой таким образом, что образуемые ими поля врачаются в противоположные стороны. ЭДС на входе силового коммутатора описывается уравнением (1.1), а частота огибающей равняется частоте переменного тока возбуждения.

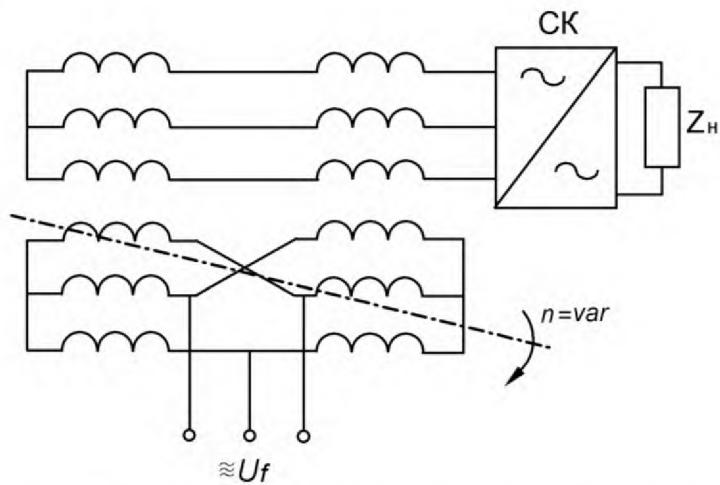


Рис.1.12. Автономный источник с электромашинным генератором, на основе двух асинхронных машин.

При реализации трехфазного автономного источника, использующего для стабилизации выходной частоты сложение ЭДС близких частот и образование

огибающей выходного напряжения в виде биений с частотой, кратной частоте возбуждения, была предложена следующая схема построения устройства [40-42].

Автономный источник состоит из двух асинхронных машин (рис.1.13), установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе. Роторные обмотки машин подключены к роторной обмотке асинхронного возбудителя (АВ) таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая - в режиме асинхронного генератора (АГ). Статорная обмотка ЭМТ выполнена в виде обычной трехфазной обмотки. На статоре АГ расположено три идентичных трехфазных обмотки, уложенных в одни и те же пазы. Выводы выходной обмотки ЭМТ подключены к нулевым точкам статорных обмоток АГ. Статорная обмотка АВ, установленного на одном валу с АГ и ЭМТ подключена к нагрузке через фазосдвигающее устройство (ФСУ).

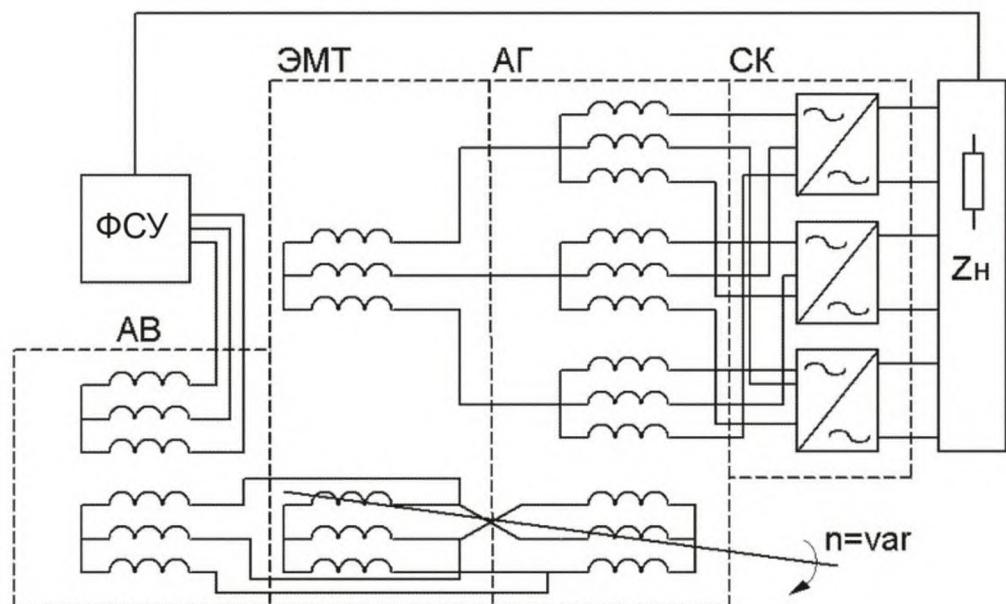


Рис. 1.13. Трехфазный автономный источник стабильной частоты на основе двух асинхронных машин с асинхронным возбудителем

Устройство работает следующим образом. При питании обмотки АВ от ФСУ переменным током стабильной частоты f_o , и вращении вала с угловой частотой n в роторной обмотке возбудителя наводится ЭДС, изменяющаяся с частотой

$$f_r = f_o - \frac{n}{60} \cdot p_1,$$

где p_1 - число пар полюсов обмотки возбудителя.

Нагрузкой для роторной обмотки возбудителя являются роторные обмотки ЭМТ и АГ. В статорных обмотках этих машин наводятся ЭДС с частотами

$$f_2 = \frac{n}{60} (p_2 - p_1) + f_o, \quad f_3 = \frac{n}{60} (p_3 + p_1) - f_o,$$

где p_2 и p_3 - число пар полюсов ЭМТ и АГ, соответственно.

Частота биений определяется следующим образом

$$f_b = f_2 - f_3 = \frac{n}{60} (2p_1 - p_2 + p_3) + 2f_o$$

При выполнении условия $2p_1 + p_3 = p_2$, частота биений равняется удвоенной частоте возбуждения [40, 41, 43].

Проведенный анализ технических решений автономных источников с модуляцией напряжения генератора показал, что имеется ряд недостатков, обусловленных сложностью конструкции электромашинного генератора и относительно невысокими энергетическими характеристиками. Кроме того, некоторые технические решения содержат щеточные узлы, что сказывается на показателях надежности в худшую сторону.

§1.3. Бесконтактные трехфазные автономные источники на базе совмещенного двухмашинного генератора

Характерные для источников, рассмотренных в предыдущем разделе, недостатки предлагается в большей их части устраниить изменением конструкции автономного источника. В предлагаемом автономном источнике переменного тока стабильной частоты предполагается использовать электромашинный принцип формирования кривой выходного напряжения. Основу этого источника будут составлять две симметричные асинхронные машины, совмещенные в общем магнитопроводе. Для обозначения подобного комплекса вводится термин совмещенный двухмашинный генератор (СДМГ). Предлагается следующий

состав структурных элементов источников на базе СДМГ (рис. 1.14): электромашинная часть (СДМГ), расположенный в одном корпусе, устройство возбуждения и датчик частоты вращения [44, 45].

Обмотки электрических машин должны различаться количеством пар полюсов (соответственно p_1 и p_2) и выполняться таким образом, чтобы взаимовлияние электрических машин было исключено. Роторные обмотки должны быть соединены последовательно. Стабильность частоты на выходе генератора будет обеспечиваться подстройкой частоты напряжения на выходе устройства возбуждения при изменении частоты вращения вала приводного двигателя [45].

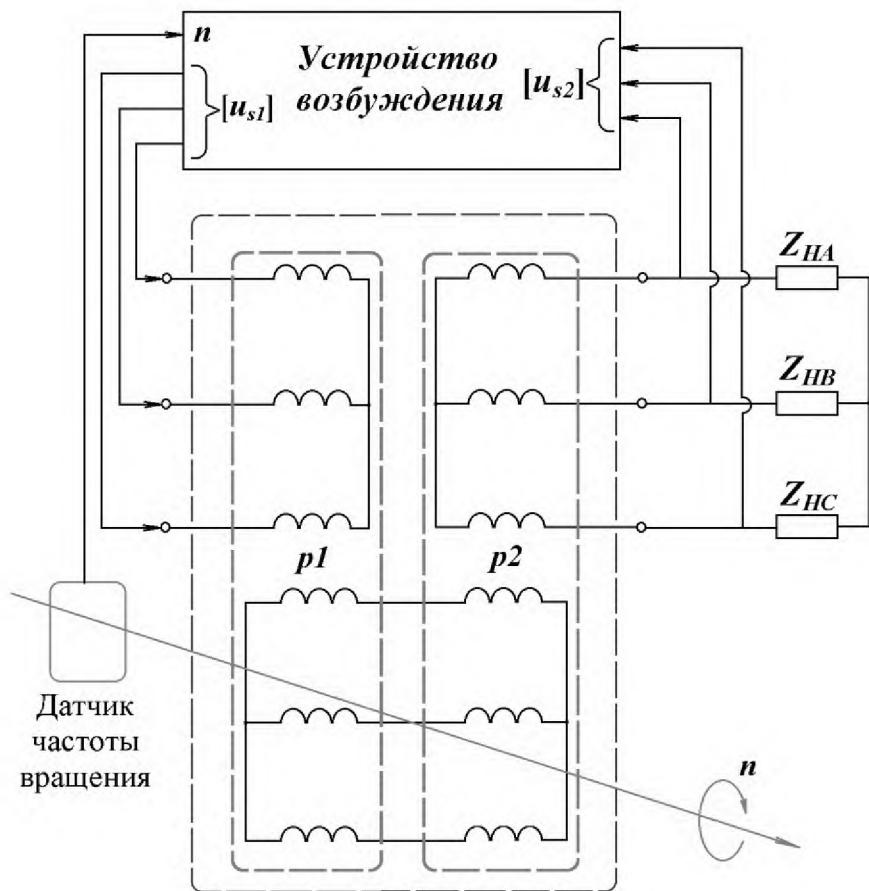


Рис. 1.14. Схема автономного источника на базе совмещенного двухмашинного генератора.

При таком построении автономного источника частота напряжения выходной обмотки f_2 находится в зависимости от частоты вращения вала n , и частоты напряжения возбуждения f_o . Формула частоты напряжений и токов

выходной обмотки определяется схемой соединения роторных обмоток машин между собой, а также направлением вращения ротора относительно магнитного поля обмотки возбуждения.

При неизменной нагрузке на выходе генератора при соответствующей подстройке частоты и амплитуды напряжения первой машины действующее напряжение на нагрузке и его частота будут оставаться постоянными. При вариациях нагрузки генератора компенсация изменения напряжения на его выходе должна осуществляться коррекцией напряжения питания обмотки возбуждения. Таким образом, при помощи источника на базе совмещенного двухмашинного генератора будет решаться задача получения напряжения стабильной частоты автономно от централизованных сетей электроснабжения при вращении устройства от приводного двигателя с широкими диапазонами частот вращения вала.

Достоинствами автономного источника на базе СДМГ при такой конструкции являются:

- отсутствие каких-либо дополнительных устройств между генератором и нагрузкой;
- возможность изменения частоты и амплитуды выходного напряжения в широких пределах;
- простота конструкции, отсутствие скользящих контактов на роторе.

ВЫВОДЫ:

1. Поддержание стабильной частоты выходного напряжения при переменной частоте вращения ротора на выходе асинхронных генераторов обеспечивается установкой преобразователей частоты, либо автономных инверторов. Схемы с преобразователем частоты сложны и требуют повышенной в несколько раз частоты на выходе электрической машины для выполнения требований к качеству выходного напряжения. В асинхронных генераторах с автономным инвертором происходит двойное преобразование энергии, а при повышении требований к качеству выходного напряжения происходит существенное усложнение схемы.

2. Стабильная частота на выходе синхронных генераторов обеспечивается либо поддержанием постоянной частоты вращения вала, либо установкой на выходе электрической машины СПЧ или автономного инвертора, что усложняет схему и затрудняет обмен реактивной мощностью между источником и нагрузкой.

3. Источники с электромашинным формированием кривой выходного напряжения частично решают указанные недостатки, но значительно сложнее обычных генераторов и требуют на выходе электрической машины использование преобразователя частоты, широкого распространения не нашли.

4. Устранение недостатков, выявленных при анализе основных схем построения автономных источников, возможно применением новой схемы их построения. Для этого предлагается автономный источник на базе СДМГ отличающегося простотой конструкции, являющегося бесконтактным, позволяющего регулировать частоту и величину выходного напряжения. Для оценки возможности использования подобных источников, необходимо получение информации по режимам и особенностям их работы, энергетическим соотношениям в элементах генератора, области их применения, особенностям их расчета. В связи с изложенными выше доводами исследование автономного источника переменного тока, построенного на основе совмещенного электромашинного генератора, является актуальной задачей.

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОВМЕЩЕННОМ ДВУХМАШИННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

2.1. Обобщенная математическая модель трехфазной электрической машины в фазных координатах

Широко распространенной и общепризнанной в настоящее время является математическая модель электрической машины в фазных осях. Как характерно для любой математической модели, при ее построении принимаются следующие допущения [46-52]:

- 1) для изготовления магнитопроводов используются тонкие листы высококачественной электротехнической стали, потери на гистерезис и вихревые токи оказываются небольшими и не учитываются;
- 2) магнитная система не насыщена;
- 3) электрическая машина имеет равномерный воздушный зазор;
- 4) фазы обмотки статора и ротора являются симметричными;
- 5) распределение магнитного потока в воздушном зазоре – синусоидальное.

На основании второго закона Кирхгофа с учетом уравнения Maxwella исходная система дифференциальных уравнений трехфазной электрической машины записывается в векторно-матричной форме [48, 52-54]:

$$[u] = [R][i] + \frac{d}{dt}[\Psi], \quad (2.1)$$

где $[u]$, $[i]$, $[\Psi]$ – матрицы-столбцы напряжений, токов и потокосцеплений соответственно, $[R]$ – диагональная матрица сопротивлений:

$$[u] = \begin{bmatrix} [u_s] \\ [u_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}, \quad [i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix},$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s[1] & [0] \\ [0] & R_r[1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_s & & & \\ & & R_s & & \\ & & & R_r & \\ & & & & R_r \\ & & & & & R_r \end{bmatrix}, \quad [\Psi] = \begin{bmatrix} [\Psi_s] \\ [\Psi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \\ \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix}$$

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ – напряжения и токи фаз статора; R_s, R_r – сопротивления фазы статора и ротора соответственно; $u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ – напряжения и токи фаз ротора; $\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}, \Psi_{ra}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}$ – потокосцепления с магнитным потоком фаз статора и ротора соответственно.

Согласно теории электромеханического преобразования энергии в магнитных системах электромагнитные процессы происходят из-за изменения токов в возбуждающих контурах и пространственных координат, характеризующих относительное положение контуров в системе. Об изменении энергии магнитного поля при перемещении выделенного объема можно судить с помощью математической модели магнитной системы, описанной уравнениями Максвелла, в которой воспроизводится только пространственное распределение магнитного поля при неизменных токах в контурах системы. Изменения же энергии магнитного поля при приращениях токов в контурах можно вычислить с помощью макромодели магнитного поля нелинейной системы, в которой поток, сцепленный с контуром, может

быть представлен, как сумма потоков, образованных отдельно током каждого контура системы. Приращение потока контура можно представить как сумму приращений потока, обусловленного изменением тока контура при сохранении постоянным значений токов других контуров, и потока, характеризующего изменение токов других контуров при неподвижной системе (трансформаторная составляющая суммарного потока) [54-56].

В связи с этим изменение потокосцепления фазных обмоток представляется суммой трансформаторной составляющей с составляющей, связанной с перемещением обмоток ротора относительно обмоток статора:

$$\frac{d}{dt}[\Psi] = [L] \left(\frac{d[i]}{dt} \right) + \frac{d\Theta}{dt} \left(\frac{d[L]}{d\Theta} \right) [i], \quad (2.2)$$

где θ – электрический угол поворота ротора:

$$\theta = \theta_0 + p \int_0^t \omega(t) dt,$$

θ_0 – начальный угол между осями обмоток, для упрощения выражений при расчетах принимается равным нулю,

p – количество пар полюсов электрической машины,

$\omega(t)$ – функция угловой скорости ротора от времени, при $\omega(t)=\omega$:

$$\theta = \theta_0 + p\omega t, \quad (2.3)$$

$[L]$ – матрица индуктивностей:

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s + M_s & -0,5M_s & -0,5M_s \\ -0,5M_s & l_s + M_s & -0,5M_s \\ -0,5M_s & -0,5M_s & l_s + M_s \end{bmatrix}, \quad [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sara} & M_{sarb} & M_{sarc} \\ M_{sbra} & M_{srb} & M_{src} \\ M_{scra} & M_{scr} & M_{src} \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r + M_r & -0,5M_r & -0,5M_r \\ -0,5M_r & l_r + M_r & -0,5M_r \\ -0,5M_r & -0,5M_r & l_r + M_r \end{bmatrix}, \quad [M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{rasa} & M_{rasb} & M_{rasc} \\ M_{rbsa} & M_{rbsb} & M_{rbsc} \\ M_{rcsa} & M_{rcsb} & M_{rcsc} \end{bmatrix}$$

l_s, l_r – собственные индуктивности фазы статора и фазы ротора соответственно; M_s, M_r – взаимоиндуктивности между фазами статора и ротора соответственно; $M_{sara}, M_{sarb}, M_{sarc}$ – взаимоиндуктивности фазы А статора с фазами А, В, С ротора соответственно (для других фаз статора – аналогично); $M_{rasa}, M_{rasc}, M_{rasc}$ – взаимоиндуктивности фазы А ротора с фазами А, В, С статора соответственно (для других фаз ротора – аналогично).

Выражения для взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора [55] приводятся в табл. 2.1.

Далее рассматривается случай расположения фазных обмоток электрической машины в порядке чередования фаз А, В, С в направлении вращения ротора.

С учетом выражений для взаимных индуктивностей (табл. 1) матрицы взаимоиндуктивностей представляются в виде:

$$[M_{sr}] = M[C_1], \quad [M_{rs}] = M[C_2], \quad (2.5)$$

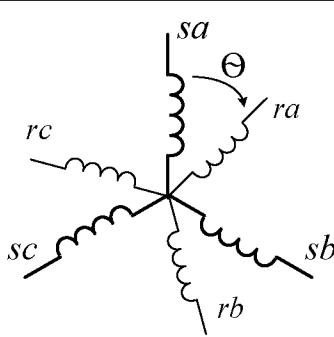
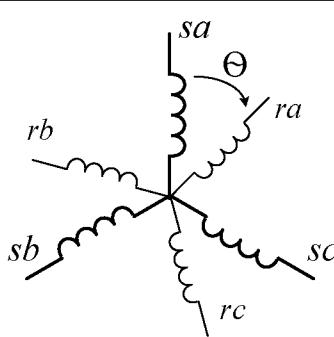
где

$$[C_1] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \Delta) & \cos(\theta - \Delta) \\ \cos(\theta - \Delta) & \cos\theta & \cos(\theta + \Delta) \\ \cos(\theta + \Delta) & \cos(\theta - \Delta) & \cos\theta \end{bmatrix},$$

$$[C_2] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \Delta) & \cos(\theta + \Delta) \\ \cos(\theta + \Delta) & \cos\theta & \cos(\theta - \Delta) \\ \cos(\theta - \Delta) & \cos(\theta + \Delta) & \cos\theta \end{bmatrix},$$

Δ - электрический угол между осями фаз обмотки.

Табл. 2.1 Взаимные индуктивности обмоток статора и ротора.

Взаимоиндуктивности между статором и ротором	Порядок чередования фаз электрической машины относительно направления вращения	
	согласно	встречно
		
$M_{sara}, M_{rasa}, M_{srb}, M_{rbsb}, M_{scrc}, M_{rcsc}$	$M \cos\theta$	$M \cos\theta$
$M_{sar}, M_{rbs}, M_{srb}, M_{rcs}, M_{scr}, M_{rsc}$	$M \cos(\theta + \Delta)$	$M \cos(\theta - \Delta)$
$M_{sarc}, M_{rcsa}, M_{sbra}, M_{rasb}, M_{scr}, M_{rbcs}$	$M \cos(\theta - \Delta)$	$M \cos(\theta + \Delta)$

Для определения второго слагаемого в выражении (2.2) вычисляется производная матрицы индуктивностей по угловым координатам:

$$\frac{d[L]}{d\Theta} = \frac{d}{d\Theta} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [M'_{sr}] \\ [M'_{rs}] & [0] \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

где матрицы M'_{sr}, M'_{rs} :

$$[M'_{sr}] = -M[C'_1], \quad [M'_{rs}] = -M[C'_2], \quad (2.7)$$

где

$$[C'_1] = \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta + \Delta) & \sin(\theta - \Delta) \\ \sin(\theta - \Delta) & \sin\theta & \sin(\theta + \Delta) \\ \sin(\theta + \Delta) & \sin(\theta - \Delta) & \sin\theta \end{bmatrix},$$

$$[C'_2] = \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \Delta) & \sin(\theta + \Delta) \\ \sin(\theta + \Delta) & \sin\theta & \sin(\theta - \Delta) \\ \sin(\theta - \Delta) & \sin(\theta + \Delta) & \sin\theta \end{bmatrix}.$$

Подстановкой выражений (2.3) – (2.7) в (2.2) для электрической машины получается система дифференциальных уравнений в матричном виде:

$$[u] = \begin{bmatrix} [L_s] & M[C_1] \\ M[C_2] & [L_r] \end{bmatrix} \left(\frac{d[i]}{dt} \right) + \begin{bmatrix} [R_s] & -p\omega M[C'_1] \\ -p\omega M[C'_2] & [R_r] \end{bmatrix} [i]. \quad (2.8)$$

В целях решения этой системы дифференциальных уравнений, она приводится к нормальному виду Коши. Для этого для матрицы $[L]$ перед производными токов находится обратная $[L^{-1}]$, и система (2.8) преобразуется:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1}[u] + [L]^{-1} \begin{bmatrix} -[R_s] & p\omega M[C'_1] \\ p\omega M[C'_2] & -[R_r] \end{bmatrix} [i]. \quad (2.8)$$

Мгновенный электромагнитный момент рассчитывается по формуле [53, 54]:

$$m(t) = -pM \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}_T \begin{bmatrix} [0] & [C'_1] \\ [C'_2] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Выражение, описывающее движение ротора:

$$J \frac{d\omega}{dt} - M_c = m(t), \quad (2.10)$$

где J – момент инерции ротора.

Для случая расположения фазных обмоток электрической машины в

порядке чередования фаз А, В, С в направлении противоположном вращению ротора, выражения (2.5) – (2.9) преобразуются:

$$[M_{sr}] = M[C_2], \quad [M_{rs}] = M[C_1], \quad (2.11)$$

$$[M']_{sr} = -M[C'_2], \quad [M']_{rs} = -M[C'_1], \quad (2.12)$$

$$[u] = \begin{bmatrix} [L_s] & M[C_2] \\ M[C_1] & [L_r] \end{bmatrix} \left(\frac{d[i]}{dt} \right) + \begin{bmatrix} [R_s] & -p\omega M[C'_2] \\ -p\omega M[C'_1] & [R_r] \end{bmatrix} [i], \quad (2.13)$$

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1}[u] + [L]^{-1} \begin{bmatrix} -[R_s] & p\omega M[C'_2] \\ p\omega M[C'_1] & -[R_r] \end{bmatrix} [i], \quad (2.14)$$

$$m(t) = -pM \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}_T \begin{bmatrix} [0] & [C'_2] \\ [C'_1] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Выражения (2.8) и (2.10), а также (2.14) и (2.15) представляют собой математическую модель трехфазной электрической машины в фазных координатах в матричном виде для случаев расположения фазных обмоток электрической машины в порядке чередования фаз А, В, С в направлении вращения ротора и ему противоположном, соответственно.

2.2. Обобщенная математическая модель совмещенного двухмашинного генератора

Для построения математической модели СДМГ за основу принимается математическая модель трехфазной электрической машины в фазных координатах. Определяется, что все роторные и статорные обмотки в СДМГ соединяются звездой. При создании математической модели СДМГ основываясь на математической модели трехфазной электрической машины, производятся преобразования. Учитывается, что на обмотку возбуждения подаются линейные напряжения; нагрузка в большинстве случаев имеет активно-индуктивный характер. Предполагается, что обмотки и нагрузка генератора являются симметричными. С учетом изложенных выше

соображений, для проведения расчетов СДМГ представляется в виде системы контуров, включающих в себя нагрузку генератора (рис. 2.1).

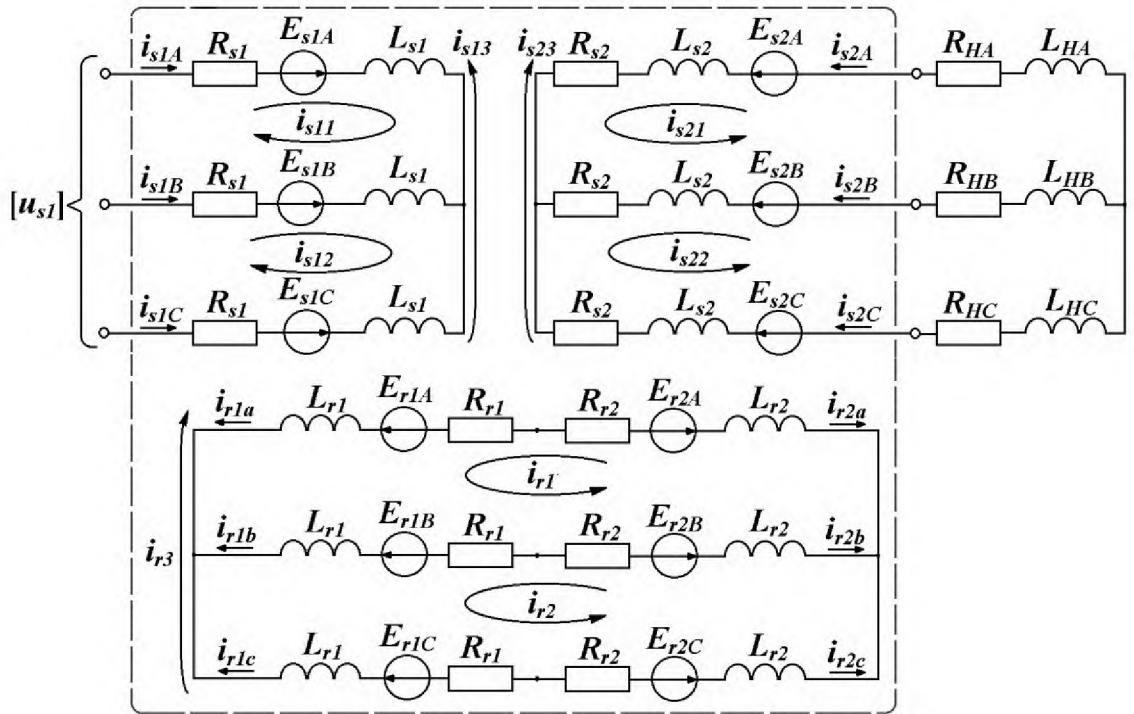


Рис.2.1. Схема электрических цепей совмещенного двухмашинного генератора

где $E_{njk} = \frac{d}{dt} \Psi_{njk}$ — ЭДС фазы; Ψ_{njk} — потокосцепление фазы; i_{njk} — ток фазы; i_{gm} — контурные (линейные) токи; R_{nj} — сопротивление фазы; L_{nj} — индуктивность фазы; R_{Hk}, L_{Hk} — параметры нагрузки; $n=s,r$; $j=1,2$; $k=A,B,C,a,b,c$; $g=1,2,3$; $m=1,2,3$.

На основании второго закона Кирхгофа с учетом уравнения Максвелла записывается система уравнений для статорной обмотки машины возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} u_{AB} &= R_{s1}(i_{s1A} - i_{s1B}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{s1A} - \Psi_{s1B}) \\ u_{BC} &= R_{s1}(i_{s1B} - i_{s1C}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{s1B} - \Psi_{s1C}) \\ u_{CA} &= R_{s1}(i_{s1C} - i_{s1A}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{s1C} - \Psi_{s1A}) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

где u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} — входные линейные напряжения; i_{s1A} , i_{s1B} , i_{s1C} — токи фаз; $\Psi_{s1A}, \Psi_{s1B}, \Psi_{s1C}$ — потокосцепления фаз; R_{s1} — сопротивление фазы симметричной обмотки.

Находятся выражения для потокосцеплений фаз статора первой машины:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{s1A} = & (1_{s1} + M_{s1})i_{s1A} - \frac{M_{s1}}{2}i_{s1B} - \frac{M_{s1}}{2}i_{s1C} + \\
 & + M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{rla} + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{AB}) i_{rlb} + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{AC}) i_{rlc} \\
 \Psi_{s1B} = & -\frac{M_{s1}}{2}i_{s1A} + (1_{s1} + M_{s1})i_{s1B} - \frac{M_{s1}}{2}i_{s1C} + \\
 & + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{BA}) i_{rla} + M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{rlb} + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{BC}) i_{rlc} \\
 \Psi_{s1C} = & -\frac{M_{s1}}{2}i_{s1A} - \frac{M_{s1}}{2}i_{s1B} + (1_{s1} + M_{s1})i_{s1C} + \\
 & + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{CA}) i_{rla} + M_{sr1} \cos(\theta_1 + \xi_{CB}) i_{rlb} + M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{rlc}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Вычисляются суммарные потокосцепления контуров статора с учетом выражений (2.17):

$$\begin{aligned}
 \Psi_{s11} = \Psi_{s1A} - \Psi_{s1B} = & \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1A} - \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1B} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{BA})] i_{rla} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{AB}) - \cos(\theta_1)] i_{rlb} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{AC}) - \cos(\theta_1 + \xi_{BC})] i_{rlc} \\
 \Psi_{s12} = \Psi_{s1B} - \Psi_{s1C} = & \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1B} - \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1C} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{BA}) - \cos(\theta_1 + \xi_{CA})] i_{rla} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{CB})] i_{rlb} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{BC}) - \cos(\theta_1)] i_{rlc} \\
 \Psi_{s13} = \Psi_{s1C} - \Psi_{s1A} = & \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1C} - \left(1_{s1} + \frac{3}{2}M_{s1}\right)i_{s1A} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{CA}) - \cos(\theta_1)] i_{rla} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \xi_{CB}) - \cos(\theta_1 + \xi_{AB})] i_{rlb} + \\
 & + M_{sr1} [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{AC})] i_{rlc}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Далее составляется система уравнений для контуров ротора, в которую включаются выражения роторных цепей обеих машин:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_{r1}(i_{rla} - i_{rlb}) - R_{r2}(i_{r2a} - i_{r2b}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{rla} - \Psi_{rlb} - \Psi_{r2a} + \Psi_{r2b}) \\ 0 &= R_{rl}(i_{rlb} - i_{rlc}) - R_{r2}(i_{r2b} - i_{r2c}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{rlb} - \Psi_{rlc} - \Psi_{r2b} + \Psi_{r2c}) \\ 0 &= R_{rl}(i_{rlc} - i_{rla}) - R_{r2}(i_{r2c} - i_{r2a}) + \frac{d}{dt}(\Psi_{rlc} - \Psi_{rla} - \Psi_{r2c} + \Psi_{r2a}) \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

где Ψ_{rla} , Ψ_{rlb} , Ψ_{rlc} , Ψ_{r2a} , Ψ_{r2b} , Ψ_{r2c} – потокосцепления; i_{rla} , i_{rlb} , i_{rlc} , i_{r2a} , i_{r2b} , i_{r2c} – токи; R_{rl} , R_{r2} – сопротивления фаз симметричной обмотки ротора.

Находятся выражения для потокосцеплений фаз ротора машины возбуждения:

$$\begin{aligned} \Psi_{rla} &= (l_{rl} + M_{rl})i_{rla} - \frac{M_{rl}}{2}i_{rlb} - \frac{M_{rl}}{2}i_{rlc} + \\ &+ M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s1A} + M_{rs1} \cos(0_1 + \xi_{lab}) i_{s1B} + M_{rs1} \cos(0_1 + \xi_{lac}) i_{s1C} \\ \Psi_{rlb} &= -\frac{M_{rl}}{2}i_{rla} + (l_{rl} + M_{rl})i_{rlb} - \frac{M_{rl}}{2}i_{rlc} + \\ &+ M_{rs1} \cos(\theta_1 + \xi_{lba}) i_{s1A} + M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s1B} + M_{rs1} \cos(\theta_1 + \xi_{lbc}) i_{s1C} \\ \Psi_{rlc} &= -\frac{M_{rl}}{2}i_{rla} - \frac{M_{rl}}{2}i_{rlb} + (l_{rl} + M_{rl})i_{rlc} + \\ &+ M_{rs1} \cos(\theta_1 + \xi_{lca}) i_{s1A} + M_{rs1} \cos(\theta_1 + \xi_{lcb}) i_{s1B} + M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s1C} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Далее представлены выражения для потокосцеплений фаз ротора выходной машины:

$$\begin{aligned} \Psi_{r2a} &= (l_{r2} + M_{r2})i_{r2a} - \frac{M_{r2}}{2}i_{r2b} - \frac{M_{r2}}{2}i_{r2c} + \\ &+ M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s2A} + M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2ab}) i_{s2B} + M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2ac}) i_{s2C} \\ \Psi_{r2b} &= -\frac{M_{r2}}{2}i_{r2a} + (l_{r2} + M_{r2})i_{r2b} - \frac{M_{r2}}{2}i_{r2c} + \\ &+ M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2ba}) i_{s2A} + M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s2B} + M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2bc}) i_{s2C} \\ \Psi_{r2c} &= -\frac{M_{r2}}{2}i_{r2a} - \frac{M_{r2}}{2}i_{r2b} + (l_{r2} + M_{r2})i_{r2c} + \\ &+ M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2ca}) i_{s2A} + M_{rs2} \cos(\theta_2 + \xi_{2cb}) i_{s2B} + M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s2C} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Учитывается, что фазные токи ротора второй машины являются роторными токами первой машины с обратным знаком:

$$i_{rla} = -i_{r2a}, \quad i_{rlb} = -i_{r2b}, \quad i_{rlc} = -i_{r2c}. \quad (2.22)$$

Для контуров ротора с учетом (2.20, 2.21) находятся выражения суммарных потокосцеплений:

$$\begin{aligned}
\Psi_{r1} &= \Psi_{r1a} - \Psi_{r1b} - \Psi_{r2a} + \Psi_{r2b} = \\
&= \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1a} - \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1b} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{1ba}) \} i_{s1A} + M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1ab}) - \cos(\theta_1) \} i_{s1B} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1ac}) - \cos(\theta_1 + \xi_{1bc}) \} i_{s1C} + \\
&+ M_{rs2} \{ \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2ba}) \} i_{s2A} + \\
&+ M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2ab}) - \cos(\theta_2) \} i_{s2B} + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2ac}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2bc}) \} i_{s2C} \\
\Psi_{r2} &= \Psi_{r1b} - \Psi_{r1c} - \Psi_{r2b} + \Psi_{r2c} = \\
&= \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1b} - \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1c} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1ba}) - \cos(\theta_1 + \xi_{1ca}) \} i_{s1A} + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2ba}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2ca}) \} i_{s2A} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{1cb}) \} i_{s1B} + \\
&+ M_{rs2} \{ \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2cb}) \} i_{s2B} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1bc}) - \cos(\theta_1) \} i_{s1C} + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2bc}) - \cos(\theta_2) \} i_{s2C} \\
\Psi_{r3} &= \Psi_{r1c} - \Psi_{r1a} - \Psi_{r2c} + \Psi_{r2a} = \\
&= \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1c} - \left(l_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + l_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) i_{r1a} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1ca}) - \cos(\theta_1) \} i_{s1A} + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2ca}) - \cos(\theta_2) \} i_{s2A} + \quad (2.23) \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \xi_{1cb}) - \cos(\theta_1 + \xi_{1ab}) \} i_{s1B} + \\
&+ M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \xi_{2cb}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2ab}) \} i_{s2B} + \\
&+ M_{rs1} \{ \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \xi_{1ac}) \} i_{s1C} + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2ac}) \} i_{s2C}
\end{aligned}$$

Составляется система уравнений для статора выходной машины (рис.2.1):

$$\left. \begin{aligned}
0 &= (R_{s2} + R_{HA}) i_{s2A} - (R_{s2} + R_{HB}) i_{s2B} + \frac{d}{dt} (\Psi_{s2A} - \Psi_{s2B}) \\
0 &= (R_{s2} + R_{HB}) i_{s2B} - (R_{s2} + R_{HC}) i_{s2C} + \frac{d}{dt} (\Psi_{s2B} - \Psi_{s2C}) \\
0 &= (R_{s2} + R_{HC}) i_{s2C} - (R_{s2} + R_{HA}) i_{s2A} + \frac{d}{dt} (\Psi_{s2C} - \Psi_{s2A})
\end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

где i_{s2A} , i_{s2B} , i_{s2C} – токи фаз; Ψ_{s2A} , Ψ_{s2B} , Ψ_{s2C} – потокосцепления фаз; R_{s2} – сопротивление фазы симметричной обмотки; R_{HA} , R_{HB} , R_{HC} – активное сопротивление нагрузки генератора.

Вычисляются выражения для потокосцеплений фаз статора выходной машины:

$$\begin{aligned}\Psi_{s2A} &= \left(1_{s2} + M_{s2} + L_{HA}\right)i_{s2A} - \frac{M_{s2}}{2}i_{s2B} - \frac{M_{s2}}{2}i_{s2C} - \\ &- M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{rla} - M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2AB}) i_{rlb} - M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2AC}) i_{rlc} \\ \Psi_{s2B} &= -\frac{M_{s2}}{2}i_{s2A} + \left(1_{s2} + M_{s2} + L_{HB}\right)i_{s2B} - \frac{M_{s2}}{2}i_{s2C} - \\ &- M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2BA}) i_{rla} - M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{rlb} - M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2BC}) i_{rlc} \\ \Psi_{s2C} &= -\frac{M_{s2}}{2}i_{s2A} - \frac{M_{s2}}{2}i_{s2B} + \left(1_{s2} + M_{s2} + L_{HC}\right)i_{s2C} - \\ &- M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2CA}) i_{rla} - M_{sr2} \cos(\theta_2 + \xi_{2CB}) i_{rlb} - M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{rlc}\end{aligned}\quad (2.25)$$

Находятся выражения суммарных потокосцеплений контуров статора выходной машины с учетом (2.25):

$$\begin{aligned}\Psi_{s21} &= \Psi_{s2A} - \Psi_{s2B} = \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HA}\right)i_{s2A} - \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HB}\right)i_{s2B} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2BA})] i_{rla} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2AB}) - \cos(\theta_2)] i_{rlb} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2AC}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2BC})] i_{rlc} \\ \Psi_{s22} &= \Psi_{s2B} - \Psi_{s2C} = \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HB}\right)i_{s2B} - \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HC}\right)i_{s2C} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2BA})] i_{rla} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2AB}) - \cos(\theta_2)] i_{rlb} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2AC}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2BC})] i_{rlc} \\ \Psi_{s23} &= \Psi_{s2C} - \Psi_{s2A} = \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HC}\right)i_{s2C} - \left(1_{s2} + \frac{3}{2}M_{s2} + L_{HA}\right)i_{s2A} - \\ &- M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2CA}) - \cos(\theta_2)] i_{rla} -\end{aligned}$$

$$-\mathbf{M}_{sr2} [\cos(\theta_2 + \xi_{2CB}) - \cos(\theta_2 + \xi_{2AB})] i_{rlb} - \\ -\mathbf{M}_{sr2} [\cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \xi_{2AC})] i_{rlc} \quad (2.26)$$

Во входящих в состав СДМГ трехфазных электрических машинах с симметричными обмотками, для углов между фазными осями справедливы равенства:

$$\begin{aligned} \xi_{1AB} &= \xi_{1BC} = \xi_{1CA} = \xi_{1ba} = \xi_{1cb} = \xi_{1ac} = \Delta_1 \\ \xi_{1BA} &= \xi_{1CB} = \xi_{1AC} = \xi_{1ab} = \xi_{1bc} = \xi_{1ca} = -\Delta_1 \\ \xi_{2AB} &= \xi_{2BC} = \xi_{2CA} = \xi_{2ba} = \xi_{2cb} = \xi_{2ac} = \Delta_2 \\ \xi_{2BA} &= \xi_{2CB} = \xi_{2AC} = \xi_{2ab} = \xi_{2bc} = \xi_{2ca} = -\Delta_2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \cos \Delta_1 &= \cos(-\Delta_1) = -\frac{1}{2} \\ \cos(\Delta) + \cos(\theta - \Delta) + \cos(\theta + \Delta) &= 0 \end{aligned}$$

Токи фаз выражаются через контурные (линейные) токи (рис.1):

$$\begin{aligned} i_{s1A} &= i_{s11} - i_{s13} & i_{r1a} &= i_{r1} - i_{r3} & i_{s2A} &= i_{s21} - i_{s23} \\ i_{s1B} &= i_{s12} - i_{s11} & i_{r1b} &= i_{r2} - i_{r1} & i_{s2B} &= i_{s22} - i_{s21} \\ i_{s1C} &= i_{s13} - i_{s12} & i_{r1c} &= i_{r3} - i_{r2} & i_{s2C} &= i_{s23} - i_{s22} \end{aligned} \quad (2.28)$$

После подстановок (2.27, 2.28) в (2.18, 2.23, 2.26) получаются выражения для суммарных потокосцеплений в контурах:

$$\begin{aligned} \Psi_{s11} &= \left(1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1}\right) (2i_{s11} - i_{s12} - i_{s13}) + \\ &+ M_{sr1} [2 \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 - \Delta_1) - \cos(\theta_1 + \Delta_1)] i_{r1} + \\ &+ M_{sr1} [\cos(\theta_1 + \Delta_1) - \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 - \Delta_1) + \cos(\theta_1 + \Delta_1)] i_{r2} + \\ &+ M_{sr1} [\cos(\theta_1 - \Delta_1) - \cos(\theta_1 + \Delta_1) - \cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 - \Delta_1)] i_{r3} = \\ &= \left(1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1}\right) (2i_{s11} - i_{s12} - i_{s13}) + \\ &+ 3M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{r1} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{r2} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{r3} \\ \Psi_{s12} &= \left(1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1}\right) (-i_{s11} + 2i_{s12} - i_{s13}) + \\ &+ 3M_{sr1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{r1} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{r2} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{r3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_{s13} = & \left(1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1} \right) (-i_{s11} - i_{s12} + 2i_{s13}) + \\
& + 3M_{sr1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{r1} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{r2} + 3M_{sr1} \cos(\theta_1) i_{r3} \\
\Psi_{r1} = & \left(1_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + 1_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) (2i_{r1} - i_{r2} - i_{r3}) + \\
& + M_{rs1} \{ \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \Delta_1) - \cos(\theta_1 - \Delta_1) + \cos(\theta_1) \} i_{s11} + \\
& M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 - \Delta_1) - \cos(\theta_1) - \cos(\theta_1 + \Delta_1) + \cos(\theta_1 - \Delta_1) \} i_{s12} + \\
& + M_{rs1} \{ \cos(\theta_1 + \Delta_1) - \cos(\theta_1 - \Delta_1) - \cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \Delta_1) \} i_{s13} + \\
& + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \Delta_2) - \cos(\theta_2 - \Delta_2) + \cos(\theta_2) \} i_{s21} + \\
& + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 - \Delta_2) - \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 + \Delta_2) + \cos(\theta_2 - \Delta_2) \} i_{s22} + \\
& + M_{rs2} \{ \cos(\theta_2 + \Delta_2) - \cos(\theta_2 - \Delta_2) - \cos(\theta_2) + \cos(\theta_2 + \Delta_2) \} i_{s23} = \\
& = \left(1_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + 1_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) (2i_{r1} - i_{r2} - i_{r3}) + \\
& + 3M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s11} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{s12} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{s13} + \\
& + 3M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s21} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{s22} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{s23} \\
\Psi_{r2} = & \left(1_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + 1_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) (-i_{r1} + 2i_{r2} - i_{r3}) + \\
& + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{s11} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s12} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{s13} + \\
& + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{s21} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s22} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{s23} \\
\Psi_{r3} = & \left(1_{r1} + \frac{3}{2} M_{r1} + 1_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2} \right) (-i_{r1} - i_{r2} + 2i_{r3}) + \\
& + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 - \Delta_1) i_{s11} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1 + \Delta_1) i_{s12} + 3M_{rs1} \cos(\theta_1) i_{s13} + \\
& + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{s21} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{s22} + 3M_{rs2} \cos(\theta_2) i_{s23} \\
\Psi_{s21} = & \left(1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HA} \right) (2i_{s21} - i_{s22} - i_{s23}) - \\
& - M_{sr2} [\cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 - \Delta_2) - \cos(\theta_2 + \Delta_2) + \cos(\theta_2)] i_{r1} - \\
& - M_{sr2} [\cos(\theta_2 + \Delta_2) - \cos(\theta_2) - \cos(\theta_2 - \Delta_2) + \cos(\theta_2 + \Delta_2)] i_{r2} - \\
& - M_{rs2} [\cos(\theta_2 - \Delta_2) - \cos(\theta_2 + \Delta_2) - \cos(\theta_2) + \cos(\theta_2 - \Delta_2)] i_{r3} = \\
& = \left(1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HA} \right) (2i_{s21} - i_{s22} - i_{s23}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -3M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{r1} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{r2} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{r3} \\
\Psi_{s22} &= \left(1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HA} \right) (-i_{s21} + 2i_{s22} - i_{s23}) - \\
& -3M_{sr2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{r1} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{r2} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{r3} \\
\Psi_{s23} &= \left(1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HA} \right) (-i_{s21} - i_{s22} + 2i_{s23}) - \\
& -3M_{sr2} \cos(\theta_2 + \Delta_2) i_{r1} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2 - \Delta_2) i_{r2} - 3M_{sr2} \cos(\theta_2) i_{r3}
\end{aligned}$$

Для представления математической модели в матричном виде, вводятся обозначения:

$$\begin{aligned}
[X] &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \\
[Q_{1,2}^{\{n\}}(\Theta, \Delta)] &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos (\theta \langle + \rangle \Delta) & \cos (\theta \langle - \rangle \Delta) \\ \cos (\theta \langle - \rangle \Delta) & \cos \theta & \cos (\theta \langle + \rangle \Delta) \\ \cos (\theta \langle + \rangle \Delta) & \cos (\theta \langle - \rangle \Delta) & \cos \theta \end{bmatrix} \\
L_r &= 1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1} + 1_{r2} + \frac{3}{2} M_{r2}, \quad L_{s1} = 1_{s1} + \frac{3}{2} M_{s1} \\
L_{SHA} &= 1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HA}, \quad L_{SHB} = 1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HB}, \quad L_{SHC} = 1_{s2} + \frac{3}{2} M_{s2} + L_{HC} \\
R_{SHA} &= R_{s2} + R_{HA}, \quad R_{SHB} = R_{s2} + R_{HB}, \quad R_{SHC} = R_{s2} + R_{HC}, \quad R_r = R_{r1} + R_{r2} \\
[R_{S2H}] &= \begin{bmatrix} R_{SHA} + R_{SHB} & -R_{SHB} & -R_{SHA} \\ -R_{SHB} & R_{SHB} + R_{SHC} & -R_{SHC} \\ -R_{SHA} & -R_{SHC} & R_{SHC} + R_{SHA} \end{bmatrix}, \quad [u_{s1}] = \begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix}, \\
[L_{S2H}] &= \begin{bmatrix} L_{SHA} + L_{SHB} & -L_{SHB} & -L_{SHA} \\ -L_{SHB} & L_{SHB} + L_{SHC} & -L_{SHC} \\ -L_{SHA} & -L_{SHC} & L_{SHC} + L_{SHA} \end{bmatrix}, \quad [i_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{s11} \\ i_{s12} \\ i_{s13} \end{bmatrix}, \\
[i_{s2}] &= \begin{bmatrix} i_{s21} \\ i_{s22} \\ i_{s23} \end{bmatrix}, \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_{s1}] = \begin{bmatrix} \Psi_{s11} \\ \Psi_{s12} \\ \Psi_{s13} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_{s2}] = \begin{bmatrix} \Psi_{s21} \\ \Psi_{s22} \\ \Psi_{s23} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_r] = \begin{bmatrix} \Psi_{r1} \\ \Psi_{r2} \\ \Psi_{r3} \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

С учетом введенных обозначений записываются выражения для

производных от суммарных потокосцеплений контуров:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}[\Psi_{S1}] &= \frac{d}{dt}(L_{s1}[X][i_{S1}] + 3M_{sr1}[Q_1(\Theta_1, \Delta_1)][i_R]) \\
 &= L_{s1}[X] \frac{d}{dt}[i_{S1}] + 3M_{sr1}[Q_1(\Theta_1, \Delta_1)] \frac{d}{dt}[i_R] - 3p_1\omega_r M_{sr1}[Q'_1(\Theta_1, \Delta_1)][i_R] \\
 \frac{d}{dt}[\Psi_R] &= \frac{d}{dt}(L_r[X][i_R] + 3M_{rs1}[Q_2(\Theta_1, \Delta_1)][i_{S1}] - 3M_{rs2}[Q_2(\Theta_2, \Delta_2)][i_{S2}]) = \\
 &= L_r[X] \frac{d}{dt}[i_R] + 3M_{rs1}[Q_2(\Theta_1, \Delta_1)] \frac{d}{dt}[i_{S1}] - 3M_{rs2}[Q_2(\Theta_2, \Delta_2)] \frac{d}{dt}[i_{S2}] - \\
 &\quad - 3p_1\omega_r M_{rs1}[Q'_1(\Theta_1, \Delta_1)][i_{S1}] + 3p_2\omega_r M_{rs2}[Q'_2(\Theta_2, \Delta_2)][i_{S2}] \\
 \frac{d}{dt}[\Psi_{S2}] &= \frac{d}{dt}([L_{s2H}][i_{S2}] - 3M_{sr2}[Q_1(\Theta_2, \Delta_2)][i_R]) = \\
 &= [L_{s2H}] \frac{d}{dt}[i_{S2}] - 3M_{sr2}[Q_1(\Theta_2, \Delta_2)] \frac{d}{dt}[i_R] + 3p_2\omega_r M_{sr2}[Q'_1(\Theta_2, \Delta_2)][i_R]
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

С учетом (2.28, 2.29) системы уравнений (2.16, 2.19, 2.24) приводятся к уравнениям в контурных токах. После выполнения необходимых преобразований получается система дифференциальных уравнений электромагнитных контуров СДМГ:

$$\left. \begin{aligned}
 [u_{S1}] &= L_{s1}[X] \frac{d}{dt}[i_{S1}] + 3M_{sr1}[Q_1(\Theta_1, \Delta_1)] \frac{d}{dt}[i_R] + \\
 &\quad + R_{s1}[X][i_{S1}] - 3p_1\omega_r M_{sr1}[Q'_1(\Theta_1, \Delta_1)][i_R] \\
 [0] &= [L_{s2H}] \frac{d}{dt}[i_{S2}] - 3M_{sr2}[Q_1(\Theta_2, \Delta_2)] \frac{d}{dt}[i_R] + \\
 &\quad + [R_{s2H}][i_{S2}] + 3p_2\omega_r M_{sr2}[Q'_1(\Theta_2, \Delta_2)][i_R] \\
 [0] &= L_r[X] \frac{d}{dt}[i_R] + 3M_{rs1}[Q_2(\Theta_1, \Delta_1)] \frac{d}{dt}[i_{S1}] - \\
 &\quad - 3M_{rs2}[Q_2(\Theta_2, \Delta_2)] \frac{d}{dt}[i_{S2}] + R_r[X][i_R] - \\
 &\quad - 3p_1\omega_r M_{rs1}[Q'_2(\Theta_1, \Delta_1)][i_{S1}] + \\
 &\quad + 3p_2\omega_r M_{rs2}[Q'_2(\Theta_2, \Delta_2)][i_{S2}]
 \end{aligned} \right\} \tag{2.30}$$

Для поиска решения, система дифференциальных уравнений (2.30) приводится к нормальному виду Коши. Для этого вводятся обозначения:

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}, \quad [u] = \begin{bmatrix} [u_{s1}] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

где $[0]$ - матрица с нулевыми элементами размерности (3×3) ,

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0] & 3M_{sr1}[Q_1(\Theta_1, \Delta_1)] \\ [0] & [L_{s2H}] & -3M_{sr2}[Q_1(\Theta_2, \Delta_2)] \\ 3M_{rs1}[Q_2(\Theta_1, \Delta_1)] & -3M_{rs2}[Q_2(\Theta_2, \Delta_2)] & L_r[X] \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0] & -3p_1\omega_r M_{sr1}[Q'_1(\Theta_1, \Delta_1)] \\ [0] & [R_{s2H}] & 3p_2\omega_r M_{sr2}[Q'_1(\Theta_2, \Delta_2)] \\ -3p_1\omega_r M_{rs1}[Q'_2(\Theta_1, \Delta_1)] & 3p_2\omega_r M_{rs2}[Q'_2(\Theta_2, \Delta_2)] & R_r[X] \end{bmatrix}$$

С учетом обозначений (2.31, 2.32) система уравнений (2.30) записывается:

$$[u] = [L] \frac{d}{dt} [i] + [Z][i] \quad (2.33)$$

Для матрицы $[L]$ находится обратная матрица и обозначается $[L]^{-1}$.

После подстановки обратной матрицы в систему уравнений (2.33) и преобразований получается система дифференциальных уравнений электромагнитных контуров СДМГ в нормальной форме Коши:

$$\frac{d}{dt} [i] = [L]^{-1} [u] - [L]^{-1} [Z][i] \quad (2.34)$$

Мгновенный электромагнитный момент СДМГ с учетом (2.9), (2.15), (2.22) рассчитывается по формуле:

$$m(t) = 3 \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}_T [G(\Delta_1, \Delta_2)] \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

где

$$[G(\Delta_1, \Delta_2)] = \begin{bmatrix} [0] & [0] & -p_1 M_1 [Q'_1(\theta_1, \Delta_1)] \\ [0] & [0] & p_2 M_2 [Q'_1(\theta_2, \Delta_2)] \\ -p_1 M_1 [Q'_2(\theta_1, \Delta_1)] & p_2 M_2 [Q'_2(\theta_2, \Delta_2)] & [0] \end{bmatrix}.$$

Движение ротора описывается выражением (2.10), при условии, что электромагнитный момент СДМГ находится в соответствии с (2.35).

Таким образом, математическая модель СДМГ состоит из выражений (2.34) и (2.10) с учетом (2.35) и принятых обозначений.

2.3. Особенности математического описания СДМГ

Электромагнитные процессы в СДМГ в общем виде описываются системой уравнений (2.34). Описание СДМГ подобной системой уравнений включает в себя все возможные варианты его построения. Для представления математической модели конкретного варианта реализации СДМГ необходимым является определение связи между конструктивными особенностями исполнения отдельных элементов генератора и соответствующего им теоретического описания.

В первую очередь определяются особенности соединения роторных обмоток обеих электрических машин. Устанавливается, что фазы роторных обмоток одной машины соединяются с соответствующими фазами другой, то есть фаза А соединяется с фазой А и т.д. Принципиальным здесь является именно порядок чередования фаз вдоль принятого положительного направления обхода воздушного зазора для каждой машины, поскольку от этого зависит направление вращения результирующего магнитного поля электрической машины.

При определении направления вращения результирующих магнитных полей, образуемых роторными обмотками каждой машины, предполагается, что системы трехфазных токов, питающих обмотки одинаковы для каждой машины, то есть для одноименных фаз формулы токов являются одинаковыми.

Возможным является всего два способа соединения фазных обмоток первой и второй машины на роторе: согласный и встречный (рис. 2.2). В первом случае порядок чередования фазных обмоток каждой машины на роторе вдоль положительного направления изменения углов совпадает.

Следовательно, совпадают и направления вращения магнитных полей, формируемых роторными обмотками этих машин. Во втором случае порядок чередования фазных обмоток на роторе первой машины противоположен порядку чередования фазных обмоток ротора второй машины. В этом случае формируемые магнитные поля вращаются в различных направлениях.

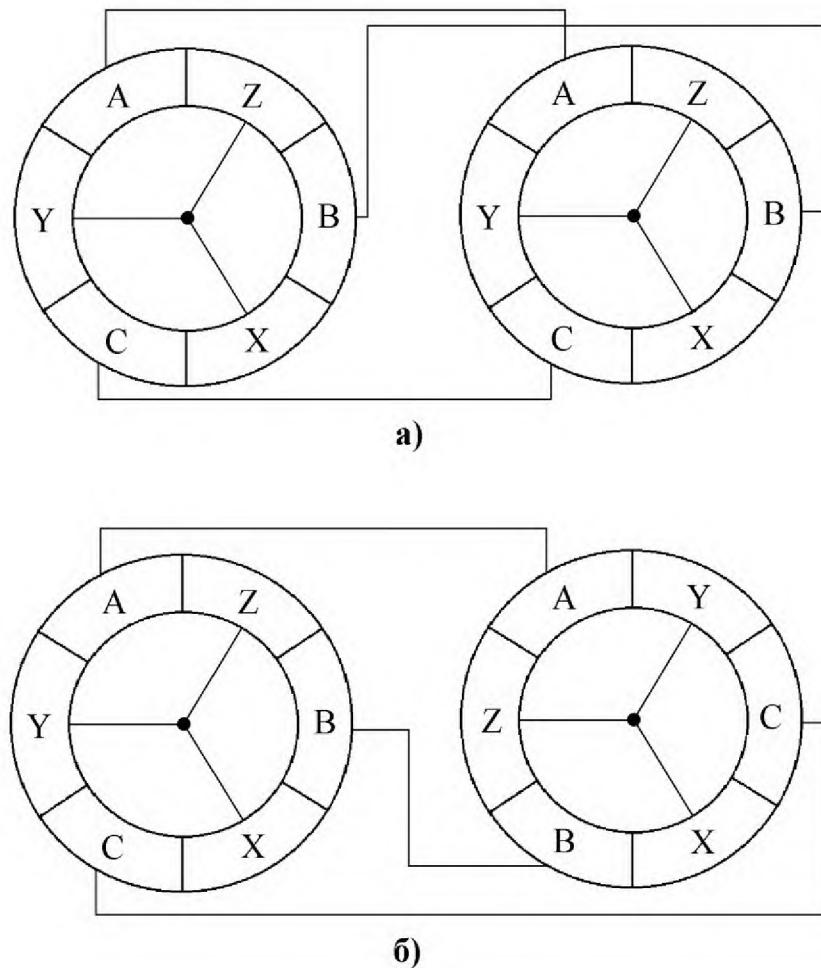


Рис. 2.2. Способы соединения роторных обмоток СДМГ:

а) согласный; б) встречный.

Изображением на рис. 2.2. концов фазных обмоток – X, Y, Z соединенными подчеркивается, что все обмотки СДМГ выполнены по схеме «звезда». На рисунках представленных далее указываются только начала обмоток – A, B, C; изображение концов фазных обмоток опускается, но по умолчанию подразумевается соединение их «звездой».

Конструктивные особенности роторных обмоток, как первой, так и

второй электрических машин, входящих в состав СДМГ, являются основой для определения законов изменения взаимоиндуктивностей статорных и роторных обмоток при вращении вала генератора. Безусловно, законы изменения взаимоиндуктивностей между статором и ротором каждой машины определяются с учетом табл. 2.1.

Учет особенностей конструктивного исполнения роторных обмоток в теоретическом описании с помощью рассматриваемой общей модели СДМГ осуществляется изменением знака перед константой Δ , которая обозначает угловое расстояние между фазными осями одной обмотки. Несмотря на простоту теоретического учета конструктивных особенностей в математической модели, различие знаков коренным образом изменяет взаимодействие между контурами машины и, в конечном итоге, сказывается на процессах, возникающих в обмотке ротора и в нагрузке.

Соответствие значений углов Δ_1 и Δ_2 для первой и второй машины соответственно, выражениям частот токов ротора и нагрузки представляются в табл. 2.2. Наличие в табл. положительных и отрицательных значений углов является особенностью математического описания СДМГ. Физически Δ_1 и Δ_2 означают угловые расстояния между осями фаз для которых определяется взаимоиндукция при равенстве нулю Θ – углового расстояния между фазами А ротора и статора одной машины.

Табл. 2.2. Частотные зависимости СДМГ различных типов.

Тип СДМГ	Углы между осями фаз		Частота основной гармоники	
	Δ_1	Δ_2	Ротор	Нагрузка
1	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	$f_R = f_0 + p_1 n$	$f_H = (p_2 - p_1)n - f_0$
2	$\frac{2\pi}{3}$	$-\frac{2\pi}{3}$	$f_R = f_0 + p_1 n$	$f_H = f_0 + (p_1 + p_2)n$
3	$-\frac{2\pi}{3}$	$-\frac{2\pi}{3}$	$f_R = f_0 - p_1 n$	$f_H = f_0 + (p_2 - p_1)n$
4	$-\frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	$f_R = f_0 - p_1 n$	$f_H = (p_1 + p_2)n - f_0$

Таким образом, для каждого типа СДМГ различаются и процессы преобразования энергии, и матрицы $[L]$ и $[Z]$ в системе уравнений (2.34). Далее рассматриваются поочередно СДМГ каждого типа, особенности происходящих в них физических процессов и уточняются их математические модели. Предполагается, что возбуждение статора первой машины осуществляется симметричной системой трехфазных токов, порядок расположения фаз на временной оси – А, В, С. За положительное направление изменения углов принимается направление вращения ротора.

В СДМГ **первого типа** (рис. 2.3.) обмоткой статора первой машины, питаемой системой трехфазных токов, создается вращающееся магнитное поле, с направлением вращения противоположным направлению вращения ротора [57]. Первая машина работает в режиме электромагнитного тормоза, и возбуждаемые в ее роторных обмотках токи создают вращающееся магнитное поле, вращающееся в отрицательном направлении.

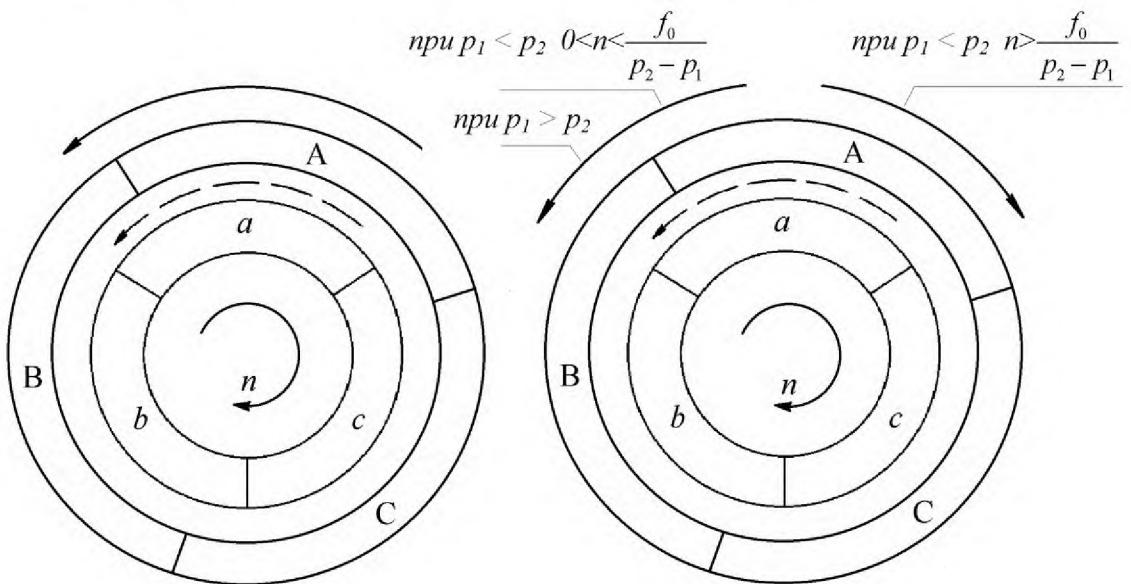


Рис. 2.3. Направления вращения результирующих магнитных полей в СДМГ первого типа.

Нагрузкой роторных цепей первой машины являются роторные цепи второй машины. Фазы второй машины соединяются согласно с фазами первой машины ($a_1 - a_2$, $b_1 - b_2$, $c_1 - c_2$). Направления вращения полей, создаваемых роторными обмотками первой и второй машины, совпадают. Таким образом, направления вращения поля ротора второй машины и самого

ротора противоположны. Частота вращения магнитного поля ротора второй машины относительно статора:

$$n_2 = n - \frac{f_o + np_1}{p_2} = \frac{n(p_2 - p_1) - f_o}{p_2} \quad (2.36)$$

Исследованием выражения (2.36) определяется частота вращения ротора, при которой вращающееся магнитное поле ротора второй машины становится неподвижным относительно статора. Это становится возможным при выполнении условия $p_2 > p_1$ при частоте вращения ротора, равной

$$n_{o2} = \frac{f_o}{p_2 - p_1}.$$

Угловая скорость поля ротора второй машины относительно ротора становится равной угловой скорости ротора. Движения результирующего магнитного поля вдоль статора не происходит, ЭДС в контурах статора не наводится, что приводит к нулевой частоте тока нагрузки и отсутствию на ней напряжения.

При выполнении условий $n < n_{o2}$ и $p_2 > p_1$ угловая скорость результирующего магнитного поля ротора больше угловой скорости ротора, магнитное поле ротора вращается относительно статора в отрицательном направлении, и вторая машина работает в режиме двигателя. При выполнении условий $n > n_{o2}$ и $p_2 > p_1$ угловая скорость ротора больше угловой скорости магнитного поля; магнитное поле ротора вращается относительно статора в положительном направлении, и вторая машина работает в режиме генератора.

При $p_2 < p_1$ угловая скорость результирующего магнитного поля ротора второй машины больше угловой скорости ротора, магнитное поле ротора вращается относительно статора в отрицательном направлении, и вторая машина работает в режиме двигателя.

Подстановкой значений углов Δ_1 и Δ_2 из табл. 2.2. в (2.32) получаются матрицы $[L_1]$ и $[Z_1]$ для СДМГ первого типа:

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0] & 3M_{sr1} \left[Q_1 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [L_{S2H}] & -3M_{sr2} \left[Q_1 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ 3M_{rs1} \left[Q_2 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & -3M_{rs2} \left[Q_2 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & L_r[X] \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0] & -3p_1\omega_r M_{sr1} \left[Q'_1 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [R_{S2H}] & 3p_2\omega_r M_{sr2} \left[Q'_1 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ -3p_1\omega_r M_{rs1} \left[Q'_2 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & 3p_2\omega_r M_{rs2} \left[Q'_2 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & R_r[X] \end{bmatrix}$$

Подстановкой матриц $[L_1]$ и $[Z_1]$ (2.37) в систему уравнений (2.34) получается математическая модель электромагнитных процессов СДМГ первого типа.

В СДМГ второго типа (рис. 2.4) первая машина работает так же, как и в СДМГ первого типа – в режиме электромагнитного тормоза.

Фазы второй машины соединяются встречно с фазами первой машины ($a_1 - a_2$, $b_1 - c_2$, $c_1 - b_2$). Направление вращения поля ротора второй машины противоположно направлению вращения поля ротора первой машины. Таким образом, направления вращения поля ротора второй машины и самого ротора совпадают.

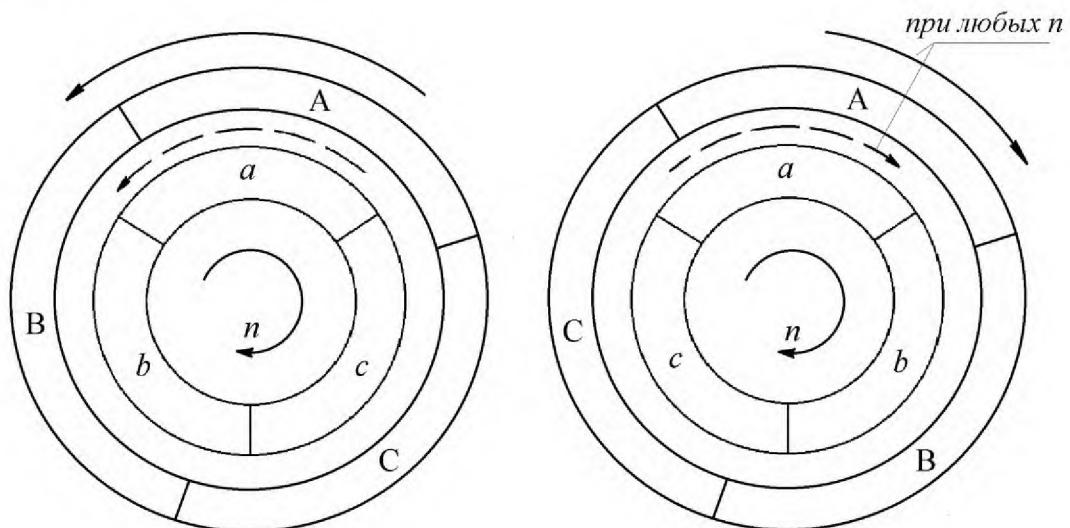


Рис. 2.4. Направления вращения результирующих магнитных полей в СДМГ второго типа.

При любых частотах вращения в СДМГ второго типа магнитное поле ротора второй машины движется сонаправлено с ротором, результирующее магнитное поле ротора вращается относительно статора в положительном направлении, и вторая машина работает в режиме электромагнитного тормоза.

Подстановкой значений углов Δ_1 и Δ_2 из табл. 2.2. в (2.32) получаются матрицы $[L_2]$ и $[Z_2]$ для СДМГ второго типа:

$$[L_2] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0] & 3M_{sr1} \left[Q_l \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [L_{s2H}] & -3M_{sr2} \left[Q_l \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ 3M_{rs1} \left[Q_2 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & -3M_{rs2} \left[Q_2 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & L_r[X] \end{bmatrix}$$

$$[Z_2] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0] & -3p_1\omega_r M_{sr1} \left[Q'_l \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [R_{s2H}] & 3p_2\omega_r M_{sr2} \left[Q'_l \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ -3p_1\omega_r M_{rs1} \left[Q'_2 \left(\Theta_1, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & 3p_2\omega_r M_{rs2} \left[Q'_2 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & R_r[X] \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Подстановкой матриц $[L_2]$ и $[Z_2]$ (2.38) в систему уравнений (2.34) получается математическая модель электромагнитных процессов СДМГ второго типа.

В СДМГ третьего типа (рис. 2.5) направление вращения магнитного поля, создаваемого основной гармоникой и направление вращения ротора совпадают. При частоте вращения ротора

$$n_{o1} = \frac{f_0}{p_1}$$

магнитное поле основной гармоники относительно ротора не движется, в результате чего ЭДС в контурах ротора первой машины не наводится и на нагрузку, соответственно, энергия не передается.

При $n < n_{o1}$ скорость вращения основной гармоники магнитного поля

возбудителя больше скорости вращения ротора и первая машина работает в режиме двигателя. Магнитное поле, образуемое токами ротора, вращается при этом в направлении вращения ротора.

При $n > n_{01}$ скорость вращения основной гармоники магнитного поля меньше скорости вращения ротора и первая машина работает в режиме генератора. Магнитное поле, образуемое токами ротора, вращается при этом в направлении противоположном направлению вращения ротора.

Фазы второй машины соединяются согласно с фазами первой машины. Направление вращения поля ротора второй машины соответствует направлению вращения поля ротора первой машины.

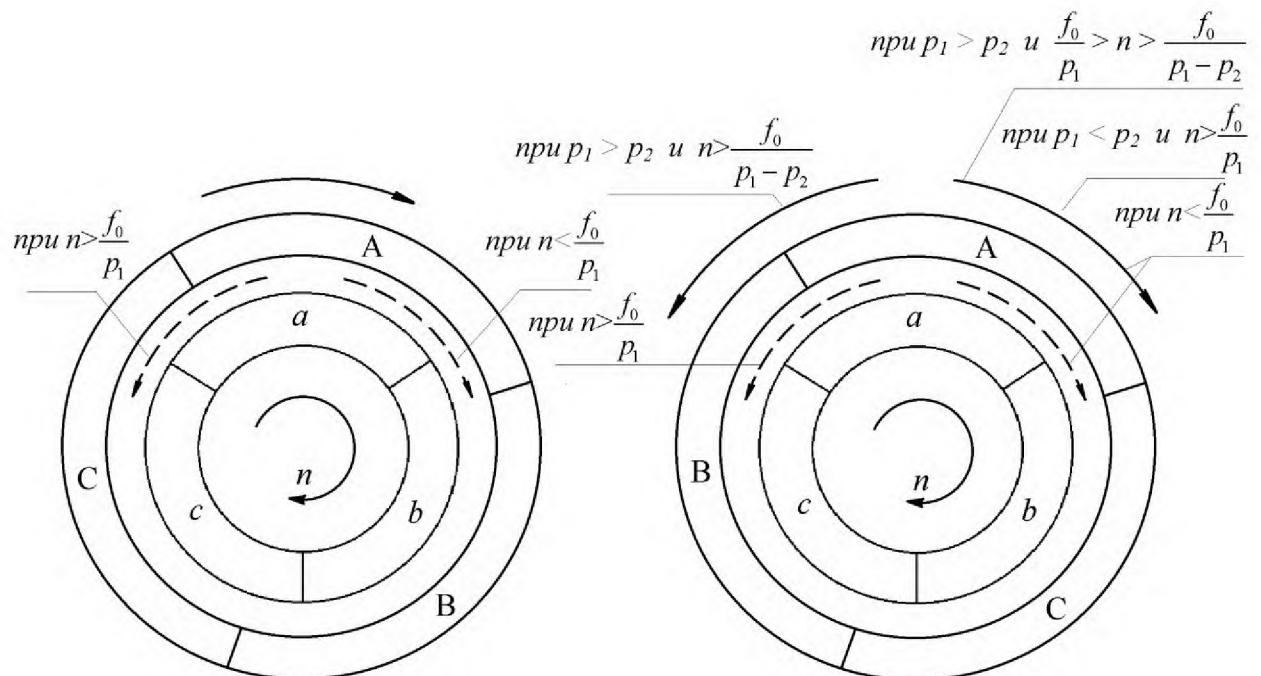


Рис. 2.5. Направления вращения результирующих магнитных полей в СДМГ третьего типа.

С учетом того, что для первой машины в третьем типе СДМГ существуют два режима работы, процессы во второй машине рассматриваются для каждого из этих случаев.

При работе первой машины в режиме двигателя магнитное поле, формируемое обмотками второй машины, вращается в положительную сторону, соответственно, вторая машина работает в режиме

электромагнитного тормоза. Такое сочетание режимов для рассматриваемого типа СДМГ происходит при вращении ротора со скоростями $\pi < n_{o1}$.

При работе первой машины в режиме генератора скорость магнитного поля ротора относительно статора:

$$n_2 = \pi - \frac{np_1 - f_o}{p_2} = \frac{f_o + n(p_2 - p_1)}{p_2} \quad (2.39)$$

Исследованием выражения (2.39) определяется частота вращения ротора, при которой вращающееся магнитное поле ротора второй машины становится неподвижным относительно статора. Это становится возможным при выполнении условия $p_1 > p_2$ при частоте вращения ротора, равной

$$n_{o2} = \frac{f_o}{p_1 - p_2}.$$

Угловая скорость поля ротора второй машины относительно ротора становится равной угловой скорости ротора. Движения результирующего магнитного поля вдоль статора не происходит, ЭДС в контурах статора не наводится, что приводит к нулевой частоте тока нагрузки и отсутствию на ней напряжения.

При выполнении условий $\pi > n_{o2}$ и $p_1 > p_2$ угловая скорость результирующего магнитного поля ротора больше угловой скорости ротора, магнитное поле ротора вращается относительно статора в отрицательном направлении, и вторая машина работает в режиме двигателя. При выполнении условий $n_{o1} < \pi < n_{o2}$ и $p_1 > p_2$ угловая скорость ротора больше угловой скорости магнитного поля; магнитное поле ротора вращается относительно статора в положительном направлении, и вторая машина работает в режиме генератора.

При выполнении условий $p_1 < p_2$ и $\pi > n_{o1}$ угловая скорость результирующего магнитного поля ротора второй машины меньше угловой скорости ротора, магнитное поле ротора вращается относительно статора в положительном направлении, и вторая машина работает в режиме генератора.

Подстановкой значений углов Δ_1 и Δ_2 из табл. 2.2. в (2.32) получаются матрицы $[L_3]$ и $[Z_3]$ для СДМГ третьего типа:

$$[L_3] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0] & 3M_{sr1} \left[Q_1 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [L_{s2H}] & -3M_{sr2} \left[Q_1 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ 3M_{rs1} \left[Q_2 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & -3M_{rs2} \left[Q_2 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & L_r[X] \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$[Z_3] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0] & -3p_1\omega_r M_{sr1} \left[Q'_1 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [R_{s2H}] & 3p_2\omega_r M_{sr2} \left[Q'_1 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ -3p_1\omega_r M_{rs1} \left[Q'_2 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & 3p_2\omega_r M_{rs2} \left[Q'_2 \left(\Theta_2, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] & R_r[X] \end{bmatrix}$$

Подстановкой матриц $[L_3]$ и $[Z_3]$ (2.40) в систему уравнений (2.34) получается математическая модель электромагнитных процессов СДМГ третьего типа.

В **СДМГ четвертого типа** (рис. 2.6) работа первой машины аналогична ее работе в СДМГ третьего типа.

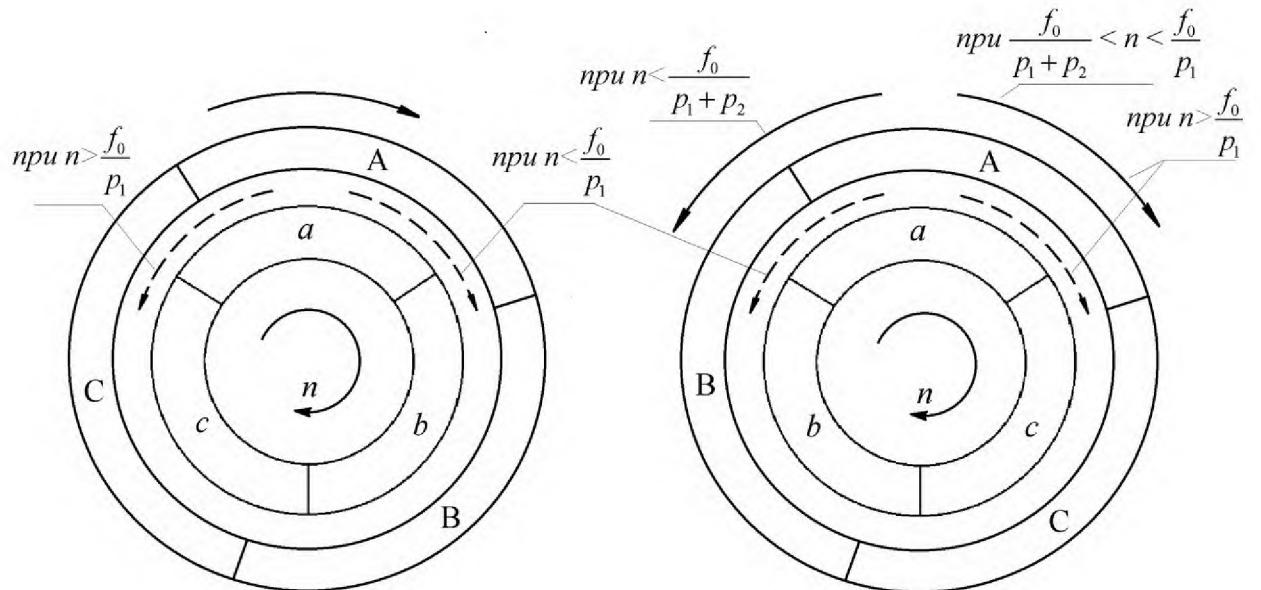


Рис. 2.6. Направления вращения результирующих магнитных полей в СДМГ четвертого типа.

Фазы ротора второй машины соединяются встречно с фазами ротора

первой машины ($a_1 - a_2$, $b_1 - c_2$, $c_1 - b_2$). Правление вращения поля ротора второй машины противоположно направлению вращения поля ротора первой машины.

Для первой машины, так же как и в третьем типе СДМГ существуют два режима работы и процессы во второй машине рассматриваются для каждого из этих случаев.

При работе первой машины в режиме генератора вторая машина работает в режиме электромагнитного тормоза. Такое сочетание режимов для рассматриваемого типа СДМГ происходит при вращении ротора со скоростями $\pi > n_{o1}$.

При работе первой машины в режиме двигателя скорость магнитного поля ротора относительно статора:

$$n_2 = n - \frac{f_o - np_1}{p_2} = \frac{n(p_2 + p_1) - f_o}{p_2} \quad (2.41)$$

Исследованием выражения (2.41) определяется частота вращения ротора, при которой вращающееся магнитное поле ротора второй машины становится неподвижным относительно статора. Это становится возможным при частоте вращения ротора, равной

$$n_{o2} = \frac{f_o}{p_1 + p_2}$$

При выполнении условия $\pi < n_{o2}$ угловая скорость результирующего магнитного поля ротора больше угловой скорости ротора, магнитное поле ротора вращается относительно статора в отрицательном направлении, и вторая машина работает в режиме двигателя. При выполнении условия $n_{o1} < \pi < n_{o2}$ угловая скорость ротора больше угловой скорости магнитного поля; магнитное поле ротора вращается относительно статора в положительном направлении, и вторая машина работает в режиме генератора.

Подстановкой значений углов Δ_1 и Δ_2 из табл. 2.2. в (2.32) получаются матрицы $[L_4]$ и $[Z_4]$ для СДМГ четвертого типа:

$$[L_4] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0] & 3M_{sr1} \left[Q_1 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [L_{s2H}] & -3M_{sr2} \left[Q_1 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ 3M_{rs1} \left[Q_2 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] - 3M_{rs2} \left[Q_2 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & L_r[X] \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$[Z_4] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0] & -3p_1\omega_r M_{sr1} \left[Q'_1 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ [0] & [R_{s2H}] & 3p_2\omega_r M_{sr2} \left[Q'_1 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ -3p_1\omega_r M_{rs1} \left[Q'_2 \left(\Theta_1, -\frac{2\pi}{3} \right) \right] 3p_2\omega_r M_{rs2} \left[Q'_2 \left(\Theta_2, \frac{2\pi}{3} \right) \right] & R_r[X] \end{bmatrix}$$

Подстановкой матриц $[L_4]$ и $[Z_4]$ (2.42) в систему уравнений (2.32) получается математическая модель электромагнитных процессов СДМГ четвертого типа.

2.4. Построение модели СДМГ в MatLAB.

Система MatLAB является ориентированной на работу с массивами данных интерактивной компьютерной системой для выполнения научных и инженерных расчетов. Чрезвычайно развиты последние версии MatLAB. Они содержат огромную совокупность функций и процедур, необходимых для осуществления сложных численных расчетов, оформления в наглядном виде результатов этих расчетов. Встроенная матричная арифметика является привлекательной особенностью системы. В числе огромного количества достоинств, система поддерживает выполнение операций с матрицами и массивами данных, построение разнообразных видов графиков и трехмерных поверхностей. Реализованная в ней операционная среда позволяет формулировать проблемы и получать решения в обычной математической форме, избегая рутинного программирования. Опираясь на указанные доводы и учитывая широкую распространенность системы MatLAB, она была выбрана для построения математической модели СДМГ в дифференциальных уравнениях.

Математическая модель СДМГ (рис. 2.7) реализуется в Simulink – подсистеме моделирования динамических процессов среды MatLAB. Для её создания используются стандартные блоки библиотеки этого приложения:

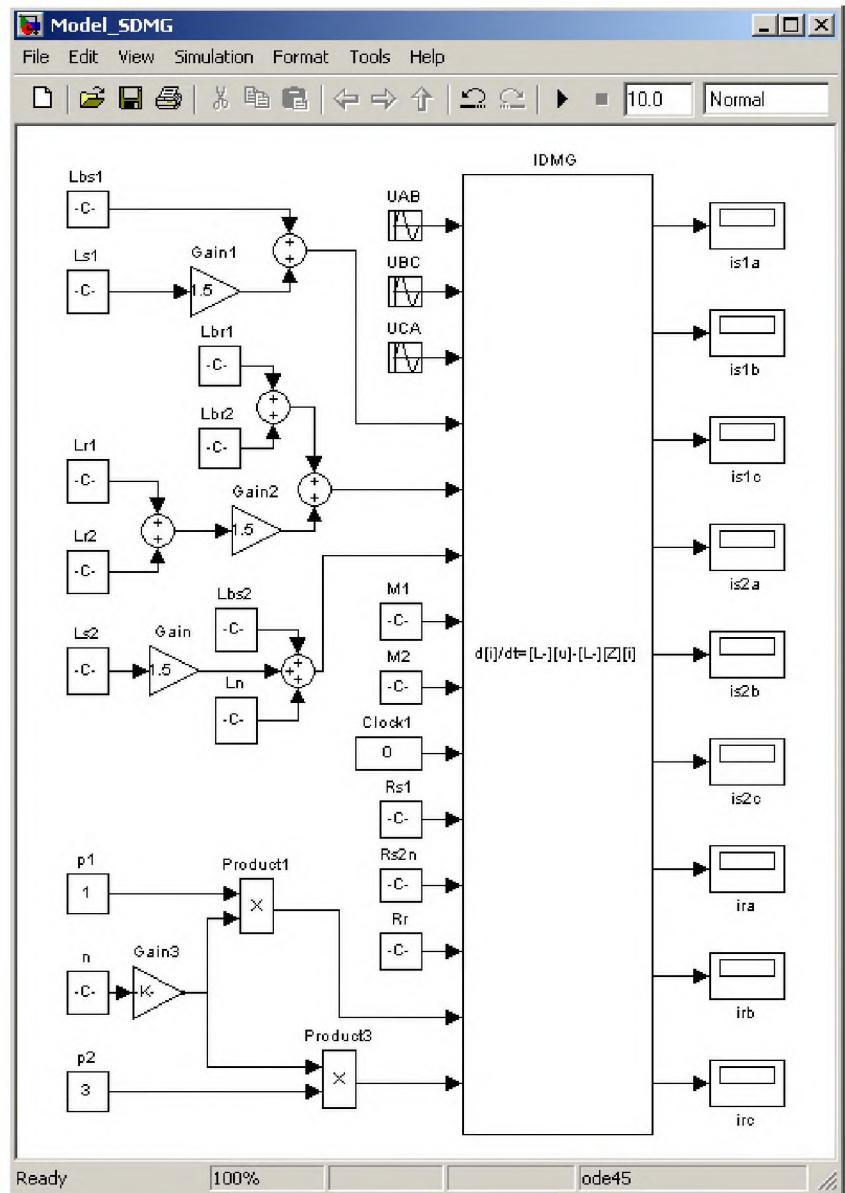


Рис. 2.7. Схема СДМГ в окне модели Simulink.

1. Блоки раздела «Commonly Used Blocks» [58]:
 - 1.1. «Constant» - блок выходным параметром которого является постоянное число. В блоках «Constant» содержатся величины:
 - индуктивностей рассеяния фаз: Lbs1, Lbr1 – статора и ротора 1 машины, Lbr2, Lbs2 – статора и ротора 2 машины;
 - индуктивности нагрузки – Ln;

- взаимных индуктивностей фаз: $Ms1$ – статора 1 машины, $Mr1$ – ротора 1 машины, $Mr2$ – ротора 2 машины, $Ms2$ – статора 2 машины;
- взаимных индуктивностей фазы статора и фазы ротора одной машины: $M1$ – первой машины, $M2$ – второй машины,
- активных сопротивлений : $Rs1$ – обмотки статора 1 машины, Rr – суммарное сопротивление фаз ротора обеих машин, $Rs2n$ – суммарное сопротивление обмотки ротора 2 машины и нагрузки;
- количества пар полюсов: $p1$, $p2$ – первой и второй машины соответственно;
- частоты вращения вала - π ;

1.2. «Gain» - блок, служащий для умножения значения параметра на входе блока на коэффициент, записанный в блоке;

1.3. «Sum» - блок арифметического суммирования входных параметров;

2. Блоки раздела «Sources»:

2.1. «SinWave» - блоки синусоидального сигнала. Используются для имитации трехфазного симметричного напряжения. Параметры блока – амплитуда, частота, фазовый сдвиг;

2.2. «Clock» - блок, выдающий время модели;

3. Блок раздела «Sinks»:

3.1. «Scope» - осциллограф. Блоком отображается форма входного сигнала: $is1f$ – тока фазы А обмотки статора 1 машины, $is2f$ – тока фазы А обмотки статора второй машины, irf – тока фазы А ротора;

4. DEE (Differential Equations Editor) – редактор дифференциальных уравнений. Основной блок модели СДМГ. На рис. 2.7 – IDMG (Integrated Double Machine Generator).

Блок IDMG (рис. 2.8) имеет следующие параметры:

of inputs: 14 (количество входных портов);

First order equations, dx/dt : (правые части производных, когда система уравнений приведена к форме Коши). Количество строк в системе

(Number of states) равно 9. Входные переменные обозначаются u (№ порта), вычисляемые переменные x (№ переменной);

x_0 : начальные условия для каждой вычисляемой переменной;

y : список вычисляемых переменных, передаваемых на выход блока.

На входы блока IDMG (рис. 2.7) поступают следующие значения:

1. u_{AB} – линейное напряжение между фазами А и В;
2. u_{BC} – линейное напряжение между фазами В и С;
3. u_{CA} – линейное напряжение между фазами С и А;
4. L_{S1} – сумма главной индуктивности фазы статора и индуктивности потерь фазы статора первой электрической машины;
5. L_r – сумма главных индуктивностей фаз ротора и индуктивностей потерь первой и второй машин;

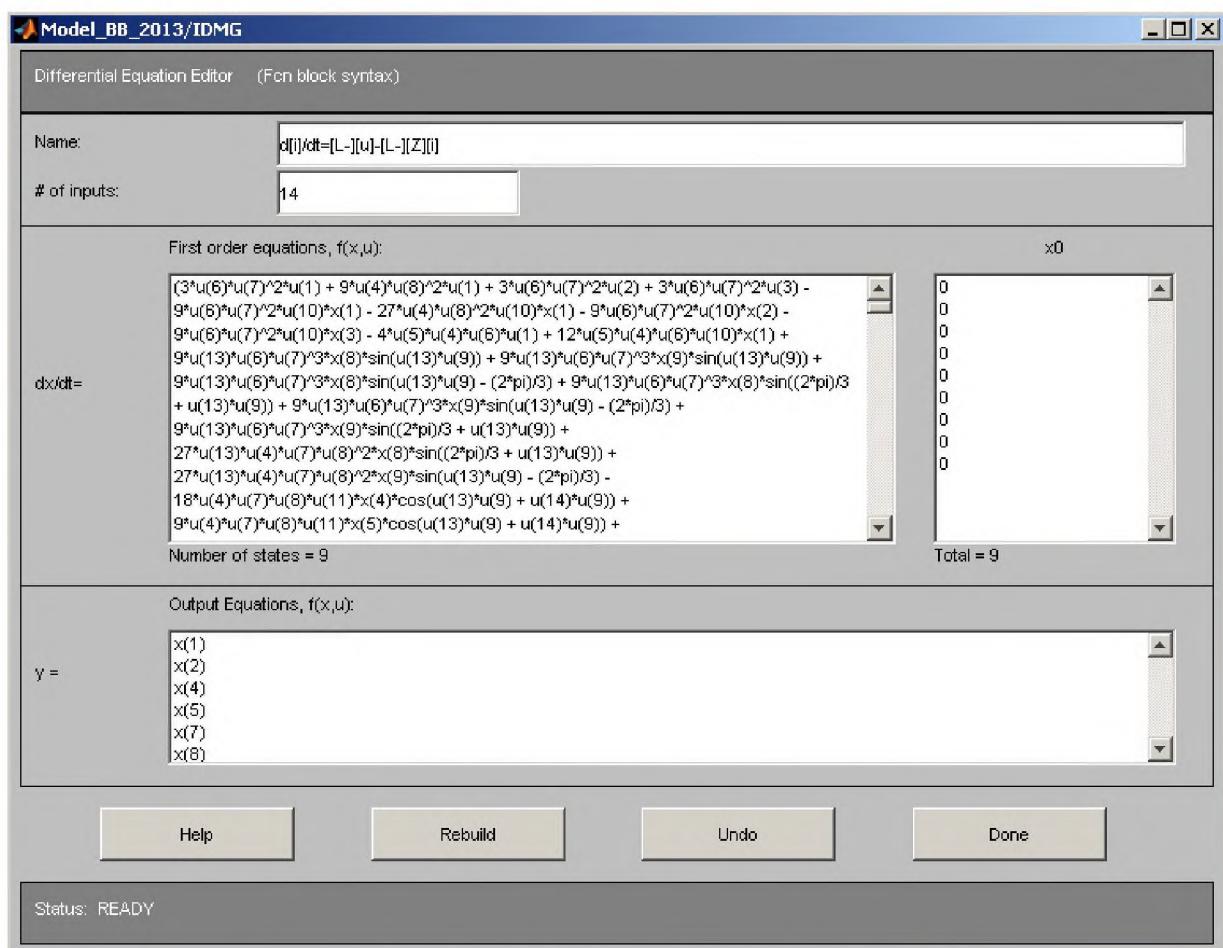


Рис. 2.8. Окно редактирования блока IDMG.

6. L_{S2} – сумма главной индуктивности фазы статора и индуктивности потерь фазы ротора второй электрической машины;

7. M_1 – максимальная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора первой машины;
8. M_2 – максимальная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора второй машины;
9. T_s – время модели;
10. R_{S1} – активное сопротивление обмотки фазы первой машины;
11. R_{S2n} – суммарное активное сопротивление обмотки фазы второй машины и нагрузки;
12. R_r – активное сопротивление обмотки фазы второй машины;
13. $\Theta_1=2\pi pr_1$ – круговая частота вращения ротора в электрических радианах в секунду первой машины;
14. $\Theta_2=2\pi pr_2$ – круговая частота вращения ротора в электрических радианах в секунду второй машины.

Выходными сигналами блока IDMG являются (рис. 2.7):

1. i_{s11} – ток первого контура статора первой машины;
2. i_{s12} – ток второго контура статора первой машины;
3. i_{s21} – ток первого контура статора второй машины;
4. i_{s22} – ток второго контура статора второй машины;
5. i_{rl} – ток первого контура ротора;
6. i_{r2} – ток второго контура ротора.

Характер процессов, воспроизводимый описываемой моделью, зависит как от значений, поступающих на вход блока IDMG, так и от выражений для производных (дифференциальных уравнений в форме Коши) в окне First order equations (рис. 2.8).

Для всех вариантов построения СДМГ (табл. 2.2) при неизменных параметрах машин и обмоток модель будет различаться только выражениями в окне First order equations, структура блоков останется прежней.

Система уравнений для размещения ее в окне First order equations блока IDMG определенного варианта СДМГ строится следующим образом.

Из выражений (2.37, 2.38, 2.40, 2.42) выбираются соответствующие

матрицы [L] и [Z]. Создается m – файл в редакторе (рис. 2.9).

В m – файле первой строкой определяются символьные переменные и записываются в символьной форме матрицы [L] и [Z]. Затем для матрицы [L] в символьной форме находится обратная матрица $[L]^{-1}$ (на рис. 2.9 – матрица INVMATR). Далее, также в символьной форме, вычисляются произведения $[L]^{-1}[u]$ и $[L]^{-1}[Z][i]$, находится их разность (на рис. 2.9 – матрицы IU, IZi и REZ, соответственно). Таким образом, система уравнений оказывается приведенной к системе уравнений в форме Коши (2.21), а правая часть системы записана в матрице размерностью $[1 \times 9]$.

В процессе выполнения программы для упрощения полученных выражений используется команда simplify, которая реализует алгоритм упрощения выражений, содержащих тригонометрические функции и символьное возведение в степень.

```

1 - syms Ls1 M1 G1 t Ls2 M2 G2 Lr Rs1 Rs2n Rr w p1 p2 i1 i2 i3 i4 i5 i6 i7 i8 i9 u1 u2 u3
2 - i=[i1;i2;i3;14;i5;i6;i7;i8;i9]
3 - U=[u1;u2;u3;0;0;0;0;0]
4 - L=[3*Ls1,0,0,0,0,0,3*M1*cos(G1*t),3*M1*cos(G1*t+2*pi/3),3*M1*cos(G1*t-2*pi/3);
      0,3*Ls1,0,0,0,0,3*M1*cos(G1*t-2*pi/3),3*M1*cos(G1*t),3*M1*cos(G1*t+2*pi/3);
      0,0,3*Ls1,0,0,0,3*M1*cos(G1*t+2*pi/3),3*M1*cos(G1*t-2*pi/3),3*M1*cos(G1*t);
      0,0,0,3*Ls2,0,0,-3*M2*cos(G2*t),-3*M2*cos(G2*t-2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3);
      0,0,0,0,3*Ls2,0,-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t),-3*M2*cos(G2*t-2*pi/3);
      0,0,0,0,3*Ls2,0,-3*M2*cos(G2*t-2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t);
      3*M1*cos(G1*t),3*M1*cos(G1*t-2*pi/3),3*M1*cos(G1*t+2*pi/3),
      -3*M2*cos(G2*t),-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t-2*pi/3),3*Lr,0,0;
      3*M1*cos(G1*t+2*pi/3),3*M1*cos(G1*t),3*M1*cos(G1*t-2*pi/3),
      -3*M2*cos(G2*t-2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),0,3*Lr,0;
      3*M1*cos(G1*t-2*pi/3),3*M1*cos(G1*t+2*pi/3),3*M1*cos(G1*t),
      -3*M2*cos(G2*t+2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t),-3*M2*cos(G2*t-2*pi/3),-3*M2*cos(G2*t),0,0,3*Lr];
16 - INVMATR=simplify(inv(L))
17 - Z=[3*Rs1,0,0,0,0,-3*G1*M1*sin(G1*t),-3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3);
      0,3*Rs1,0,0,0,-3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t),-3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3);
      0,0,3*Rs1,0,0,-3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t);
      0,0,0,3*Rs2n,0,0,3*G2*M2*sin(G2*t),3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3);
      0,0,0,0,3*Rs2n,0,3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t),3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3);
      0,0,0,0,3*Rs2n,3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t);
      -3*G1*M1*sin(G1*t),-3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3),
      3*G2*M2*sin(G2*t),3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3),3*Rr,0,0;
      -3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t),-3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3),
      3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t),3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3),0,3*Rr,0;
      -3*G1*M1*sin(G1*t-2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t+2*pi/3),-3*G1*M1*sin(G1*t),
      3*G2*M2*sin(G2*t+2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t-2*pi/3),3*G2*M2*sin(G2*t),0,0,3*Rr];
29 - IZ=simplify(INVMATR*Z)
30 - IU=INVMATR*U
31 - IZi=RM*i
32 - REZ=simplify(IU-IZi)
33 -

```

Рис. 2.9. Программа расчета матриц в символьной форме.

Следующим шагом является преобразование переменных математической модели системы (на рис. 2.9 – матрица REZ) в переменные блока IDMG.

Для этого каждой переменной (рис. 2.7) приводится в соответствие переменная блока IDMG и в любом текстовом редакторе, в том числе и в редакторе Matlab, использованием функции "замена" производится замена переменных в соответствии с таблицей 2.3. Полученная система в преобразованных переменных копируется в окно First order equations блока IDMG.

В связи с громоздкостью уравнений, преобразованных для блока IDMG, получаемые выражения не приводятся.

Табл. 2.3. Соответствие переменных математической модели и блока IDMG

Переменные уравнений	Переменные блока IDMG	Переменные уравнений	Переменные блока IDMG
u_{AB}	$u(1)$	i_{s11}	$x(1)$
u_{BC}	$u(2)$	i_{s12}	$x(2)$
u_{CA}	$u(3)$	i_{s13}	$x(3)$
L_{S1}	$u(4)$	i_{s21}	$x(4)$
L_r	$u(5)$	i_{s22}	$x(5)$
L_{S2}	$u(6)$	i_{s23}	$x(6)$
M_1	$u(7)$	i_{r1}	$x(7)$
M_2	$u(8)$	i_{r2}	$x(8)$
T_s	$u(9)$	i_{r3}	$x(9)$
R_{S1}	$u(10)$		
R_{S2n}	$u(11)$		
R_r	$u(12)$		
Θ_1	$u(13)$		
Θ_2	$u(14)$		

2.5. Результаты моделирования СДМГ.

Моделирование процессов в СДМГ производится для выявления особенностей поддержания заданной амплитуды напряжения и постоянной частоты процессов на выходе генератора. Для определения способа поддержания постоянной частоты на выходе СДМГ, используются зависимости частоты выходных процессов от частоты напряжения на

обмотке статора первой машины (обмотке возбуждения). Преобразованием формул, приведенных в табл. 1.1. для частоты нагрузки, получаются функции частоты напряжения питания обмотки возбуждения от частоты вращения ротора (табл. 2.4).

Табл. 2.4. Функции частоты питания обмотки возбуждения.

Тип СДМГ	$f_o(n, f_n)$	
	при $p_1 > p_2$	при $p_1 < p_2$
1	$f_o = f_H - (p_1 - p_2)n$	$f_o = (p_2 - p_1)n - f_H$
2		$f_o = f_H - (p_1 + p_2)n$
3	$f_o = (p_2 - p_1)n - f_H$	$f_o = f_H - (p_1 - p_2)n$
4		$f_o = (p_1 + p_2)n - f_H$

Из табл. 2.4 выясняются два способа поддержания стабильной частоты на выходе СДМГ путем регулирования частоты питающего напряжения обмотки возбуждения:

1. Уменьшение (увеличение) частоты на обмотке возбуждения вслед за увеличением (уменьшением) частоты вращения ротора. Способ применяется для СДМГ:

- первого типа при $p_1 > p_2$,
- второго типа,
- третьего типа при $p_1 < p_2$;

2. Увеличение (уменьшение) частоты на обмотке возбуждения вслед за увеличением (уменьшением) частоты вращения ротора. Способ применяется для СДМГ:

- первого типа при $p_1 < p_2$,
- третьего типа при $p_1 > p_2$;
- четвертого типа.

С использованием указанных выше способов регулирования, при поддержании стабильной частоты на нагрузке, проведены исследования происходящих в СДМГ процессов с использованием Simulink-модели. На

рис. 2.10 представлены процессы на выходе СДМГ при увеличении нагрузки и уменьшении коэффициента мощности.

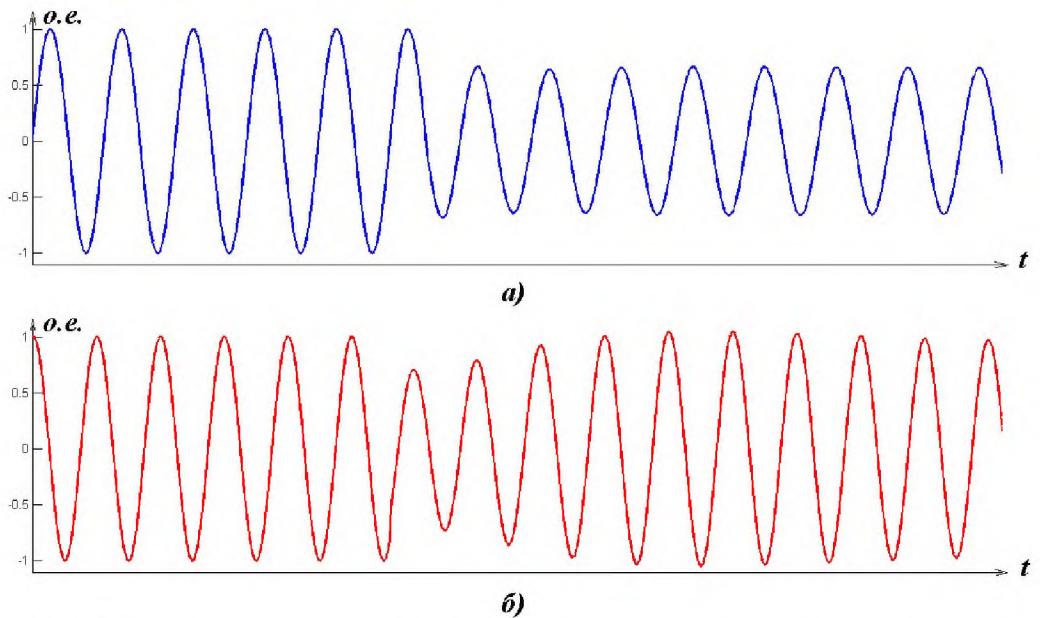


Рис.2.10. Процессы на выходе СДМГ: а) без регулирования, б) с регулированием.

Исследованием модели получены следующие характеристики:

- Внешняя характеристика: определяет зависимость выходного напряжения от тока нагрузки при неизменном напряжении возбуждения, фиксированной частоте выходного напряжения и постоянном коэффициенте мощности (рис.2.11, а);
- Нагрузочная характеристика: показывает, как изменяется напряжение генератора с изменением напряжения возбуждения при условии постоянства тока нагрузки и коэффициента мощности (рис.2.11, б);
- Регулировочная характеристика: показывает, как нужно регулировать напряжение возбуждения генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (рис.2.11, в);
- Регулировочная характеристика по частоте: показывает, как нужно регулировать напряжение возбуждения, чтобы при изменении частоты вращения ротора напряжение на выходе поддерживать заданным при постоянном коэффициенте мощности, неизменной нагрузке и фиксированной выходной частоте (рис.2.11, г).

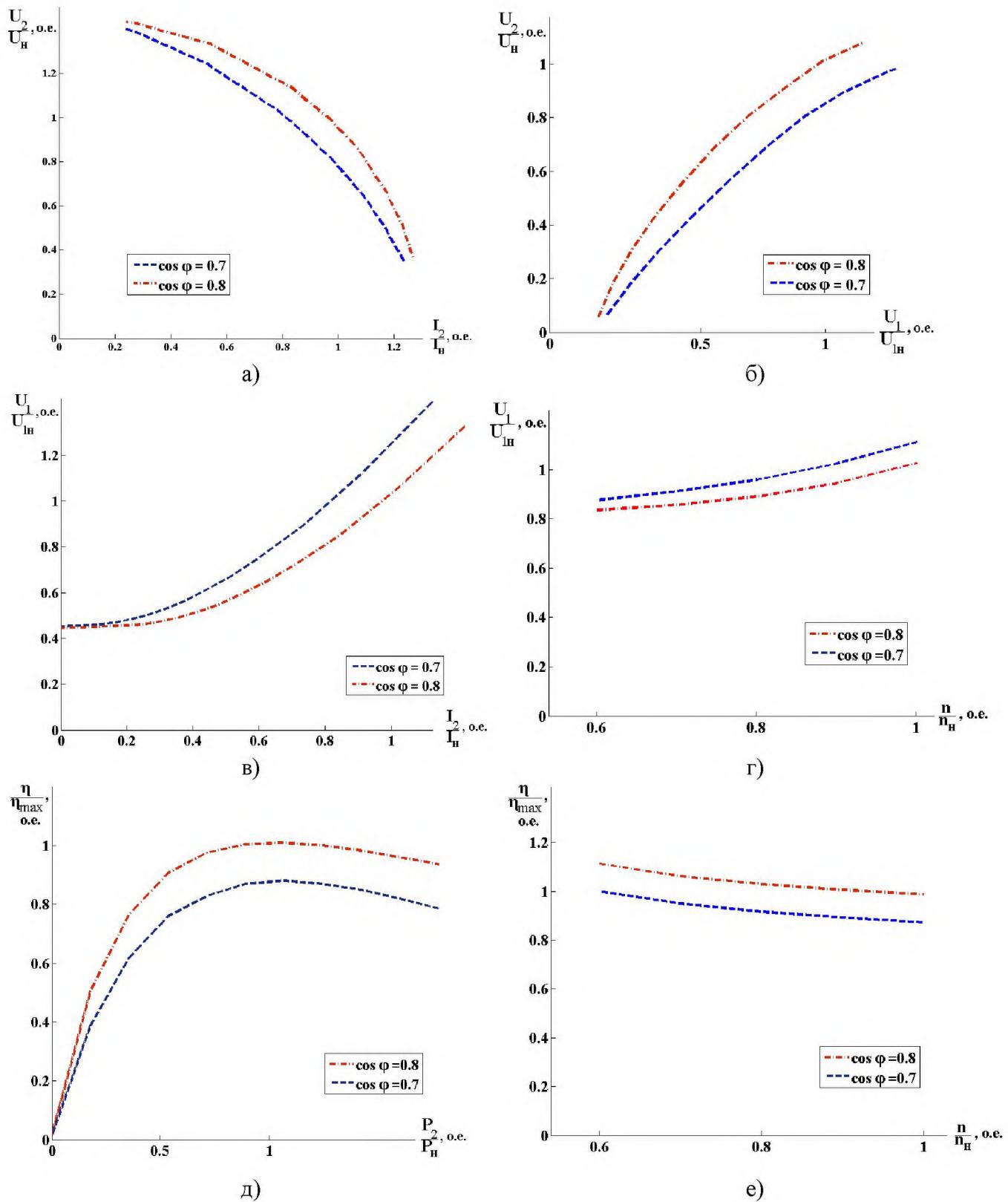


Рис.2.11. Результаты моделирования процессов в СДМГ:

а) внешняя характеристика (при $U_1=\text{const}$, $f_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), б) нагрузочная характеристика (при $I_n=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), в) регулировочная характеристика (при $U_2=\text{const}$, $f_H=\text{const}$), г) регулировочная характеристика по частоте (при $U_2=\text{const}$, $f_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), д) зависимость КПД от мощности нагрузки, е) зависимость КПД от частоты вращения ротора.

Кроме того, были определены зависимости коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки (рис.2.11, д) и от частоты вращения ротора (рис.2.11, е).

Исследование модели проводилось в следующем порядке:

1. Построение внешней характеристики.

Внешняя характеристика построена при неизменном напряжении возбуждения. Момент приводного двигателя пошагово увеличивался от семидесяти процентов номинального значения до тех пор, пока амплитуда напряжения на выходе не станет ниже сорока процентов номинального выходного напряжения генератора. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с установленным коэффициентом мощности при обеспечении постоянной частоты на выходе генератора. После этого напряжение и ток на выходе генератора фиксируются, и момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу исследования внешней характеристики.

2. Построение нагрузочной характеристики.

Нагрузочная характеристика генератора строится при поддержании постоянной величины выходного тока генератора. При пошаговом изменении нагрузки генератора обеспечивается постоянный коэффициент мощности и частота выходного напряжения. Регулировкой напряжения возбуждения на каждом шаге достигается необходимая величина выходного тока. Значения напряжения возбуждения и выходное напряжение генератора фиксируются. Далее происходит переход к следующему шагу исследования нагрузочной характеристики.

3. Построение регулировочной характеристики.

Регулировочная характеристика построена при поддержании постоянной величины напряжения на выходе генератора. Момент приводного двигателя пошагово увеличивается. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с установленным коэффициентом мощности при обеспечении постоянной частоты на выходе генератора, а также

подстраивается напряжение возбуждения до достижения выходным напряжением заданного значения. После этого напряжение возбуждения и ток на выходе генератора фиксируются, и момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу исследования регулировочной характеристики.

4. Построение регулировочной характеристики по частоте.

Регулировочная характеристика по частоте строится при постоянном коэффициенте мощности и неизменной нагрузке. Момент приводного двигателя пошагово увеличивается. При этом увеличивается частота вращения ротора и, соответственно, частота выходного напряжения. Для поддержания частоты выходного напряжения стабильной производится подстройка частоты напряжения возбуждения. При этом происходит изменение напряжения на выходе генератора. Подстройкой величины напряжения возбуждения достигается требуемое значение выходного напряжения. Величины напряжения возбуждения и частоты вращения ротора фиксируются, далее происходит переход к следующему шагу исследований регулировочной характеристики по частоте.

5. Построение зависимости коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки.

Зависимости коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки определяется при поддержании постоянной величины напряжения на выходе генератора. Момент приводного двигателя пошагово увеличивается. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с установленным коэффициентом мощности при обеспечении постоянной частоты на выходе генератора, а также подстраивается напряжение возбуждения до достижения выходным напряжением заданного значения. После этого вычисляется мощность на нагрузке, потери в генераторе (в том числе и на возбуждение), и подводимая механическая мощность. Коэффициент полезного действия генератора вычисляется как отношение мощности, выделяемой на нагрузке к полной подводимой к генератору

мощности. Далее момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу построения зависимости.

6. Построение зависимости коэффициента полезного действия системы от частоты вращения ротора.

Зависимость коэффициента полезного действия системы от частоты вращения ротора определяется при поддержании постоянной величины напряжения и частоты на выходе генератора, при постоянном коэффициенте мощности и неизменной нагрузке. Момент приводного двигателя пошагово увеличивается. При этом увеличивается частота вращения ротора и, соответственно, частота выходного напряжения. Для поддержания частоты выходного напряжения стабильной производится подстройка частоты напряжения возбуждения. При этом происходит изменение напряжения на выходе генератора. Подстройкой величины напряжения возбуждения достигается требуемое значение выходного напряжения. После этого вычисляется мощность на нагрузке, потери в генераторе (в том числе и на возбуждение), и подводимая механическая мощность. Коэффициент полезного действия генератора вычисляется как отношение мощности, выделяемой на нагрузке к полной подводимой к генератору мощности. Далее момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу построения зависимости.

Помимо представленных выше характеристик при проведении исследований была построена зависимость выходной мощности генератора от сопротивления нагрузки. При нормировании этой зависимости и представлении ее графика на одной координатной плоскости с графиком зависимости КПД от величины нагрузки (рис.2.12) определено, что режимы максимальной мощности и максимального КПД при прочих равных условиях соответствуют различным величинам нагрузки генератора.

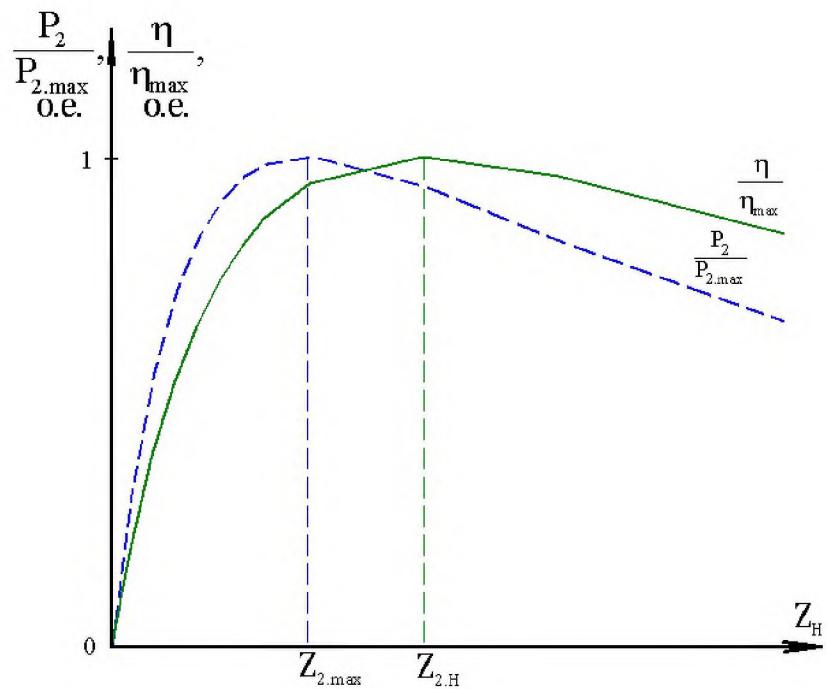


Рис. 2.12. Выбор нагрузки генератора.

Из графиков видно, что для достижения максимального КПД генератора целесообразно его работу на нагрузку $Z_{2,H}$, а для выработки генератором максимальной мощности – на нагрузку $Z_{2,\max}$. Величины $Z_{2,\max}$ и $Z_{2,H}$ в зависимости от параметров обмоток электрических машин, входящих в СДМГ и типа СДМГ будут различаться, но последовательность их расположения на координатной оси останется без изменений.

ВЫВОДЫ:

1. Предложено теоретическое описание электротехнического комплекса на базе двух асинхронных машин совмещенных в общем магнитопроводе системой дифференциальных уравнений замкнутых контуров, включающей в себя уравнения разнополюсных электрических машин и параметры нагрузки, позволяющей уменьшить количество уравнений в системе;

2. Установлено, что в зависимости от варианта соединения обмоток на роторе, взаимного направления вращения ротора и поля возбуждения свойства СДМГ различаются. В связи с этим произведена классификация по типам СДМГ, выявлены особенности их математических моделей, получены выражения для синхронных частот вращения ротора, уточнены способы поддержания стабильной частоты;

3. В результате исследования модели получены внешняя, нагрузочная и регулировочная характеристики генератора, а также зависимость КПД от мощности нагрузки, которые имеют внешнее сходство с аналогичными характеристиками синхронного генератора. Это позволяет сделать вывод о возможности замены электротехнических комплексов на базе синхронных генераторов на электротехнические комплексы на базе совмещенного двухмашинного генератора;

4. Преимуществом применения электротехнических комплексов на основе совмещенного двухмашинного генератора является возможность регулирования частоты выходного напряжения за счет изменения частоты напряжения возбуждения и получение вследствие этого напряжения заданной частоты на выходе генератора без применения полупроводниковых преобразователей;

5. В зависимости от назначения комплекса, возможно применение генератора, как в режиме максимальной мощности, так и в режиме максимального КПД. Режим работы определяется величиной нагрузки совмещенного двухмашинного генератора.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В СДМГ.

3.1. Расчет индуктивностей и сопротивлений.

Свойства электрических машин, имеющих одинаковые габариты, размеры магнитопровода, форму и количество пазов на статоре и роторе; будут различаться при различном исполнении их обмоток. Изменение параметров обмотки влияет на индуктивности обмоток, в том числе и индуктивности рассеяния; и на величины их сопротивлений.

Для исследования влияния параметров обмотки с использованием вычислительных мощностей персональных ЭВМ необходимым является преобразование выражений индуктивностей и сопротивлений, входящих в уравнения контуров электрических машин, к виду, удобному для применения в программных алгоритмах. С этой целью величины, не меняющиеся в процессе вычислений, должны рассчитываться в начале программы и представляться в виде коэффициентов. В уравнениях электрической машины используются и далее преобразуются: главные индуктивности фазы статора и ротора, максимальная взаимная индуктивность фаз статора и ротора, индуктивность рассеяния фазы статора и ротора, активные сопротивления статора и ротора [47].

Выражение для главной индуктивности фазы статора [47]:

$$L_A = \frac{4\mu_0}{\pi^2 p} (w_s k_{os})^2 \frac{\tau_s l_\delta}{\delta k_\delta}, \quad (3.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, k_δ – коэффициент зазора, p – количество пар полюсов, l_δ – эквивалентная длина магнитопровода, w_s – количество витков в

фазе статора, δ – ширина зазора, τ_s – полюсное расстояние статора и ротора; k_{os} – обмоточный коэффициент фазы статора.

Обмоточный коэффициент фазы статора определяется по формуле:

$$k_{os} = \frac{\sin\left(\frac{y_s \pi}{2\tau_s}\right) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q_s \sin\left(\frac{\pi}{6q_s}\right)},$$

где y_s – шаг обмотки статора, q_s – количество катушек на полюс и фазу статора.

Выражение для главной индуктивности фазы ротора [47]:

$$L_a = \frac{4\mu_0}{\pi^2 p} (w_r k_{or})^2 \frac{\tau_r l_\delta}{\delta k_\delta}, \quad (3.2)$$

где w_r – количество витков в фазе ротора, τ_r – полюсное расстояние ротора, k_{or} – обмоточный коэффициент фазы ротора.

Обмоточный коэффициент фазы ротора определяется по формуле:

$$k_{or} = \frac{\sin\left(\frac{y_r \pi}{2\tau_r}\right) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q_r \sin\left(\frac{\pi}{6q_r}\right)},$$

где y_r – шаг обмотки ротора, q_r – количество катушек на полюс и фазу ротора.

Максимальная взаимная индуктивность фазы статора и ротора [47]:

$$M = \frac{4\mu_0}{\pi^2 p} (w_s k_{os} w_r k_{or}) \frac{\tau_l \delta}{\delta k_\delta}. \quad (3.3)$$

Индуктивность рассеяния фазы статора [47]:

$$L_{ss} = 2\mu_0 w_s^2 \frac{l_\delta}{pq_s} \lambda_{ss}, \quad (3.4)$$

где $\lambda_{\sigma s}$ – коэффициент проводимости для потокосцепления рассеяния статора.

Выражение для индуктивности рассеяния фазы ротора [47]:

$$L_{\sigma r} = 2\mu_0 w_r^2 \frac{l_\delta}{pq_r} \lambda_{\sigma r}, \quad (3.5)$$

где $\lambda_{\sigma r}$ – коэффициент проводимости для потокосцепления рассеяния ротора.

Для преобразования выражений (3.1) – (3.5) используются соотношения:

$$w_s = 2pq_s w_{ks}, \tau_s = \frac{Z_s}{2p}, \tau = \frac{\pi D}{2p}, w_r = 2pq_r w_{kr}, \tau_r = \frac{Z_r}{2p}, Z_s = 6pq_s, Z_r = 6pq_r, \quad (3.6)$$

где w_{ks} – количество витков в катушке статора, w_{kr} – количество витков в катушке ротора, D – диаметр зазора.

Подстановкой (3.6) в выражения (3.1) – (3.5) и проведением преобразований получаются выражения для индуктивностей электрической машины, удобные для исследования влияния параметров обмотки на энергетические соотношения в СДМГ:

– главная индуктивность фазы статора:

$$L_{SA} = C_0 C_{L_{SA}} w_{ks}^2, \quad (3.7)$$

где

$$C_0 = \frac{8 \cdot 10^{-7} D l_\delta}{\delta k_\delta}, \quad C_{L_{SA}} = \frac{\sin^2 \left(\frac{y_s \pi p}{Z_s} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\pi p}{Z_s} \right)}; \quad (3.8)$$

– главная индуктивность фазы ротора:

$$L_{RA} = C_0 C_{L_{RA}} w_{kr}^2, \quad (3.9)$$

где

$$C_{L_{RA}} = \frac{\sin^2\left(\frac{y_r \pi p}{Z_r}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi p}{Z_r}\right)}; \quad (3.10)$$

– максимальная взаимная индуктивность фаз статора и ротора:

$$M = C_0 C_M w_{ks} w_{kr}, \quad (3.11)$$

где

$$C_M = \frac{\sin\left(\frac{y_s \pi p}{Z_s}\right) \sin\left(\frac{y_r \pi p}{Z_r}\right)}{\sin\left(\frac{\pi p}{Z_s}\right) \sin\left(\frac{\pi p}{Z_r}\right)}; \quad (3.12)$$

– индуктивность рассеяния фазы статора:

$$L_{S\sigma} = C_{L_{S\sigma}} w_{ks}^2, \quad (3.13)$$

где

$$C_{L_{S\sigma}} = \frac{16\pi \cdot 10^{-7}}{3} Z_s l_\delta \lambda_{\sigma s}; \quad (3.14)$$

– индуктивность рассеяния фазы ротора:

$$L_{R\sigma} = C_{L_{R\sigma}} w_{kr}^2, \quad (3.15)$$

где

$$C_{L_{R\sigma}} = \frac{16\pi \cdot 10^{-7}}{3} Z_r l_\delta \lambda_{\sigma r}. \quad (3.16)$$

Коэффициент C_0 в выражениях (3.7), (3.9), (3.11) для электрической машины с определенными размерами магнитопровода и воздушного зазора и коэффициенты $C_{L_{S\sigma}}, C_{L_{R\sigma}}$ в выражениях (3.13), (3.15) являются постоянными. Коэффициенты $C_{L_{SA}}, C_{L_{RA}}, C_M$ (3.8), (3.10), (3.12) зависят от количества пар полюсов и шага обмотки. Для случая, когда подобраны и шаг обмотки, и количество пар полюсов – коэффициенты $C_{L_{SA}}, C_{L_{RA}}, C_M$ являются постоянными.

Для расчета сопротивлений фазных обмоток используется справочные данные о сопротивлении 1 метра обмоточного провода в соответствии с его маркой и диаметром жилы.

Формулы для вычисления сопротивлений в этом случае:

$$R_s = C_{R_s} w_{ks}, \quad (3.17)$$

где

$$C_{R_s} = r_s \frac{Z_s}{3} \left(4 \cdot \sqrt{0.01 \frac{\pi^2 y_s^2 D^2}{Z_s^2} + h_{ks}^2} + \frac{1.6 \pi y_s D}{Z_s} + 2l_\delta \right), \quad (3.18)$$

r_s – сопротивление 1 метра обмоточного провода статора,

h_{ks} – высота лобовой части катушки статора.

$$R_r = C_{R_r} w_{kr}, \quad (3.19)$$

где

$$C_{R_r} = r_r \frac{Z_r}{3} \left(4 \cdot \sqrt{0.01 \frac{\pi^2 y_r^2 D^2}{Z_r^2} + h_{ks}^2} + \frac{1.6 \pi y_r D}{Z_r} + 2l_\delta \right), \quad (3.20)$$

r_r – сопротивление 1 метра обмоточного провода статора,

h_{kr} – высота лобовой части катушки статора и ротора.

Коэффициенты C_{R_s}, C_{R_R} в выражениях (3.12), (3.13) зависят как от параметров магнитопровода, так и от параметров обмотки: сопротивления провода, шага обмотки, высоты лобовой части катушки. В случае, когда указанные параметры заданы и неизменны на протяжении исследований, эти коэффициенты остаются постоянными.

3.2. Программа и модель для исследования энергетических соотношений в СДМГ.

Исследование энергетических соотношений проводится с целью определения возможных вариантов расположения обмоток в пазах магнитопровода для получения энергетически выгодных условий работы СДМГ. В качестве исходных условий принимается, что неизменными являются параметры магнитопроводов электрической машины, параметры обмоток, кроме количества витков в катушках. Количество витков катушек каждой обмотки в процессе исследования изменяется.

Энергетические соотношения в СДМГ исследуются с помощью программы, составленной в редакторе Matlab. Программа использует модель СДМГ (рис.3.1), аналогичную представленной выше (рис.2.7). Отличие преобразованной модели в том, что в ней величины параметров считываются из рабочего пространства Workspase, данные в которое поступают либо при ручном вводе в окне Command Window, либо при присвоении соответствующим параметрам значений в процессе выполнения программы в редакторе.

Для проведения исследований энергетических зависимостей используется второй вариант передачи величин в пространство Workspase - программой на определенных этапах выполнения алгоритма величинам, используемым в модели, присваиваются необходимые значения. В момент

запуска модели все необходимые параметры находятся в рабочем пространстве Workspase.

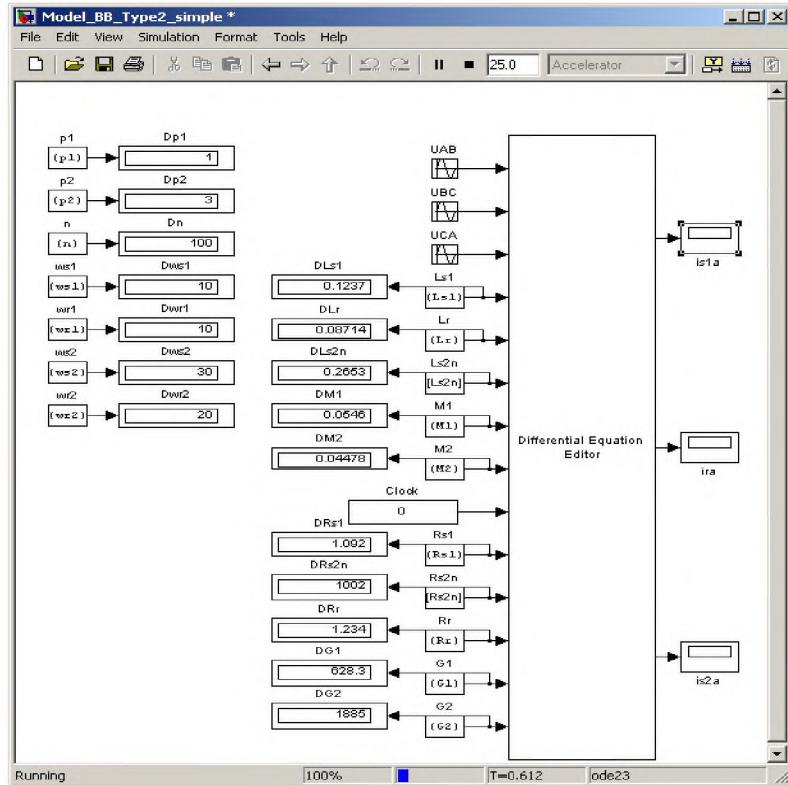


Рис. 3.1. Модель для исследования энергетических характеристик.

Для контроля считанных из рабочего пространства значений величин в составе модели используются стандартные блоки Display, часть из которых отображает параметры на входе блока Differential Equation Editor, а остальные – справочную информацию о количестве пар полюсов, частоте вращения ротора, количестве витков в катушках электрических машин.

Выходными величинами модели являются выборки значений токов обмоток электрических машин, которые сохраняются автоматически в рабочее пространство Workspase при временных остановках симуляции (нажатием кнопки «pause» в окне модели, либо подачей соответствующей команды при выполнении алгоритма), или при окончании времени симуляции, указанном в отдельном окне на панели инструментов редактора модели.

Основные этапы работы программы определения энергетических соотношений представляются на рис. 3.2.

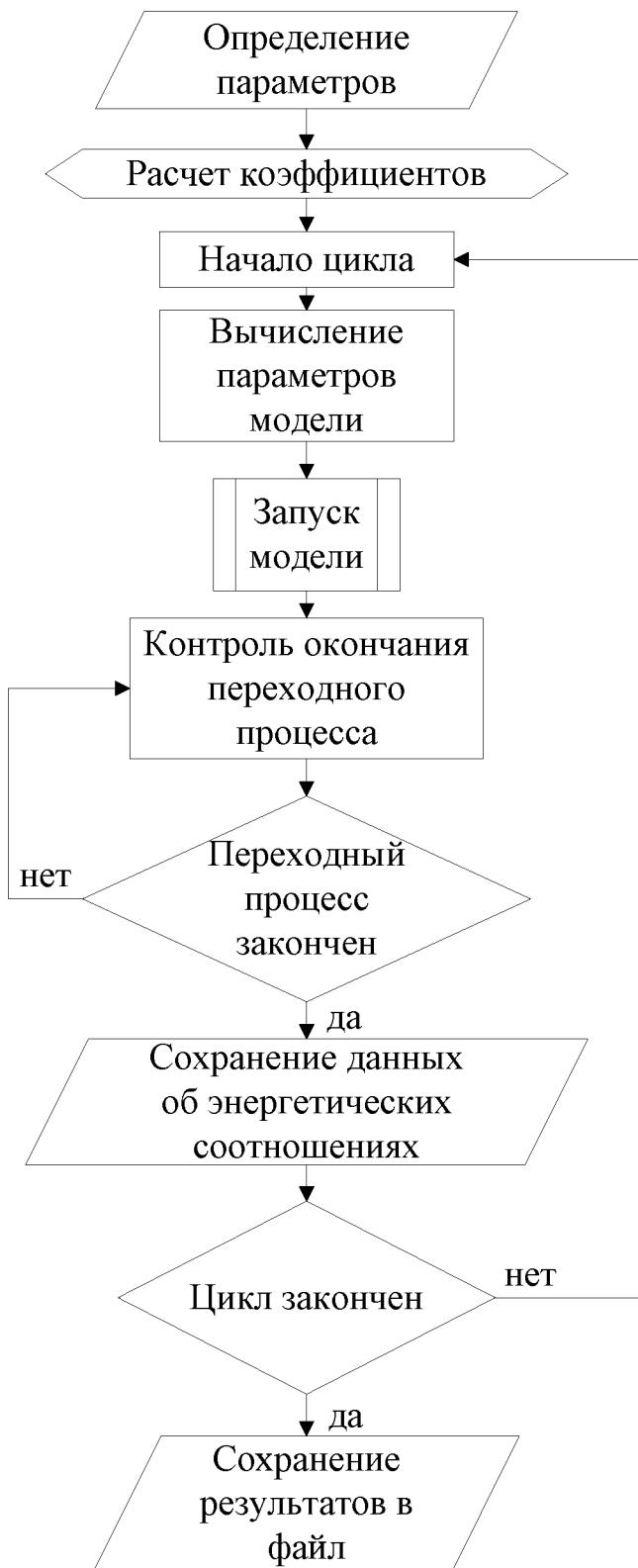


Рис. 3.2. Алгоритм работы программы определения энергетических соотношений

В соответствии с алгоритмом, после запуска программы происходит определение переменных электрических машин и вычисление необходимых констант (рис.3.3) по формулам (3.8, 3.10, 3.12, 3.14, 3.16, 3.18, 3.20). О назначении каждой переменной указывается в комментарии, расположенных справа от оператора присваивания.

```

1 % Ввод переменных машины
2 lamdas1=3.5; lamdar1=3.6;
3 lamdas2=3.5; lamdar2=3.6;
4 Rn=1000; Ln=1.0 %Сопротивление и индуктивность фазы нагрузки
5 D=0.14805 %м, Диаметр зазора
6 lmp=0.35 %Длина магнитопровода
7 ShirinaZazora=0.00055 %Ширина зазора
8 KZazora=1.3 %Коэффициент зазора
9 ZSt=36; ZRt=24 %Количество пазов статора и ротора
10 p1=1; p2=3; %Количество пар полюсов первой и второй машины
11 ys1=12; yr1=8 %Шаг катушки обмотки статора и ротора первой машины
12 ys2=5; yr2=3 %Шаг катушки обмотки статора и ротора второй машины
13 rps1=0.017508; rpr1=0.015773 %Сопротивление 1 м провода статора и ротора первой машины
14 rps2=0.017400; rpr2=0.010182 %Сопротивление 1 м провода статора и ротора второй машины
15 hk=0.04 %Высота лобовой части
16 yms1=ys1*D*pi/ZSt; %Шаг катушки в метрах статора первой машины
17 ymr1=yr1*D*pi/ZRt; %Шаг катушки в метрах ротора первой машины
18 yms2=ys2*D*pi/ZSt; %Шаг катушки в метрах статора второй машины
19 ymr2=yr2*D*pi/ZRt; %Шаг катушки в метрах ротора второй машины
20 lws1=4*hk+2*yms1+2*lmp %Длина витка провода катушки статора первой машины
21 lws2=4*hk+2*yms2+2*lmp %Длина витка провода катушки статора второй машины
22 lwr1=4*(0.01*ymr1^2+hk^2)^(0.5)+1.6*ymr1+2*lmp %Длина витка катушки ротора первой машины
23 lwr2=4*(0.01*ymr2^2+hk^2)^(0.5)+1.6*ymr2+2*lmp %Длина витка катушки ротора второй машины
24 %Отношение синусов в формулах индуктивностей
25 ks1=sin(ys1*p1*pi/ZSt)/sin(pi*p1/ZSt) %статор первой машины
26 kr1=sin(yr1*p1*pi/ZRt)/sin(pi*p1/ZRt) %ротор первой машины
27 ks2=sin(ys2*p2*pi/ZSt)/sin(pi*p2/ZSt) %статор второй машины
28 kr2=sin(yr2*p2*pi/ZRt)/sin(pi*p2/ZRt) %ротор второй машины
29 EMC=0.0000008*Dzazora*lmp/ShirinaZazora/KZazora %Константа для ЗИ

```

Рис. 3.3. Определение переменных и вычисление констант.

После подготовки данных, которые в процессе работы программы не изменяются, осуществляется перебор количества витков катушки для каждой обмотки с определенным шагом. На каждом шаге цикла программы вычисляются индуктивности и сопротивления обмоток (рис.3.4) в соответствии с выражениями (3.7, 3.11, 3.13, 3.15, 3.17, 3.19).

```

51 -    massiveobrjacio(1:7,1:7,1:7,1:7,1:3)=0;
52 -    for n=100:25:100
53 -        G1=2*pi*p1*n;
54 -        G2=2*pi*p2*n;
55 -        for ws1n = 1:7
56 -            ws1=10+(ws1n-1)*10;
57 -            Ls1=Ls1+ws1^2;
58 -            Rs1=rs1+ws1;
59 -            for wr1n = 1:7
60 -                wr1=10+(wr1n-1)*10;
61 -                Lr1=lrl1*wr1^2;
62 -                Rr1=rri1*wr1;
63 -                M1=m1*ws1*wr1;
64 -                for wr2n = 1:7
65 -                    wr2=10+(wr2n-1)*10;
66 -                    Lr2=lrl2*wr2^2;
67 -                    Rr2=rri2*wr2;
68 -                    Rr=Rr1+Rr2;
69 -                    Lr=Lrl1+Lr2;
70 -                    for ws2n = 1:7
71 -                        ws2=10+(ws2n-1)*10;
72 -                        Ls2n=Ls2*ws2^2+Ln;
73 -                        Rs2n=rs2*ws2+Rn;
74 -                        M2=m2*ws2*wr2;
75 -                end;

```

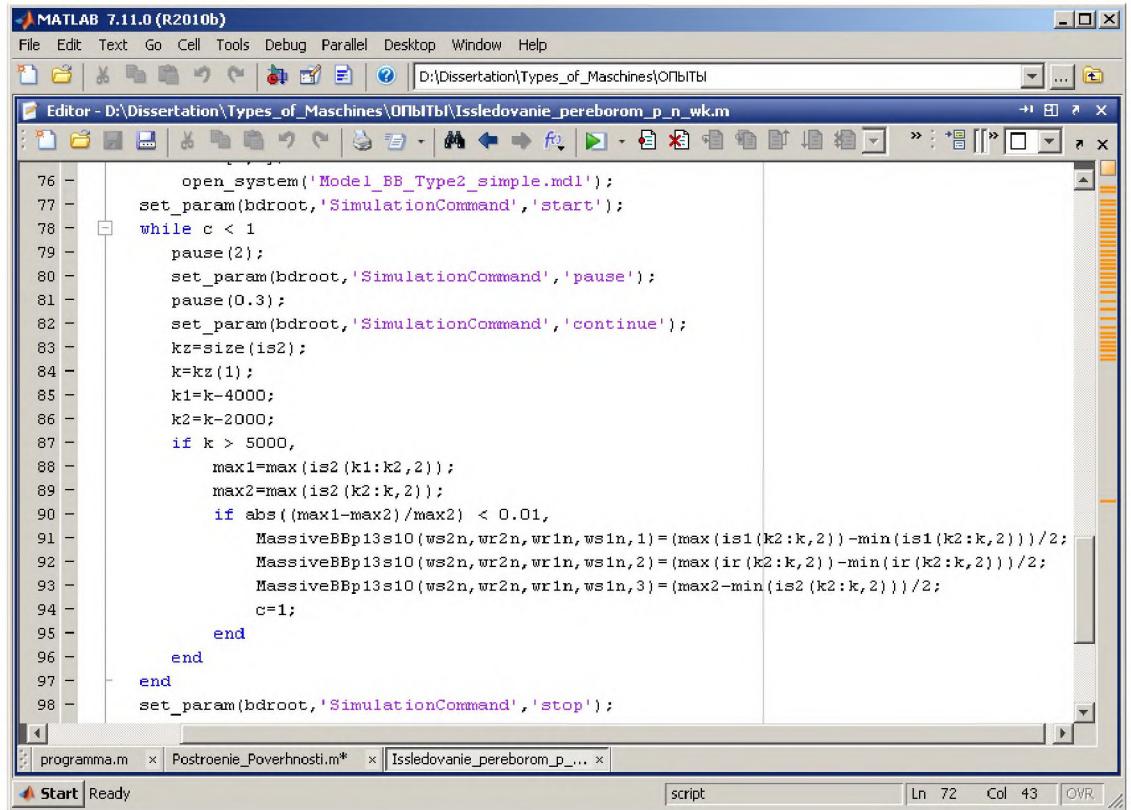
Рис. 3.4. Вычисление индуктивностей и сопротивлений в цикле.

В теле цикла (рис.3.5) с помощью инструкции `open_system('Model_BB_Type2_simple_f0.mdl')` происходит открытие файла, содержащего модель СДМГ. Запуск симуляции открытой модели осуществляется по инструкции `set_param(bdroot,'SimulationCommand','start')`.

Далее по программе происходит определение момента окончания переходного процесса. Для этого используется цикл `while` (строка 78 – 97 на рис.3.5), выход из которого происходит при нарушении условия цикла. В рассматриваемой программе условие нарушается при обнаружении программой установившегося режима тока в модели (строка 94).

Для определения установившегося режима программой периодически останавливается симуляция процессов модели инструкцией `set_param(bdroot,'SimulationCommand','pause')`, а затем инструкцией `set_param(bdroot,'SimulationCommand','continue')` после паузы снова запускается. Подобная остановка необходима для передачи в рабочее пространство Workspace массивов данных, образованных моделью, которые

в численном виде содержат информацию о величинах токов на каждом шаге симуляции. Анализ достижения установившегося процесса проводится только после 5000 шага симуляции. Это позволяет набрать достаточное количество измерений для определения установившегося режима.



```

MATLAB 7.11.0 (R2010b)
File Edit Text Go Cell Tools Debug Parallel Desktop Window Help
D:\Dissertation\Types_of_Maschines\ОпыТбл\Issledovanie_pereborom_p_n_wk.m
Editor - D:\Dissertation\Types_of_Maschines\ОпыТбл\Issledovanie_pereborom_p_n_wk.m
76 -         open_system('Model_BB_Type2_simple.mdl');
77 -         set_param(bdroot,'SimulationCommand','start');
78 -         while c < 1
79 -             pause(2);
80 -             set_param(bdroot,'SimulationCommand','pause');
81 -             pause(0.3);
82 -             set_param(bdroot,'SimulationCommand','continue');
83 -             kzzsize(is2);
84 -             k=kz(1);
85 -             k1=k-4000;
86 -             k2=k-2000;
87 -             if k > 5000,
88 -                 max1=max(is2(k1:k2,2));
89 -                 max2=max(is2(k2:k,2));
90 -                 if abs((max1-max2)/max2) < 0.01,
91 -                     MassiveBBp13s10(ws2n,wr2n,wr1n,ws1n,1)=(max(is1(k2:k,2))-min(is1(k2:k,2)))/2;
92 -                     MassiveBBp13s10(ws2n,wr2n,wr1n,ws1n,2)=(max(ir(k2:k,2))-min(ir(k2:k,2)))/2;
93 -                     MassiveBBp13s10(ws2n,wr2n,wr1n,ws1n,3)=(max2-min(is2(k2:k,2)))/2;
94 -                     c=1;
95 -                 end
96 -             end
97 -         end
98 -         set_param(bdroot,'SimulationCommand','stop');

```

The screenshot shows the MATLAB 7.11.0 interface with the 'Editor' window open. The code in the editor is a script named 'Issledovanie_pereborom_p_n_wk.m'. The script performs the following steps:
1. Opens a Simulink model named 'Model_BB_Type2_simple.mdl'.
2. Sets the simulation command to 'start'.
3. Enters a 'while' loop where 'c' is less than 1.
4. Pauses the simulation for 2 seconds.
5. Sets the simulation command to 'pause'.
6. Pauses the script for 0.3 seconds.
7. Sets the simulation command to 'continue'.
8. Checks the size of matrix 'is2'.
9. Sets variable 'k' to the first element of 'kz'.
10. Sets 'k1' to 'k-4000' and 'k2' to 'k-2000'.
11. Checks if 'k' is greater than 5000.
12. If true, calculates 'max1' and 'max2' as the maximum values of columns 1 and 2 of submatrix 'is2' from index 'k1' to 'k2'.
13. If the absolute difference between 'max1' and 'max2' divided by 'max2' is less than 0.01, it performs the following:
 a. Calculates 'MassiveBBp13s10' for submatrix 'ws2n', 'wr2n', 'wr1n', 'ws1n' and column 1 as the average of columns 1 and 2 of 'is1' from index 'k2' to 'k'.
 b. Calculates 'MassiveBBp13s10' for submatrix 'ws2n', 'wr2n', 'wr1n', 'ws1n' and column 2 as the average of columns 1 and 2 of 'ir' from index 'k2' to 'k'.
 c. Calculates 'MassiveBBp13s10' for submatrix 'ws2n', 'wr2n', 'wr1n', 'ws1n' and column 3 as the average of columns 1 and 2 of 'is2' from index 'k2' to 'k'.
 d. Sets variable 'c' to 1.
14. Ends the inner 'if' block.
15. Ends the 'while' loop.
16. Sets the simulation command to 'stop'.
The status bar at the bottom indicates 'Ready' and the current line and column numbers.

Рис. 3.5. Вызов модели и ожидание установившегося режима.

Установившийся режим определяется по амплитудам тока на двух интервалах размером в 2000 шагов симуляции. За установившийся режим принимается разница амплитуд токов на рассматриваемых участках на величину не более одного процента. При выявлении установившегося режима, амплитуды токов сохраняются в массив данных. После выхода из цикла `while` инструкцией `set_param(bdroot,'SimulationCommand','stop')` симуляция модели останавливается. Далее программа переходит к следующему шагу цикла.

Если в процессе перебора всех возможных комбинаций витков второй машины при фиксированном количестве витков первой машины

обнаруживается явный максимум, то по окончании циклов по виткам статора и ротора второй машины участок с максимумом исследуется с единичным шагом для точного определения точки максимума (рис 3.6). Алгоритм вычислений при этом аналогичен описанному выше.

```

104 -         for wr2n = 1:19
105 -             wr2=Mwr2-10+wr2n;Lr2=Lr2*wr2^2;
106 -             Rr2=rr2*wr2;
107 -             Rr=Rr1+Rr2;
108 -             Lr=Lr1+Lr2;
109 -             for ws2n = 1:19
110 -                 ws2=Mws2-10+ws2n;Ls2n=ls2*ws2^2+Ln;
111 -                 Rs2n=rs2*ws2+Rn;
112 -                 M2=m2*ws2*wr2;
113 -                 is2=[0,0];
114 -                 open_system('Model_BB_Type2_simple.mdl');
115 -                 set_param(bdroot,'SimulationCommand','start');
116 -                 while c < 1
117 -                     pause(1);
118 -                     set_param(bdroot,'SimulationCommand','pause');
119 -                     pause(0.3);
120 -                     set_param(bdroot,'SimulationCommand','continue');
121 -                     kz=size(is2);
122 -                     k=kz(1);
123 -                     k1=k-4000;
124 -                     k2=k-2000;
125 -                     if k > 5000,
126 -                         max1=max(is2(k1:k2,2));
127 -                         max2=max(is2(k2:k,2));
128 -                         if abs((max1-max2)/max2) < 0.01,
129 -                             MaxMas(ws2n,wr2n,1)=(max(is1(k2:k,2))-min(is1(k2:k,2)))/2;
130 -                             MaxMas(ws2n,wr2n,2)=(max(ir(k2:k,2))-min(ir(k2:k,2)))/2;
131 -                             MaxMas(ws2n,wr2n,3)=(max2-min(is2(k2:k,2)))/2;
132 -                             P=((MaxMas(ws2n,wr2n,3))^2)*Zn/MaxMas(ws2n,wr2n,1)/us1;
133 -                             MaxMas(ws2n,wr2n,4)=P;
134 -                             c=1;
135 -                         end
136 -                     end
137 -                 end
138 -                 set_param(bdroot,'SimulationCommand','stop');

```

Рис. 3.6. Исследование области максимума.

Полученные данные при этом сохраняются в отдельный массив и по окончании исследования – в файл с соответствующим названием для возможности более подробного изучения этой области в дальнейшем.

Далее – по циклу происходит перебор возможных комбинаций количества витков для первой машины и, соответственно, для них – в таком же порядке количества витков катушки второй машины.

Таким образом, исследуются все возможные комбинации количества витков в катушках обмоток машин из состава СДМГ.

По окончании исследования данные в виде массива сохраняются в файл.

3.3. Результаты исследования влияния параметров обмоток на энергетические соотношения.

Итогом работы программы, описанной в п.3.2, является массив со значениями токов всех обмоток, мощности нагрузки и мощности возбуждения. Программа в процессе своей работы последовательно перебирает количество витков в катушках обмоток входящих в состав СДМГ электрических машин, изменяя их значения циклически от минимального до максимально выбранного значения с установленным шагом. При этом для иллюстрации промежуточного результата работы предусматривается построение поверхности выходной мощности или коэффициента полезного действия, как функцию от количества витков двух обмоток при фиксированных остальных. Поверхность строится во всей области изменения выбранных параметров, используя сохраненные в массиве данные.

Поверхности, получаемые во время работы программы, подразделяются на две категории: с явным максимумом в пределах поверхности и без максимума в пределах поверхности.

Поверхности, не имеющие максимума, как правило, монотонно возрастают, или убывают в пределах заданной области (рис.3.7). Поверхности такого рода характеризуют, как правило, неблагоприятные в энергетическом отношении сочетания количества витков в катушках обмоток. Для проведения дальнейших исследований такие поверхности не используются.

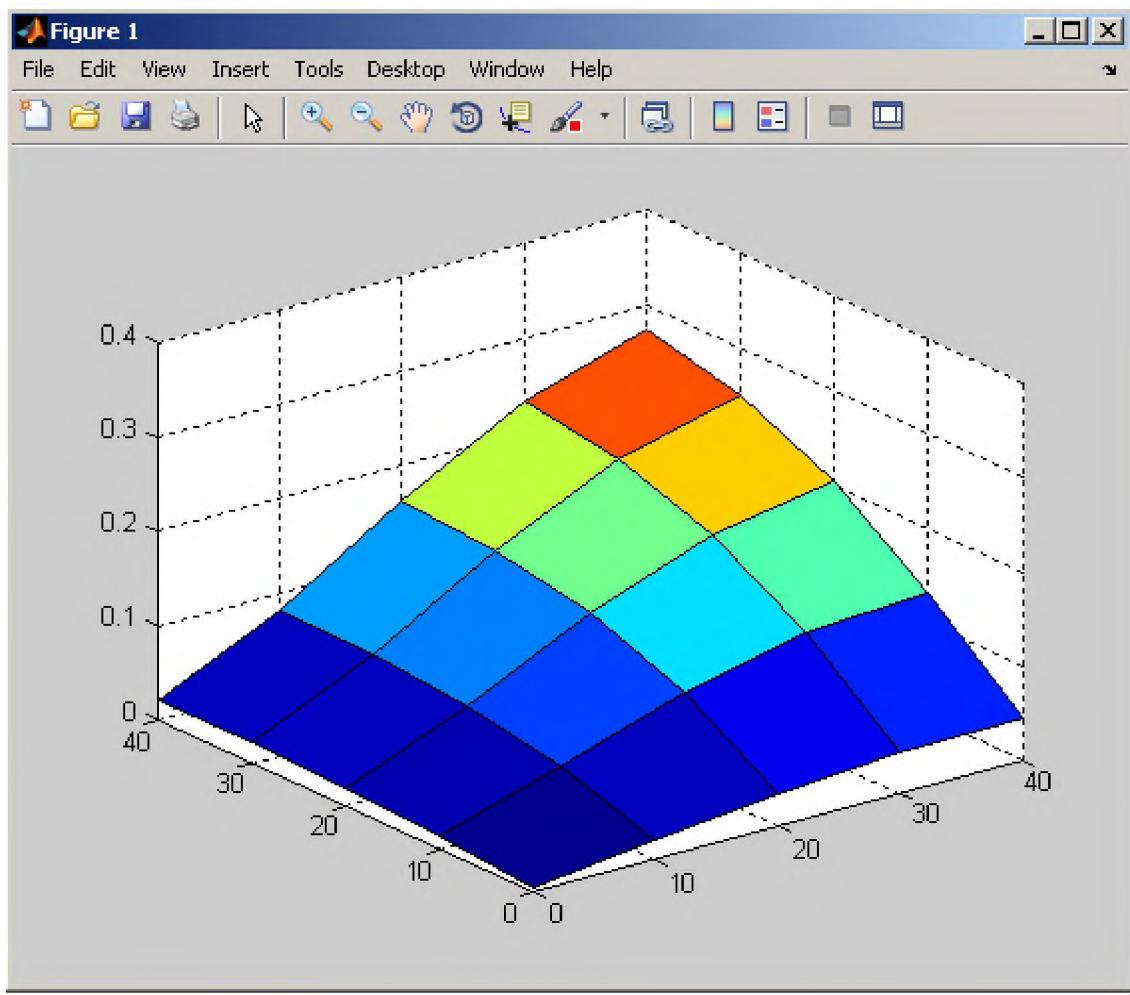


Рис. 3.7. Монотонно возрастающая поверхность.

Поверхности, имеющие максимум в пределах выбранной области (рис.3.8), в большинстве случаев указывают на хорошие энергетические показатели. Для определения локального максимума среди значений полученных выборок исследуемой функции выбирается наибольшее, определяются ее координаты (количество витков в катушке обмотки) и определяется область поиска максимума в зависимости от изначально выбранного шага. Поиск максимального значения в области поиска выполняется отдельной подпрограммой, действующей по аналогичному описанному выше алгоритму с той лишь разницей, что при поиске выбирается минимальный заданный в программе шаг. Найденное таким образом максимальное значение будет указывать на наилучшее сочетание

параметров обмоток в рассматриваемой области их изменения по выбранному критерию.

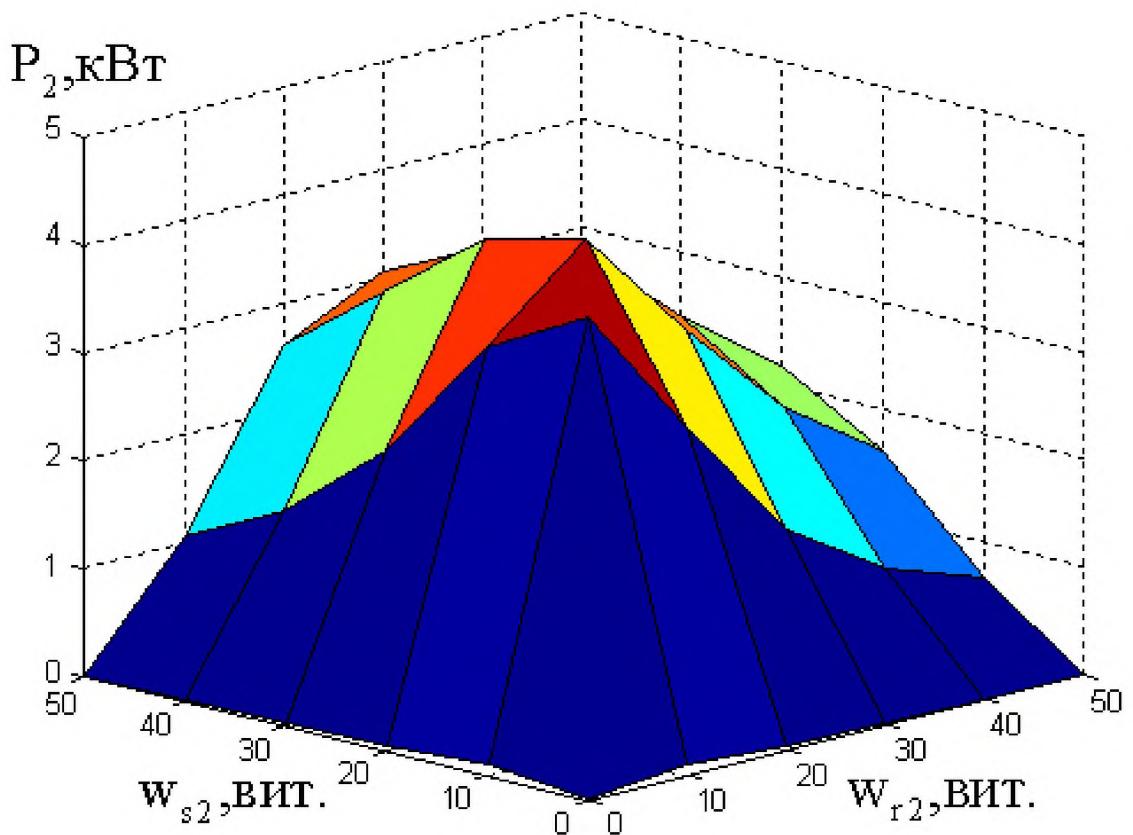


Рис. 3.8. Поверхность, имеющая максимум.

Результатом исследования окрестности максимума поверхности является поверхность, имеющая минимальное расстояние между соседними точками (рис.3.9).

Как видно из рисунка 3.9 на поверхности в окрестности максимума существует некоторое уплощение поверхности, что позволяет при выборе параметров обмоток (количество витков в катушке) отдать предпочтение более удобному их сочетанию без существенной потери в величине исследуемой функции. Как правило, исходя из экономических соображений, предпочтение отдается выбору минимального количества витков в пределах допустимых значений.

Вычисления производятся для определенной конструкции магнитопровода и статора, и ротора. В процессе вычислений конструктивные переменные не меняются.

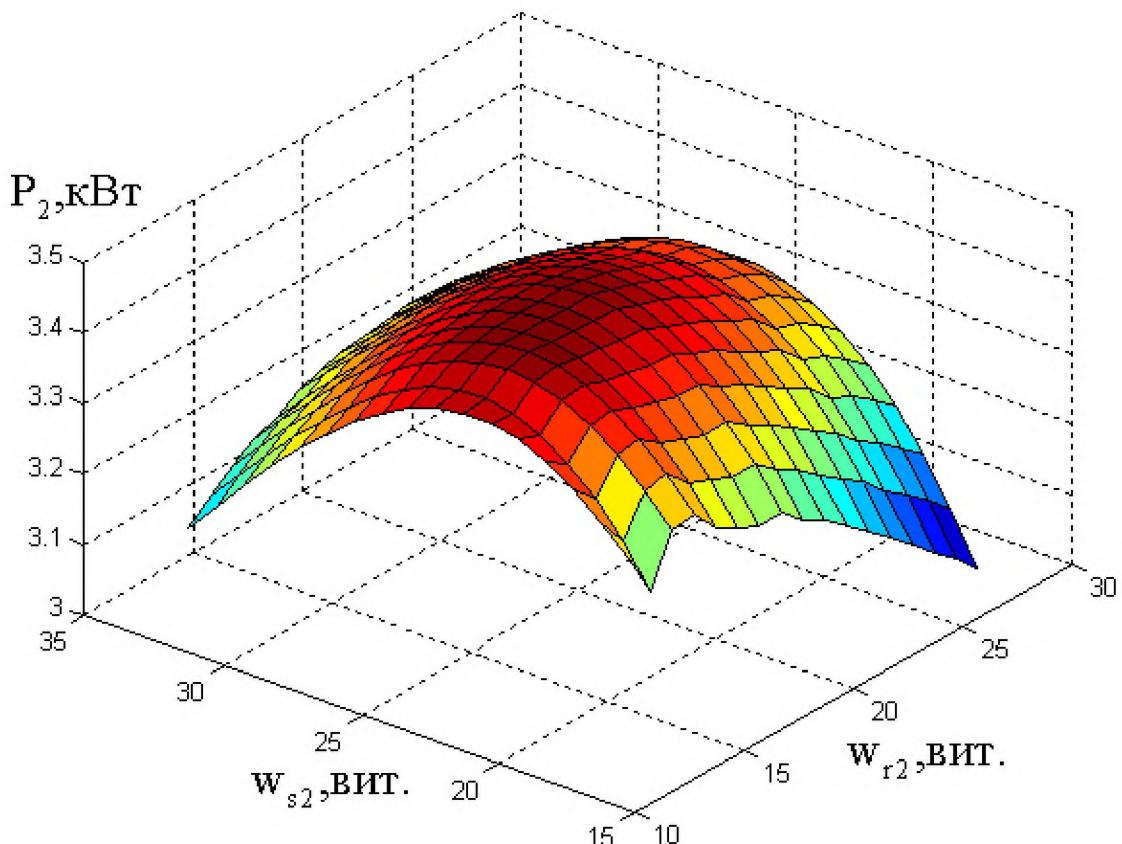


Рис. 3.9. Поверхность в окрестности максимума.

3.4. Аналитические выражения для токов СДМГ.

Вывод аналитических зависимостей для любого физического процесса является задачей непростой, а для сложных систем, в том числе и электромеханических – практически невыполнимой. В то же время трудно недооценивать возможности анализа систем, имеющих аналитическое описание. Безусловно, вывод аналитических зависимостей становится возможным при принятии некоторых условностей, уменьшающих объемы вычислений. Для установившегося режима работы, с учетом принятых в

п.2.1. допущений, предлагается способ определения аналитических зависимостей амплитуд токов СДМГ от параметров обмоток, характеристик электрических машин и параметров нагрузки.

Для получения аналитических выражений используется система уравнений СДМГ в матричном виде (2.33). В матрицы токов и напряжений подставляются выражения, определяющие изменения соответствующих величин во времени:

$$[\dot{i}] = \begin{bmatrix} I_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1) \\ I_1 \cos\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_1 \cos\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right) \\ I_2 \cos(\omega_n t - \varphi_2) \\ I_2 \cos\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_2 \cos\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right) \\ I_r \cos(\omega_r t - \varphi_r) \\ I_r \cos\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_r \cos\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad \frac{d}{dt} [\dot{i}] = - \begin{bmatrix} I_1 \omega_0 \sin(\omega_0 t - \varphi_1) \\ I_1 \omega_0 \sin\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_1 \omega_0 \sin\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right) \\ I_2 \omega_n \sin(\omega_n t - \varphi_2) \\ I_2 \omega_n \sin\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_2 \omega_n \sin\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right) \\ I_r \omega_r \sin(\omega_r t - \varphi_r) \\ I_r \omega_r \sin\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_r \omega_r \sin\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix},$$

$$[u] = \begin{bmatrix} U_1 \cos(\omega_0 t) & U_1 \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}\right) & U_1 \cos\left(\omega_0 t - \frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_T^T.$$

После подстановки в систему матриц-столбцов значений токов и напряжений и ее преобразования, в системе уравнений по-прежнему остаются неизвестные переменные. Неизвестными переменными этой системы становятся значения амплитуд и фазы токов обмоток электрических машин. С учетом симметричности фаз каждой обмотки, общее их количество

составляет 6 неизвестных. Выполнением операций умножения и сложения матриц система (2.33) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} & \xi_1 \left(U_1 \cos(\omega_0 t), I_1 \sin(\omega_0 t - \varphi_1), I_r \cos(\omega_0 t - \varphi_r), I_r \sin(\omega_0 t - \varphi_r) \right) = 0 \\ & \xi_1 \left(U_1 \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}\right), I_1 \sin\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right), \right. \\ & \quad \left. I_r \cos\left(\omega_0 t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_0 t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) = 0 \\ & \xi_1 \left(U_1 \cos\left(\omega_0 t - \frac{4\pi}{3}\right), I_1 \sin\left(\omega_0 t - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right), \right. \\ & \quad \left. I_r \cos\left(\omega_0 t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_0 t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right) = 0 \\ & \xi_2 \left(I_2 \sin(\omega_n t - \varphi_2), I_r \cos(\omega_n t - \varphi_r), I_r \sin(\omega_n t - \varphi_r) \right) = 0 \\ & \xi_2 \left(I_2 \sin\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right), I_r \cos\left(\omega_n t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_n t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) = 0 \\ & \xi_2 \left(I_2 \sin\left(\omega_n t - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right), I_r \cos\left(\omega_n t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_n t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right) = 0 \\ & \xi_r \left(I_1 \sin(\omega_r t - \varphi_1), I_1 \cos(\omega_r t - \varphi_1), \right. \\ & \quad \left. I_2 \cos(\omega_r t - \varphi_2), I_2 \sin(\omega_r t - \varphi_2), I_r \sin(\omega_r t - \varphi_r) \right) = 0 \\ & \xi_r \left(I_1 \sin\left(\omega_r t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right), I_1 \cos\left(\omega_r t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right), \right. \\ & \quad \left. I_2 \cos\left(\omega_r t - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right), I_2 \sin\left(\omega_r t - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) = 0 \\ & \xi_r \left(I_1 \sin\left(\omega_r t - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right), I_1 \cos\left(\omega_r t - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right), \right. \\ & \quad \left. I_2 \cos\left(\omega_r t - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right), I_2 \sin\left(\omega_r t - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right), I_r \sin\left(\omega_r t - \varphi_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right) = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.14)$$

ξ_1, ξ_2, ξ_r – функции от напряжений, токов, параметров электрических машин и нагрузки.

Система уравнений (3.14) характерна тем, что выражения для фаз А, В, С каждой машины (1,2,3 строки – для статора первой машины; 4,5,6 строки – для статора второй машины; 7,8,9 строки – для ротора) – являются

абсолютно одинаковыми, отличающимися лишь фазовым сдвигом (0 , $2\pi/3$, $4\pi/3$ – соответственно). Учитывая эту особенность – строки для фаз В и С всех машин удаляются из системы.

Использованием свойства тригонометрических функций:

$$\begin{aligned}\sin(\omega t \pm \varphi) &= \sin(\omega t)\cos(\varphi) \pm \cos(\omega t)\sin(\varphi), \\ \cos(\omega t \pm \varphi) &= \cos(\omega t)\cos(\varphi) \mp \sin(\omega t)\sin(\varphi)\end{aligned}\quad (3.15)$$

система (3.14) приводится к виду:

$$\left. \begin{array}{l} \xi_1 \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_0 t) \cdot \vartheta_{1c}(U_1, I_1 \sin(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) + \\ + \sin(\omega_0 t) \cdot \vartheta_{1s}(I_1 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) \end{array} \right) = 0 \\ \xi_2 \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_n t) \cdot \vartheta_{2c}(I_2 \sin(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) + \\ + \sin(\omega_n t) \cdot \vartheta_{2s}(I_2 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) \end{array} \right) = 0 \\ \xi_r \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_r t) \cdot \vartheta_{rc}(I_1 \sin(\varphi_1), I_1 \cos(\varphi_1), I_2 \sin(\varphi_1), \\ I_2 \cos(\varphi_1), I_r \sin(\varphi_r)) + \\ + \sin(\omega_r t) \cdot \vartheta_{rs}(I_1 \sin(\varphi_1), I_1 \cos(\varphi_1), I_2 \sin(\varphi_1), \\ I_2 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r)) \end{array} \right) = 0 \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

где ϑ_{1c} , ϑ_{1s} , ϑ_{2c} , ϑ_{2s} , ϑ_{rc} , ϑ_{rs} – функции от напряжений, токов, параметров электрических машин и нагрузки, образующиеся при разложении тригонометрических функций с использованием (3.15).

Тождественное равенство нулю системы уравнений (3.16) является возможным лишь в том случае, когда функции ϑ_{1c} , ϑ_{1s} , ϑ_{2c} , ϑ_{2s} , ϑ_{rc} , ϑ_{rs} тождественно равны нулю. Таким образом, для решения системы уравнений (3.16) составляется дополнительная система уравнений (3.17), состоящая из шести линейно-независимых уравнений.

Из математической теории известно, что для решения системы уравнений необходимым условием является наличие линейно-независимых уравнений по количеству не меньшим числа неизвестных переменных. В

рассматриваемом случае количество неизвестных является равным количеству линейно-независимых уравнений. Следовательно – система имеет решение.

$$\left. \begin{array}{l} \vartheta_{1c}(U_1, I_1 \sin(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) = 0 \\ \vartheta_{1s}(I_1 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) = 0 \\ \vartheta_{2c}(I_2 \sin(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) = 0 \\ \vartheta_{2s}(I_2 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r), I_r \sin(\varphi_r)) = 0 \\ \vartheta_{2c}\left(I_1 \sin(\varphi_1), I_1 \cos(\varphi_1), I_2 \sin(\varphi_1),\right. \\ \left. I_2 \cos(\varphi_1), I_r \sin(\varphi_r)\right) = 0 \\ \vartheta_{2s}\left(I_1 \sin(\varphi_1), I_1 \cos(\varphi_1), I_2 \sin(\varphi_1),\right. \\ \left. I_2 \cos(\varphi_1), I_r \cos(\varphi_r)\right) = 0 \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

Система (3.17) представляется в матричном виде для получения решения с использованием матричной алгебры:

$$[U] = [CM][I_p], \quad (3.18)$$

где

$$[CM] = \sqrt{3} \begin{bmatrix} R_{s1} & 2\pi f_o L_{s1} & 0 & 0 & 0 & 3\pi f_o M_1 \\ 2\pi f_o L_{s1} & -R_{s1} & 0 & 0 & 3\pi f_o M_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_{2H} & 2\pi f_H L_{2H} & 0 & -3\pi f_H M_2 \\ 0 & 0 & 2\pi f_H L_{2H} & -R_{2H} & -3\pi f_H M_2 & 0 \\ 0 & 3\pi f_r M_1 & 0 & -3\pi f_r M_2 & R_r & 2\pi f_r L_r \\ 3\pi f_r M_1 & 0 & -3\pi f_r M_2 & 0 & 2\pi f_r L_r & -R_r \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

f_o, f_H, f_r – частота тока в обмотках статора первой машины, статора второй машины и ротора, соответственно.

$$\begin{aligned} [U] &= [U_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]_T, \quad [I_p] = [I_{1C} \ I_{1S} \ I_{2C} \ I_{2S} \ I_{RC} \ I_{RS}]_T, \\ I_{1C} &= I_1 \cos(\varphi_1), \quad I_{2C} = I_2 \cos(\varphi_2), \quad I_{RC} = I_r \cos(\varphi_r), \\ I_{1S} &= I_1 \sin(\varphi_1), \quad I_{2S} = I_2 \sin(\varphi_2), \quad I_{RS} = I_r \sin(\varphi_r). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Для решения системы (3.18) используются возможности Matlab. В редакторе задаются все матрицы системы уравнений, и набирается выражение: $I_p = CM \setminus U$. При выполнении этой инструкции, исследуется матрица CM, выбирается алгоритм решения системы уравнений. Результатом решения является матрица-столбец I_p , в которой содержатся элементы в соответствии с (3.20).

Для нахождения амплитуд токов и фазовых сдвигов вычисляются выражения:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{I_{1C}^2 + I_{1S}^2} = \sqrt{I_1^2 \cos^2(\phi_1) + I_1^2 \sin^2(\phi_1)} = I_1 \sqrt{\cos^2(\phi_1) + \sin^2(\phi_1)} = I_1, \\ I_2 &= \sqrt{I_{2C}^2 + I_{2S}^2}, \quad I_r = \sqrt{I_{RC}^2 + I_{RS}^2}, \\ \phi_1 &= \arctg\left(\frac{I_{1S}}{I_{1C}}\right) = \arctg\left(\frac{I_1 \sin(\phi_1)}{I_1 \cos(\phi_1)}\right) = \arctg(\tg(\phi_1)) = \phi_1, \\ \phi_2 &= \arctg\left(\frac{I_{2S}}{I_{2C}}\right), \quad \phi_r = \arctg\left(\frac{I_{RS}}{I_{RC}}\right). \end{aligned} \quad (3.21)$$

После выполнения математических операций получаются выражения для амплитуд токов:

$$I_1 = U_1 \sqrt{\frac{\left((9\pi^2 f_r f_H M_2^2 + R_{2H} R_r)^2 + 4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 R_r^2 + 4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{2H}^2 + 8\pi^4 f_r^2 f_H^2 (2L_{2H}^2 L_r^2 - 9M_2^2 L_{2H} L_r) \right)}{3\Lambda}},$$

$$I_H = 3U_1 \pi^2 f_H f_r M_1 M_2 \sqrt{\frac{3}{\Lambda}}, \quad I_r = U_1 \pi f_r M_1 \sqrt{\frac{3(4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2)}{\Lambda}},$$

$$\begin{aligned} \text{где } \Lambda &= \left(4\pi^2 L_{s1}^2 f_o^2 + R_{s1}^2 \right) \left(\pi^4 f_H^2 f_r^2 (9M_2^2 - 4L_{2H} L_r)^2 + 4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{2H}^2 + 18\pi^2 f_r f_H M_2^2 R_{2H} R_r \right) + \\ &+ \left(4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2 \right) \left(\left(9\pi^2 f_r f_o M_1^2 + R_{s1} R_r \right)^2 + 4\pi^2 f_o^2 (L_{s1}^2 R_r^2 - 18\pi^2 f_r^2 M_1^2 L_{s1} L_r) \right) + \\ &+ 162 M_1^2 M_2^2 \pi^4 f_H f_o f_r^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1}); \end{aligned}$$

для фазовых сдвигов токов:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\left((4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2)(4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{s1} + R_r^2 R_{s1} + 9\pi^2 f_o f_r R_r M_1^2) - \right.}{\left. - 9\pi^2 f_H f_r M_2 R_{s1} (3\pi(f_o R_{2H} M_1^2 + f_H R_{s1} M_2^2) - 2M_2 (R_{2H} R_r - 4\pi^2 f_H f_r L_{2H} L_r)) \right)}$$

$$\varphi_H = \arctg \frac{\pi^2 f_H f_r R_{s1} (9M_2^2 - 4L_{2H} L_r) + \pi^2 f_o f_r R_{2H} (9M_1^2 - 4L_{s1} L_r) - 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1} R_r + R_{2H} R_{s1} R_r}{2\pi (9L_{2H} M_1^2 + 9L_{s1} M_2^2 - 4L_{2H} L_{s1} L_r) + f_o L_{s1} R_{2H} R_r + f_r L_r R_{2H} R_{s1} + f_H L_{2H} R_{s1} R_r},$$

$$\varphi_r = \arctg \frac{18\pi^3 f_H f_r M_2^2 (f_H L_{2H} R_{s1} - f_o L_{s1} R_{2H}) - 2\pi (4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (f_o L_{s1} R_r + f_r L_r R_{s1})}{9\pi^2 f_H f_r M_2^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_H f_o L_{2H} L_{s1}) + (4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (\pi^2 f_o f_r (9M_1^2 - 4L_{s1} L_r) + R_{s1} R_r)},$$

и для электромагнитного момента системы:

$$M_{em} = \frac{3U_1^2 M_1^2 (9\pi^3 f_r^2 f_H M_2^2 R_{2H} (p_2 - p_1) - p_1 \pi f_r R_r (4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2))}{D}, \quad (3.22)$$

где

$$D = 9\pi^2 f_r f_H M_2^2 (4\pi^2 L_{s1}^2 f_o^2 + R_{s1}^2) (36\pi^2 f_r f_H M_2^2 - 32\pi^2 f_r f_H L_{2H} L_r + 8R_{2H} R_r) + \\ + (4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2) ((18\pi^2 f_r f_o M_1^2 + 2R_{s1} R_r - 8\pi^2 f_r f_o L_{s1} L_r)^2 + (4\pi f_o L_{s1} R_r + 4\pi f_r L_r R_{s1})^2) + \\ + 648\pi^4 f_r^2 f_o f_H M_2^2 M_1^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1}).$$

Для проверки полученных выражений проводится исследование энергетических зависимостей СДМГ с помощью полученных аналитических выражений. Алгоритм работы программы, реализующей это исследование, отличается от рассмотренного в п. 3.3 только тем, что при последовательном переборе количества витков в катушках обмоток входящих в состав СДМГ электрических машин, их значения циклически изменяются от минимального до максимально выбранного значения сразу с минимальным шагом.

При исследовании в области изменения параметров обмоток, рассмотренной при построении рисунка 3.8 получается поверхность, представленная на рис. 3.10.

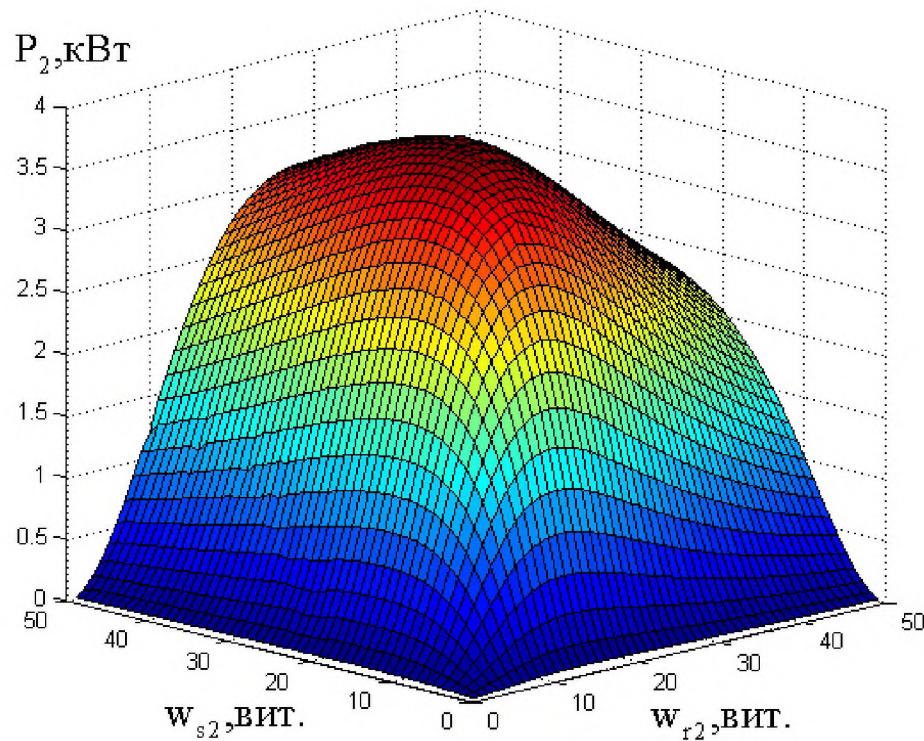


Рис. 3.10. Поверхность, полученная при помощи аналитических выражений.

Сравнение рисунков 3.8 и 3.10 позволяет сделать вывод о том, что поверхности, приведенные на них, являются в пределах допустимых погрешностей одинаковыми. Следовательно, исследование процессов в установившемся режиме становится возможным не только при помощи модели системы, но и при помощи аналитических выражений. При этом отмечается, что при использовании аналитического метода время выполнения заданного объема вычислений значительно меньше, чем при использовании для вычислений представленной выше модели. В таблице 3.1. в качестве примера приводятся пропорции между витками катушек обмоток, при которых обеспечивается максимальный КПД для заданной нагрузки.

Табл. 3.1. Соотношения между количеством витков катушек для достижения максимального КПД в СДМГ 1 типа для $P_{\text{ном}}=20 \text{ кВт}$.

Номинальная нагрузка, кОм	Статор возбудителя	Ротор возбудителя	Ротор выходной машины	Статор выходной машины
1 кОм	1	5	6	16
3 кОм	2	7	9	20

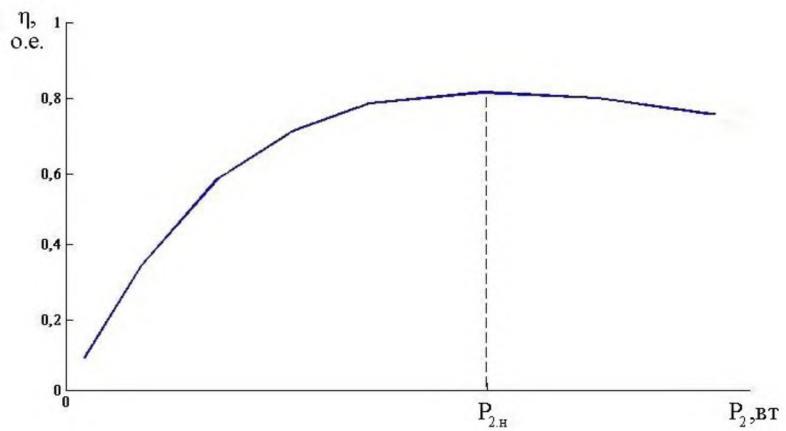


Рис. 3.11. Зависимость КПД от мощности нагрузки.

Исследования зависимости коэффициента полезного действия от величины нагрузки генератора показали, что для каждого типа СДМГ выявляется максимум КПД, который в зависимости от сочетания параметров обмоток находится в пределах от 0,77 до 0,82. На рис.3.11 представлена зависимость КПД от мощности нагрузки для первого типа СДМГ при номинальной мощности 20 кВт.

ВЫВОДЫ:

1. Исследованы энергетические соотношения в СДМГ.

Установлено, что для получения заданных характеристик генератора необходимо осуществлять подбор сочетания количества витков в катушках обмоток.

2. Получены сочетания количеств витков в катушках обмоток, обеспечивающие получение максимального коэффициента полезного действия электротехнического комплекса на базе совмещенного двухмашинного генератора. Определено, что максимальное значение выходной мощности при высоком коэффициенте полезного действия обеспечивается лишь при ограниченном количестве сочетаний количеств витков в катушках обмоток.

3. Создан комплекс аналитических выражений, позволяющих исследовать процессы в совмещенном двухмашинном генераторе. После подстановки в них численных значений постоянных для конкретной машины параметров, выражения значительно упрощаются и становятся пригодными для анализа. Результаты исследования энергетических соотношений с помощью аналитических выражений и с помощью модели, составленной в Matlab, приводят к аналогичным результатам.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОГО ДВУХМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА

4.1. Рекомендации по формированию обмоток, совмещенных в общем магнитонроводе.

Создание в совмешенном магнитонроводе разнополюсных полей при определенных условиях может привести к явлениям, не имеющим места в классических электрических машинах, а именно: возрастанию намагничивающих токов и магнитных потерь, возникновению электромагнитных сил вибрационного характера, появлению дополнительных шумов и т.д.

В общем магнитопроводе действуют разнополюсные магнитные поля, и каждая обмотка совмешенного магнитопровода с ними взаимодействует [59,60]. Для нормальной работы обмоток необходимо устраниить влияние $2p_1$ -полюсной обмотки на $2p_2$ -полюсную (далее первая и вторая обмотки соответственно) и наоборот.

Для определения параметров обмоток совмешенной электрической машины, при которых их взаимовлияние минимально решаются следующие задачи:

1. Определяется зависимость потокосцепления фазы одной электрической машины с магнитным полем другой от конструктивных особенностей обмоток.
2. Проводится анализ полученного выражения и определяются способы минимизации взаимовлияния обмоток.

Известно [47,60-62], что симметрично расположенные вдоль воздушного зазора электрической машины обмотки, возбуждаемые симметричной системой синусоидальных токов, образуют в воздушном

зазоре магнитное поле, пространственно – временное описание основной гармоники магнитной индукции которого представляет собой уравнение бегущей волны:

$$B(\alpha, t) = B_1 \cos(p_1 \alpha + \omega t), \quad (4.1)$$

где α – угловая координата; p_1 , ω – количество пар полюсов и круговая частота тока в обмотке, возбуждающей магнитное поле; B_1 – амплитуда волны магнитной индукции.

Потокосцепление катушки обмотки электрической машины с магнитным полем, имеющим распределение магнитной индукции (4.1) находится интегрированием по площади, охватываемой катушкой. Длина магнитопровода принимается постоянной, поэтому интегрирование проводится либо по длине "спрямленного" воздушного зазора, либо по угловой координате:

$$\Psi_k = \frac{1}{2} D w \int_{\alpha_{k1}}^{\alpha_{k2}} B_1 \cos(p_1 \alpha + \omega t) d\alpha, \quad (4.2)$$

где l , D – длина и диаметр магнитопровода; p_2 – количество пар полюсов обмотки, с которой сцепляется магнитный поток; w – количество витков в катушке; α_{k1} , α_{k2} – угловые координаты сторон k -й катушки.

Принимается во внимание, что обмотки соседних полюсов фазы соединяются встречно, так как представляют собой разнополярные полюса. Поэтому выражения для угловых координат сторон k -й катушки положительного и отрицательного полюсов будут отличаться.

За начало отсчета угловой координаты принимается ось фазы А обмотки. В этом случае выражения для угловых координат сторон k -й катушки α_{k1} , α_{k2} :

$$\alpha_{k1+} = -\frac{\pi}{Z}(y+q) + \frac{2\pi}{Z}k + \frac{2\pi}{p_2}\pi, \\ \alpha_{k2+} = -\frac{\pi}{Z}(y+q) + \frac{2\pi}{Z}(k+y) + \frac{2\pi}{p_2}\pi, \quad (4.3)$$

$$\alpha_{k1-} = -\frac{\pi}{Z}(y+q) + \frac{\pi}{p_2} + \frac{2\pi}{Z}k + \frac{2\pi}{p_2}n, \\ \alpha_{k2-} = -\frac{\pi}{Z}(y+q) + \frac{\pi}{p_2} + \frac{2\pi}{Z}(k+y) + \frac{2\pi}{p_2}\pi, \quad (4.4)$$

где $Z = 2p_2m_2q$ – количество пазов магнитопровода; y – шаг катушки (в пазах); q – количество пазов на полюс и фазу; k – номер катушки в пределах полюсного деления от 0 до $q-1$; n – номер пары полюсов в фазе; m_2 – количество фаз.

После подстановки выражений (4.3) и (4.4) в (4.2), вычисления интеграла и преобразований получаются выражения для потокосцеплений разнополярных полюсов:

$$\Psi_{n+} = \sum_{k=0}^{q-1} \Psi_{k+} = \frac{lDw}{2p_1p_2} B_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_2 \frac{p_1}{p_2}\right) \times \\ \times \sum_{k=0}^{q-1} \cos\left[2\pi p_1 \left(\frac{k}{Z} + \frac{\pi}{p_2} - \frac{q}{2Z}\right) + \omega t\right], \quad (4.5)$$

$$\Psi_{n-} = \sum_{k=0}^{q-1} \Psi_{k-} = \frac{lDw}{2p_1p_2} B_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_2 \frac{p_1}{p_2}\right) \times \\ \times \sum_{k=0}^{q-1} \cos\left[2\pi p_1 \left(\frac{k}{Z} + \frac{1}{2p_2} + \frac{\pi}{p_2} - \frac{q}{2Z}\right) + \omega t\right]. \quad (4.6)$$

Суммируя потокосцепления всех полюсов фазы, получается выражение для потокосцепления фазы, учитывающее конструктивные особенности обмотки:

$$\Psi_{\phi} = \frac{IDw}{2p_1p_2} B_i \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_2 \frac{p_1}{p_2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{p_1}{p_2}\right) \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{p_2-1} \sum_{k=0}^{q-1} \sin\left[\frac{2\pi p_1 k}{Z} + \frac{2\pi p_1 \pi}{p_2} + \frac{\pi p_1}{2p_2} - \frac{\pi p_1 q}{Z} + \omega t \right], \quad (4.7)$$

где β_2 – шаг обмотки.

Анализируя структуру полученного выражения, определяются случаи, при которых потокосцепление магнитного поля равно нулю (минимально):

1. Потокосцепление витка катушки с магнитным полем равно нулю:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_2 \frac{p_1}{p_2}\right) = 0 \Rightarrow \beta_2 = \frac{2Cp_2}{p_1}, \quad (4.8)$$

где C – целое положительное число, β_2 – шаг обмотки второй электрической машины.

2. Потокосцепление одного полюса фазы с магнитным полем равно нулю:

$$\sum_{k=0}^{q-1} \sin\left(\frac{2\pi p_1 k}{Z} + \xi \right) = 0, \quad (4.9)$$

где $\xi = \frac{2\pi p_1 \pi}{p_2} + \frac{\pi p_1}{2p_2} - \frac{\pi p_1 q}{Z} + \omega t$ – не зависит от k .

Учитывается, что сумма гармоник, фазовые сдвиги которых равномерно распределены в промежутке от 0 до 2π равна нулю:

$$\sum_{k=0}^{q-1} \sin\left(\frac{2\pi}{q} k + \xi \right) = 0. \quad (4.10)$$

Решение уравнения (4.9) находится с учетом (4.10):

$$\sum_{k=0}^{q-1} \sin\left(\frac{2\pi p_1 k}{Z} + \xi\right) = \sum_{k=0}^{q-1} \sin\left(\frac{2\pi}{q} \frac{p_1}{2p_2 m_2} k + \xi\right) = 0 \Rightarrow p_1 = 2C p_2 m_2. \quad (4.11)$$

3. Потокосцепление пары полюсов фазы с магнитным полем равно нулю:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{p_1}{p_2}\right) = 0 \Rightarrow p_1 = 2C p_2. \quad (4.12)$$

4. Потокосцепление фазы с магнитным полем равно нулю:

$$\sum_{n=0}^{p_2-1} \sin\left(\frac{2\pi p_1 n}{p_2} + \vartheta\right) = 0 \Rightarrow C p_1 = p_2, \quad (4.13)$$

где $\vartheta = \frac{2\pi p_1 k}{Z} + \frac{\pi p_1}{2p_2} - \frac{\pi p_1 q}{Z} + \omega t$ - не зависит от n .

Второй из рассмотренных случаев является частным случаем третьего и в дальнейшем не рассматривается.

Для получения окончательных выражений при определенных уже условиях для второй электрической машины составляется система уравнений для вычисления аналогичных условий для первой.

Составление подобной системы возможно при соблюдении дополнительного условия, а именно, количество пар полюсов одной машины должно быть больше количества пар полюсов другой. С учетом дополнительного условия возможными комбинациями являются две системы уравнений:

1. Сочетание выражений (4.13) и (4.8).

Учитывается, что параметр p_1 в выражении (4.13) соответствует p_2 в выражении (4.8) и наоборот. С целью обобщения полученных выражений вводятся обозначения j и k .

$$\begin{cases} C_j p_j = p_k \\ \beta_j = \frac{2C_k p_j}{p_k} \end{cases} \quad (4.14)$$

Решением системы (4.14) является выражение для шага обмотки:

$$\beta_j = \frac{2C_k}{C_j}. \quad (4.15)$$

Пример 1. $p_j = 3$, $p_k = 15$, $C_j = 5$. При $C_k = 2$, $\beta = 4/5$.

2. Сочетание выражений (4.13) и (4.12).

$$\begin{cases} C_j p_j = p_k \\ p_k = 2C_k p_j \end{cases} \quad (4.16)$$

Решением системы (4.16) является:

$$C_j = 2C_k. \quad (4.17)$$

Пример 2. $p_j = 5$, $C_j = 2$, $C_k = 1$, $p_k = 10$.

Таким образом, для исключения (минимизации) взаимного влияния обмоток совмещенной электрической машины необходимо подбирать обмоточные данные в соответствии с (4.14), (4.15), либо (4.16), (4.17).

4.2. Макетный образец СДМГ

Макетный образец СДМГ изготавливается на основе электрической асинхронной машины с фазным ротором. Причины выбора именно такой машины заключаются в указанных далее обстоятельствах. Во-первых, укладка обмотки производится как на статоре, так и на роторе, а это возможно лишь при наличии пазов соответствующего размера в магнитопроводе, что характерно для машин с фазным ротором. Более того, магнитопровод фазного ротора предназначается для укладки обмотки.

Во-вторых, имеется свободное пространство в конструкции ротора машины, в котором выводы обмоток ротора размещаются, закрепляются и находятся в свободном доступе. Свободный доступ к выводам обмоток используется для изменения схемы подключения роторных обмоток между собой, чем обеспечивается изменение типа СДМГ (в соответствии с таблицей 2.2). Такое конструктивное решение для выводов обмоток позволяет на одном макетном образце исследовать процессы в СДМГ всех типов.

В-третьих, в конструкции фазного ротора предусмотрены контактные кольца, которые используются в макетном образце для контроля тока в роторных обмотках, фазных и линейных напряжений ротора. Кроме того, при соответствующей коммутации выводов обмоток с контактными кольцами, возможно исследование процессов в СДМГ при обрыве обмотки фазы ротора.

Подготовка асинхронной машины с фазным ротором для изготовления СДМГ заключается в разборке корпуса машины, удалении старой обмотки из пазов ротора и статора. После снятия с магнитопроводов старой обмотки и извлечения изоляции машина подготовлена к укладке новой обмотки.

Обмотка первой машины укладывается на дно паза. Технология укладки обмотки первой машины иллюстрируется на рис. 4.1.

Для изоляции обмотки от листов магнитопровода из электротехнического картона нарезаются прямоугольники и изготавливаются изоляционные коробки по количеству пазов статора. Изоляционные коробки выполняются на 1,5 – 2 см длиннее магнитопровода и устанавливаются в пазы статора (рис. 4.1.а).

Для выполнения изоляции между катушками при укладке их в пазы магнитопровода из электротехнического картона вырезаются прямоугольники длиннее магнитопровода на 2,5 – 3 см и шире основания



а)



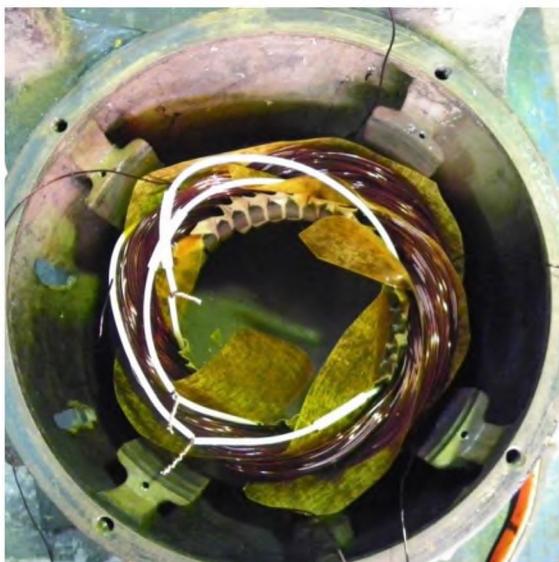
б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 4.1. Технология укладки обмотки первой машины.

паза на 0,5 – 1 см по количеству пазов статора (рис. 4.1.б). Кроме того, для выполнения изоляции между обмотками машин такие же прямоугольники из более плотного электрокартона вырезаются по количеству пазов статора.

Для изготовления катушек используется обмоточный медный провод. Длина провода выбирается с учетом необходимости формирования лобовой части для обвязки обмотки после укладки. Диаметр провода выбирается по справочнику обмотчика электрических машин исходя из режима ее работы (максимальной силы тока в обмотке). Для намотки провода используются специальные направляющие (рис. 4.1.в). Эти направляющие устанавливаются в намоточный станок. Катушка с проводом монтируется рядом. При вращении ручки станка направляющие врачаются, формируя ровные катушки. После намотки каждой катушки, она фиксируется куском провода. Катушечная группа мотается вся сразу для уменьшения количества соединений и экономии провода.

После изготовления всех катушечных групп для всех фаз обмотки статора первой машины происходит их укладка в пазы. Обмотка выполняется двухслойной всыпной. В процессе укладки эмалевая изоляция проводов бережется от сколов. После укладки стороны катушки в паз, поверх нее укладывается прямоугольник электротехнического картона (рис. 4.1.г). После укладки всей обмотки первой машины, поверх обмотки укладывается еще один слой изоляции.

Для изоляции между лобовыми частями катушечных групп используется лакоткань. Она нарезается по шаблону лобовой части и устанавливается между катушечными группами по мере их установки в пазы. Выступающие куски лакоткани впоследствии обрезаются.

После укладки всех катушек обмотки первой электрической машины в пазы поверх нее в пазы укладываются прокладки из плотного

электротехнического картона. Для уплотнения провода в пазу используется оправка – инструмент обмотчика.

После осаживания провода на дно паза, концы катушек соединяются по схеме (рис. 4.1.д). К концам фазной обмотки прикрепляется изолированный провод, выводится наружу корпуса и подписывается (A, X, B, Y, C, Z). Лобовые части обмотки первой машины подвязываются (не очень плотно) киперной хлопчатобумажной лентой (рис. 4.1.е).

Обмотка второй электрической машины укладывается аналогично через слой изоляции (рис. 4.2.а). После укладки обмотки второй машины и осадки проводов в верхнюю часть паза вбивается деревянный клин специальной формы.

Концы катушек соединяются по схеме (рис. 4.2.б). Первая машина – двухполюсная, вторая – шестиполюсная. Концы фаз выводятся наружу. Места соединений пропаиваются и изолируются (рис. 4.2.в).

Лобовые части обиваются резиновым молотком и плотно обвязываются киперной хлопчатобумажной лентой (рис. 4.2.г).

Статор помещается в печку и нагревается в течение 20 минут для того чтобы из изоляции испарилась влага, затем подвешивается на подъемник и транспортируется к емкости с электротехническим лаком, в которую погружается для пропитки (рис. 4.2.д).

После пропитки и стекания лака статор с пропитанной обмоткой устанавливается в сушильный шкаф (рис. 4.2.е).

При укладке обмоток ротора проводятся аналогичные операции. Остановимся лишь на некоторых из них.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 4.2. Завершение изготовления статора СДМГ

При подготовке ротора для обмотки, с вала ротора снимаются подшипники. Подшипники либо заменяются, либо обслуживаются и устанавливаются обратно после укладки обмотки и окончательной ее просушки.

Укладка обмоток на ротор отличается от укладки обмотки на статоре способом крепления лобовых частей. На роторе необходимо равномерно распределять их вокруг вала (рис. 4.3.а), чтобы не пришлось испытывать больших трудностей с балансировкой.

После укладки обмотки, соединения катушек и присоединения выводов к креплениям выводов колец, места соединений пропаиваются и изолируются (рис. 4.3.б). На лобовые части с помощью станка накладывается бандаж (рис. 4.3.в).

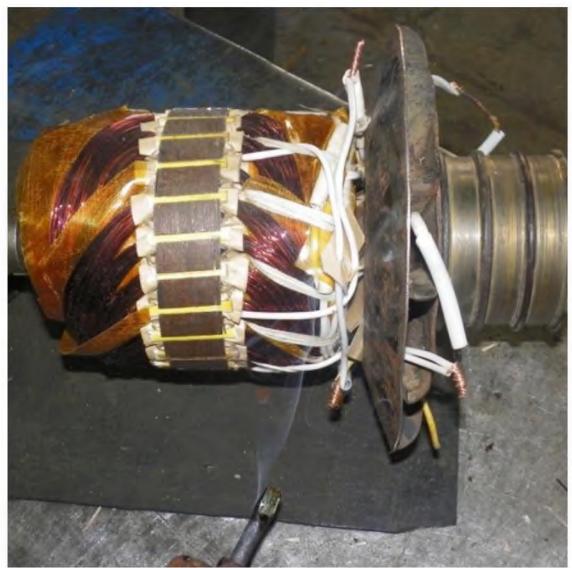
Пропитка ротора происходит в той же последовательности, как и пропитка статора. После сушки ротора кольца очищаются от лака мелкой наждачной бумагой (рис. 4.3.г).

Макетный образец СДМГ собирается и монтируется на специальную платформу (рис. 4.3.д). Выводы обмоток закрепляются на клеммной коробке (рис. 4.3.е).

Для удобства подключения проводов при сборке испытательного стенда выводы обмоток статора первой машины располагаются в первом (левом) столбце клеммной коробки: начала обмоток – снизу, окончания обмоток – сверху. Выводы обмоток статора второй машины располагаются аналогично во втором столбце. Выводы щеточного аппарата с помощью отдельного кабеля соединяются с клеммами расположенными в нижнем правом углу клеммной коробки.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 4.3. Изготовление ротора и сборка СДМГ

4.3. Экспериментальные исследования.

Значительная часть разрабатываемых научных и технических решений в большинстве своем основывается на гипотезах ученых, инженеров, конструкторов. Для подтверждения возможности реализации предлагаемого устройства, гипотеза изначально реализуется в расчетах и математических моделях, основанных на проверенных временем теоретических знаниях. Построенными таким образом математическими моделями симулируются различные режимы работы нового устройства, возможным становится более детальное исследование как взаимодействия отдельных элементов устройства между собой, так и работы самого устройства в составе системы.

Исследование предлагаемого технического решения математическими методами, несмотря на то, что они, безусловно, основываются на проверенных элементах теории; всегда сопровождается критическим отношением к полученным результатам. Причиной этому является то, что в процессе математического моделирования редко когда удается сразу получить правильный результат, поскольку застраховаться от всевозможных субъективных ошибок исследователя, создающего математическую модель, на практике очень трудно. Поэтому процесс разработки и отладки математической модели технического устройства, а тем более – сложного, требует значительного количества времени и умственных затрат ее разработчика.

В то же время, каким бы тщательным не был процесс построения математической модели, без проверки полученных при помощи моделирования результатов невозможно считать гипотезу реализованной, а устройство – способным работать в заданных режимах. В связи с приведенными рассуждениями остаются актуальными исследования, проводимые на макетных физических моделях предлагаемого технического решения. Целями экспериментальных исследований является проверка правильности теоретических расчетов и сравнение результатов, полученных

при математическом моделировании и во время проведения эксперимента на макетном образце.

Для проведения исследований используется экспериментальная установка, состоящая из двух основных устройств: платформы с электрическими машинами и универсального стенда с электроизмерительными приборами.

Платформа с электрическими машинами (рис. 4.4) включает в себя: СДМГ и двигатель постоянного тока с пусковым устройством. Двигатель постоянного тока предназначается для вращения ротора СДМГ при проведении исследований. Пусковое устройство, подключенное к двигателю постоянного тока, позволяет изменением величины питающего напряжения изменять скорость вращения вала.



Рис. 4.4. СДМГ на платформе с приводным двигателем.

Платформа изготавливается из металлических профилей и устанавливается на ровной поверхности, исключающей возможности вибрации во время работы электрических машин. Для обеспечения во время

установки СДМГ и двигателя постоянного тока совпадения их осей вращения, на платформе выполняются отверстия под крепежные болты, а при установке электрических машин между их корпусами подкладываются шайбы различной толщины для точной настройки соосности валов. Учитывая, что в лабораторных условиях трудно обеспечить идеальное совпадение осей СДМГ и приводного двигателя, концы их валов соединяются между собой резиновой муфтой, которая позволяет передать вращение при небольших углах между осями без каких-либо вибраций.

На клеммную коробку выводятся концы обмоток фаз каждой машины. На колодке слева расположены выводы первой машины, на колодке справа – второй. В верхней части колодки располагаются концы обмоток фаз, а в нижней – их начала. С контактными кольцами ротора через щеточный аппарат соединяются клеммы расположенные в правом углу клеммной коробки.

В зависимости от соединения между собой выводов роторных обмоток эти клеммы используются для контроля тока в роторных обмотках, фазных или линейных напряжений ротора, а также для имитации обрыва обмотки одной из фаз ротора. Концы фазных обмоток ротора и статора соединяются звездой. Работа СДМГ происходит без подачи напряжения через роторные кольца, то есть – бесконтактным способом.

Выводы СДМГ соединяются кабелем с концами крепежных клемм с тыльной стороны универсального стенда. При таком соединении крепеж клеммы остается свободен для подключения к нему соединительных проводов и измерительных устройств на лицевой стороне стенда (рис.4.5).

Изображением на стенде схемных обозначений катушек индуктивности с зажимными клеммами на концах указывается на то, что эти клеммы являются концами обмоток статора. Причем слева располагаются начала статорных обмоток, а слева – их окончания. На рис. 4.5 видно, что окончания

обмоток статора соединяются звездой посредством соединительных проводов.



Рис. 4.5. Универсальный стенд с измерительными приборами.

В нижней части стенда под схематичным рисунком ротора со встречно соединенными обмотками располагаются зажимные клеммы, соединенные с роторными клеммами СДМГ, расположенными в правом углу клеммной коробки. На стенде смонтирован частотный преобразователь VLT aquadrive, который используется для изменения амплитуды и частоты питающего напряжения на обмотке возбуждения в процессе проведения эксперимента. Для проведения измерений напряжений и токов используются: мультиметр VC9808, токовые клещи WLT, измерительные комплекты К-505 и К-50. Частота токов и напряжений определяется цифровым мультиметром VC9808. Для записи графиков изменения напряжений и токов в обмотках СДМГ и нагрузке используются возможности цифрового осциллографа LeCroy waveSurfer 432.

Экспериментальная установка (рис. 4.6) работает следующим образом.

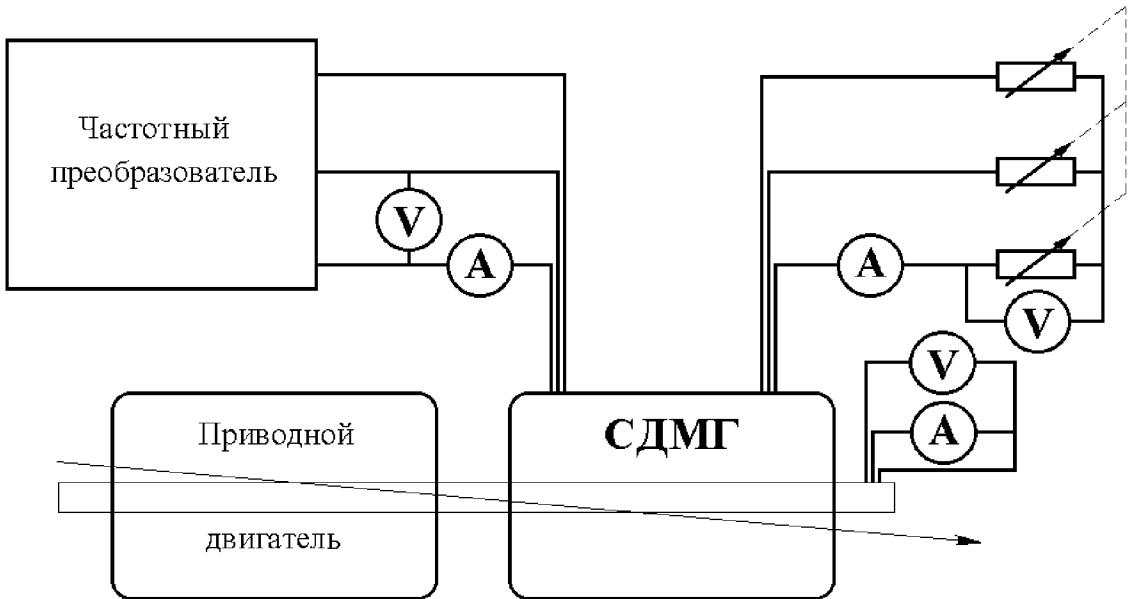


Рис. 4.6. Схема установки для исследования СДМГ.

Приводной двигатель постоянного тока вращает ротор СДМГ. Скорость вращения изменяется в широких пределах в соответствии с заданием. На обмотку возбуждения СДМГ поступает трехфазное напряжение либо с трансформатора с частотой переменного напряжения 50 Гц, либо с частотного преобразователя. При использовании в цепи возбуждения частотного преобразователя, частота напряжения питания варьируется в широких пределах в соответствии с заданием. Питающее обмотку возбуждения напряжение изменяется в соответствии с заданием от нуля до необходимой величины.

Во входную цепь, в цепь нагрузки и в цепь ротора включаются вольтметры и амперметры, на некоторых участках измерения тока выполняются токовыми клещами.

В процессе проведения экспериментальных исследований СДМГ построены характеристики:

1. Внешняя характеристика – зависимость выходного напряжения от тока нагрузки при неизменном напряжении возбуждения, фиксированной частоте выходного напряжения и постоянном коэффициенте мощности (при

$U_1 = \text{const}$, $f_h = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$);

2. Нагрузочная характеристика показывает, как изменяется напряжение генератора с изменением напряжения возбуждения при условии постоянства тока нагрузки и коэффициента мощности (при $I_h = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$);

3. Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать напряжение возбуждения генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (при $U_2 = \text{const}$, $f_h = \text{const}$);

4. Регулировочная характеристика по частоте показывает, как нужно регулировать напряжение возбуждения, чтобы при изменении частоты вращения ротора напряжение на выходе поддерживать заданным при постоянном коэффициенте мощности, неизменной нагрузке и фиксированной выходной частоте (при $U_2 = \text{const}$, $f_h = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$);

5. Зависимость коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки;

6. Зависимость коэффициента полезного действия системы от частоты вращения ротора.

4.3.1. Исследование зависимости выходного напряжения от тока нагрузки – построение внешней характеристики.

Условия проведения эксперимента:

- измерения проводятся при постоянной амплитуде и частоте напряжения на обмотке возбуждения;
- частота вращения ротора и коэффициент мощности нагрузки при измерениях поддерживаются постоянными.

Исходное положение:

- на обмотке возбуждения выставляется номинальное напряжение.
- к выходу генератора подключается трехфазная регулируемая активно - индуктивная нагрузка;

- приводной двигатель вращает ротор с номинальной частотой.

Порядок проведения эксперимента:

1. Для построения внешней характеристики момент приводного двигателя пошагово увеличивается до тех пор, пока амплитуда напряжения на выходе не станет ниже сорока процентов номинального выходного напряжения генератора.

2. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с установленным коэффициентом мощности ($\cos \varphi = 0,8$), чтобы частота вращения ротора, а, следовательно, и частота на выходе генератора установились на номинальных значениях.

3. Напряжение и ток на выходе генератора фиксируются, и момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу исследования внешней характеристики.

4. Полученные результаты нормируются (табл.4.1), и строится внешняя характеристика (рис.4.7).

Табл.4.1. Результаты исследований внешней характеристики

Измеряемые величины	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{I_2}{I_h}$, о.е.	0,30	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,20	1,30
моделирование								
$\frac{U_2}{U_h}$, о.е.	1,44	1,32	1,25	1,15	1	0,90	0,61	0,41
эксперимент								
	1,40	1,27	1,20	1,10	0,96	0,85	0,56	0,35

Результаты эксперимента:

- выходное напряжение с увеличением тока нагрузки при постоянной величине напряжения возбуждения уменьшается,

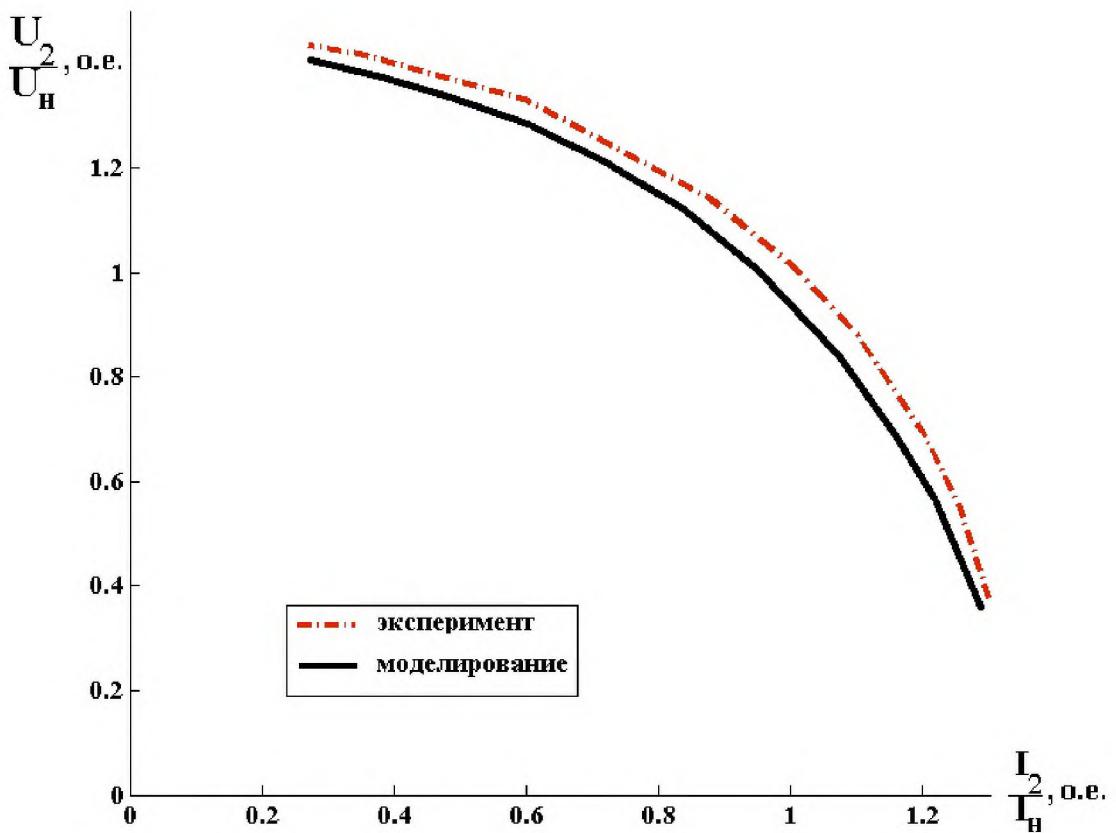


Рис. 4.7. Внешняя характеристика СДМГ (при $U_1=\text{const}$, $f_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$).

- внешняя характеристика имеет нелинейный характер, и закон изменения внешней характеристики описывается достаточно точно полиномом второй степени.

4.3.2. Исследование зависимости напряжения на выходе генератора от напряжения возбуждения – построение нагрузочной характеристики.

Условия проведения эксперимента:

- частота напряжения на обмотке возбуждения в процессе эксперимента не меняется;
- частота вращения ротора, величина выходного тока и коэффициент мощности нагрузки поддерживаются постоянными.

Исходное положение:

- на выходе генератора подключается трехфазная регулируемая активно - индуктивная нагрузка;
- выходной ток генератора – номинальный;

– приводной двигатель вращает ротор с номинальной частотой, частота выходного напряжения – постоянная.

Порядок проведения эксперимента:

1. Для построения нагрузочной характеристики генератора пошагово увеличивается нагрузка с обеспечением постоянства коэффициента мощности и частоты выходного напряжения.

2. На каждом шаге величина напряжения возбуждения регулируется таким образом, чтобы обеспечить равенство выходного тока номинальному.

3. Значения напряжения возбуждения и выходное напряжение генератора фиксируются – происходит переход к следующему шагу исследования нагрузочной характеристики.

4. Полученные результаты нормируются (табл.4.2), и строится нагрузочная характеристика (рис.4.8).

Табл.4.2. Результаты исследований нагрузочной характеристики

Измеряемые величины	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{U_1}{U_{1H}}$, о.е.	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,10
моделирование								
$\frac{U_2}{U_H}$, о.е.	0,10	0,30	0,45	0,58	0,68	0,86	1,00	1,05
эксперимент								
	0,06	0,26	0,41	0,54	0,65	0,83	0,96	1,01

Результаты эксперимента:

- выходное напряжение с увеличением напряжения возбуждения при постоянной величине тока нагрузки увеличивается,
- нагрузочная характеристика имеет нелинейный характер, и закон изменения нагрузочной характеристики описывается достаточно точно полиномом второй степени.

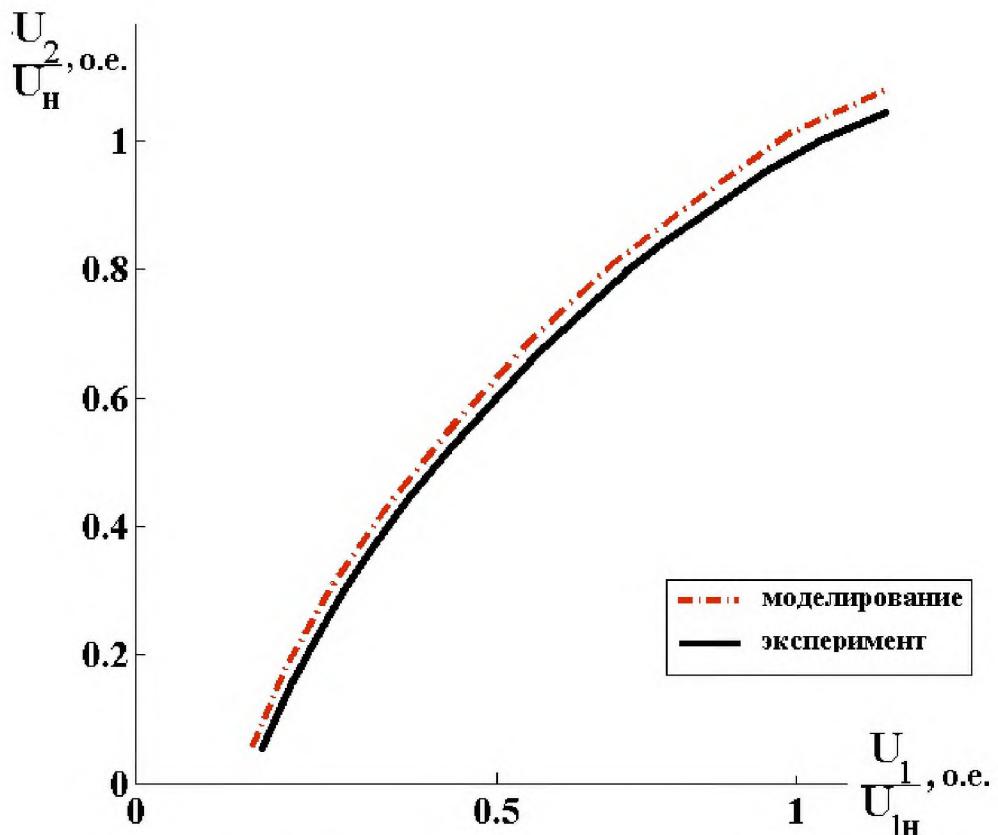


Рис. 4.8. Нагрузочная характеристика СДМГ (при $I_h=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$).

4.3.3. Построение регулировочной характеристики.

Условия проведения эксперимента:

- измерения проводятся при поддержании постоянной величины напряжения на выходе генератора;
- частота вращения ротора и коэффициент мощности нагрузки при измерениях поддерживаются постоянными.

Исходное положение:

- на выходе генератора подключается трехфазная регулируемая активно - индуктивная нагрузка;
- приводным двигателем ротор вращается с номинальной частотой при малой нагрузке.

Порядок проведения эксперимента:

1. Для построения регулировочной характеристики момент приводного двигателя пошагово увеличивается;

2. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с коэффициентом мощности, постоянным для всех опытов определения регулировочной характеристики, и при обеспечении равенства частоты на выходе генератора номинальному значению;

3. Напряжение возбуждения подстраивается до достижения выходным напряжением номинального значения;

4. Напряжение возбуждения и ток на выходе генератора фиксируются – происходит переход к следующему шагу исследования регулировочной характеристики.

5. Полученные результаты нормируются (табл.4.3), и строится регулировочная характеристика (рис.4.9).

Табл.4.3. Результаты исследований регулировочной характеристики

Измеряемые величины	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{I_2}{I_h}$, о.е.	0,00	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20
моделирование								
$\frac{U_1}{U_{1h}}$, о.е.	0,42	0,43	0,44	0,48	0,61	0,78	1,00	1,25
эксперимент								
	0,44	0,45	0,46	0,51	0,64	0,82	1,04	1,30

Результаты эксперимента:

- для поддержания величины выходного напряжения постоянной при увеличении нагрузки генератора необходимо увеличивать напряжение возбуждения;
- регулировочная характеристика имеет нелинейный характер, и закон изменения нагрузочной характеристики описывается достаточно точно полиномом второй степени.

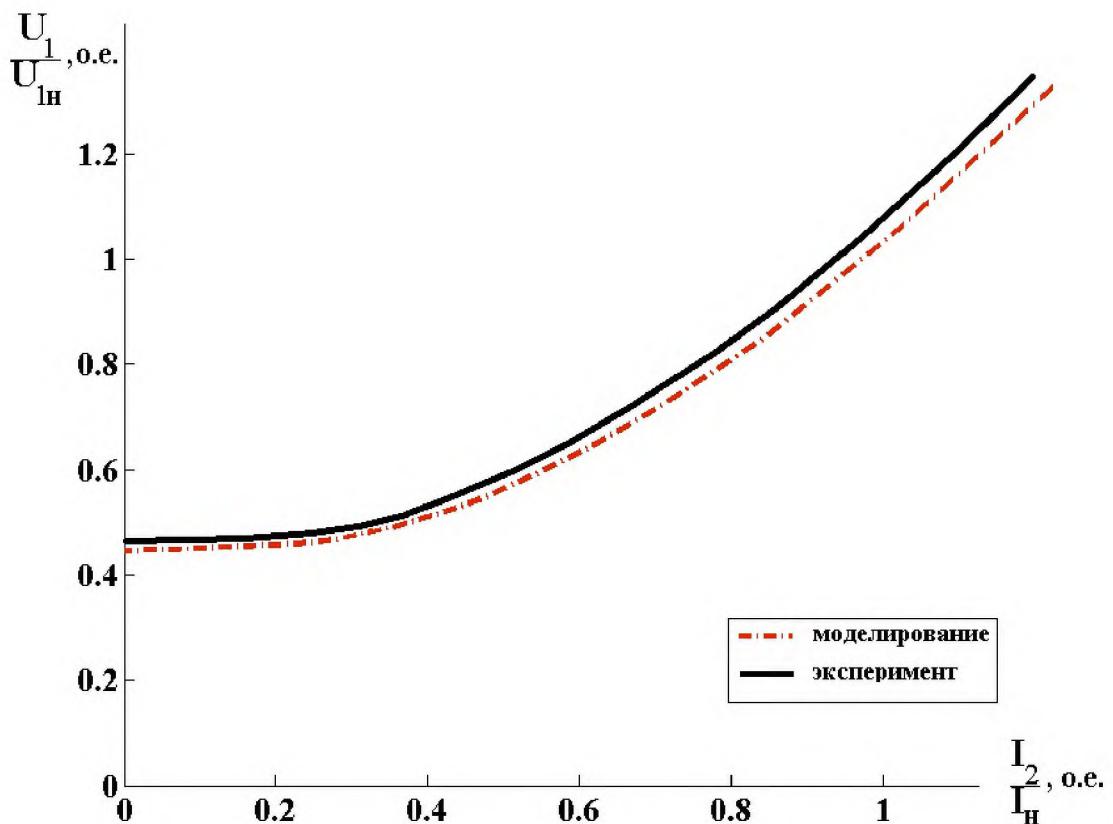


Рис. 4.9. Регулировочная характеристика СДМГ (при $U_2=\text{const}$, $f_H=\text{const}$).

4.3.4. Построение регулировочной характеристики по частоте.

Условия проведения эксперимента:

- величина выходного напряжения генератора поддерживается номинальной изменением напряжения на обмотке возбуждения;
- частота выходного напряжения при построении регулировочной характеристики по частоте поддерживается неизменной за счет изменения частоты напряжения возбуждения;
- величина нагрузки и коэффициент мощности при проведении исследования поддерживаются постоянными.

Исходное положение:

- на выходе генератора подключается трехфазная регулируемая активно - индуктивная нагрузка;

- приводной двигатель вращает ротор с частотой вращения шестьдесят процентов от номинального значения.

Порядок проведения эксперимента:

1. Для построения регулировочной характеристики по частоте момент приводного двигателя пошагово увеличивается до достижения номинального значения частоты вращения ротора;
2. Обеспечение номинального значения частоты выходного напряжения обеспечивается регулировкой частоты напряжения возбуждения по соответствующему закону;
3. Подстройкой величины напряжения возбуждения достигается номинальное значение выходного напряжения;
4. Величины напряжения возбуждения и частоты вращения ротора фиксируются – происходит переход к следующему шагу исследований регулировочной характеристики по частоте;
5. Полученные результаты нормируются (табл.4.4), и строится характеристика регулировочная по частоте (рис.4.10).

Табл.4.4. Результаты исследований характеристики регулировочной по частоте

Измеряемые величины	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
$\frac{n}{n_h}$, о.е.	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
моделирование					
$\frac{U_1}{U_{1H}}$, о.е.	0,80	0,82	0,87	0,92	1,00
эксперимент					
	0,84	0,86	0,90	0,97	1,05

Результаты эксперимента:

- для поддержания величины выходного напряжения постоянной при уменьшении частоты вращения генератора и регулировании частоты

выходного напряжения за счет изменения частоты необходимо уменьшать напряжение возбуждения;

- регулировочная характеристика имеет нелинейный характер, и закон изменения нагрузочной характеристики описывается достаточно точно полиномом второй степени.

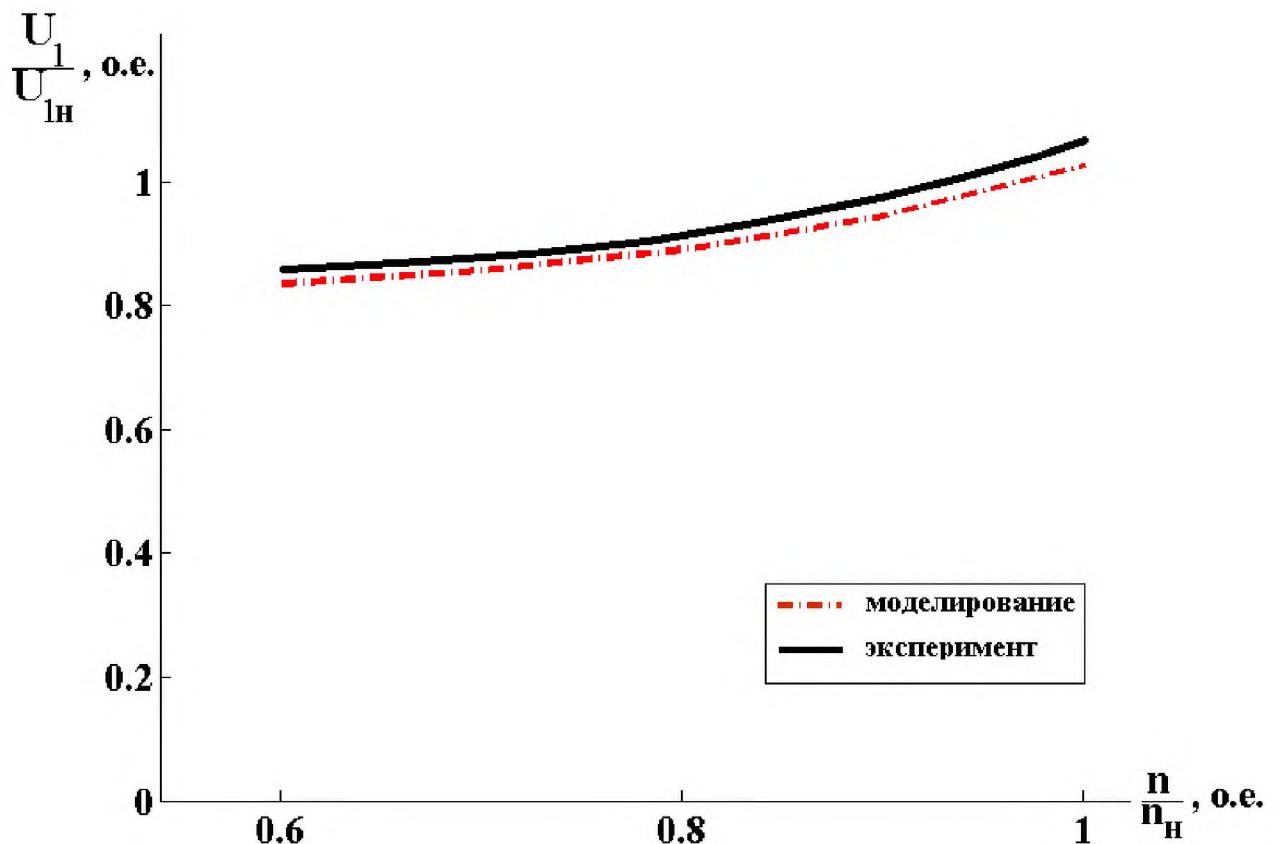


Рис. 4.10. Характеристика регулировочная по частоте
(при $U_2 = \text{const}$, $f_H = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$).

4.3.5. Исследование зависимости коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки.

Условия проведения эксперимента:

- измерения проводятся при поддержании постоянной величины напряжения на выходе генератора;
- частота вращения ротора и коэффициент мощности нагрузки при измерениях поддерживаются постоянными.

Исходное положение:

- на выходе генератора подключается трехфазная регулируемая активно - индуктивная нагрузка;
- приводным двигателем ротор вращается с номинальной частотой при малой нагрузке.

Норядок проведения эксперимента:

1. Для построения регулировочной характеристики момент приводного двигателя пошагово увеличивается;
2. Для каждого значения момента подбирается нагрузка с установленным коэффициентом мощности при обеспечении постоянной частоты на выходе генератора;
3. Напряжение возбуждения подстраивается до достижения выходным напряжением номинального значения;
4. Напряжение и ток в цепи возбуждения, а также напряжение и ток на нагрузке генератора фиксируются;
5. Вычисляется мощность на нагрузке, мощность в цепи возбуждения и подводимая механическая мощность.
6. Коэффициент полезного действия генератора вычисляется как отношение мощности, выделяемой на нагрузке к полной подводимой к генератору мощности.
7. Момент приводного двигателя увеличивается до следующего значения – происходит переход к следующему шагу построения зависимости.
8. Полученные результаты нормируются (табл.4.5), и строится регулировочная характеристика (рис.4.11).

Результаты эксперимента:

- для поддержания величины выходного напряжения постоянной при увеличении нагрузки генератора необходимо увеличивать напряжение возбуждения;

– зависимость коэффициента полезного действия от мощности генератора имеет явный нелинейный характер, поэтому достаточно точное описание закона его изменения возможно лишь полиномом четвертой степени.

Табл.4.5. Результаты исследований регулировочной характеристики

Измеряемые величины	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{P_2}{P_h}$, о.е.	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
$\frac{\eta}{\eta_{max}}$, о.е.	моделирование							
	0,00	0,56	0,81	0,94	0,98	1,00	0,99	0,98
	эксперимент							
	0,00	0,52	0,76	0,89	0,94	0,97	0,96	0,94

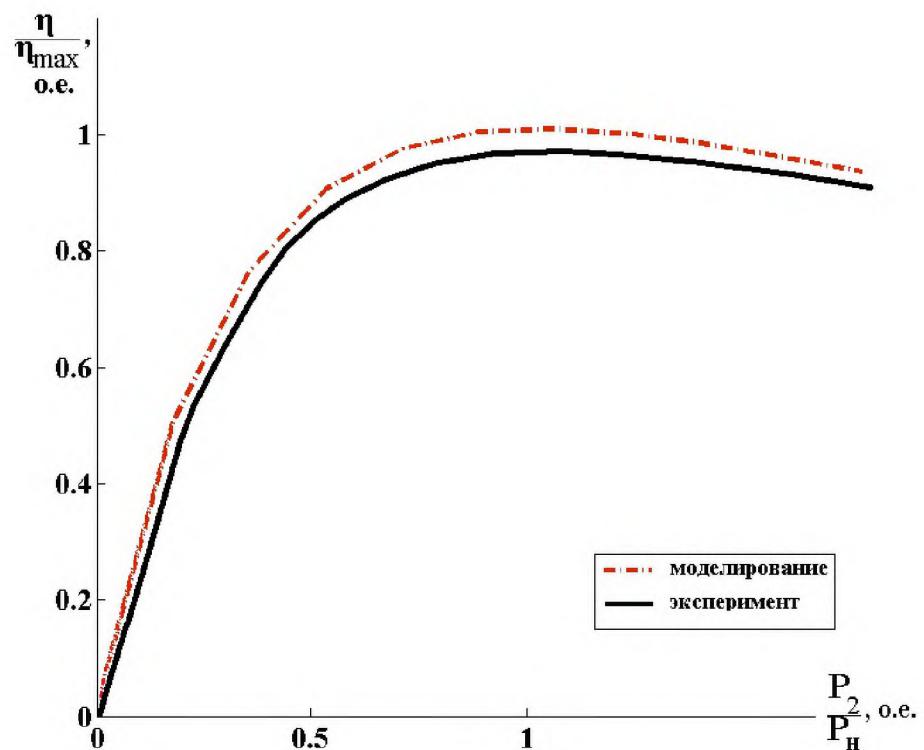


Рис. 4.11. График зависимости КПД от мощности генератора.

4.3.6. Исследование формы напряжения и тока генератора.

В процессе исследования опытного образца совмещенного двухмашинного генератора установлено, что напряжение на его выходе имеет синусоидальную форму. Частота выходного напряжения и тока прямо пропорциональна частоте вращения ротора генератора и частоте напряжения возбуждения. При электромеханических преобразованиях в совмещенном двухмашинном генераторе дополнительные гармоники не формируются. На осциллограммах выходного напряжения и тока опытного образца (рис.4.12) наблюдаются зубцовые гармоники, которые возникли по причине отсутствия скоса пазов в магнитопроводе электрической машины, на основе которой создан опытный образец. Борьба с зубцовыми гармониками ведется скосом пазов на роторе, но магнитопроводы опытного образца скоса пазов не имеют.

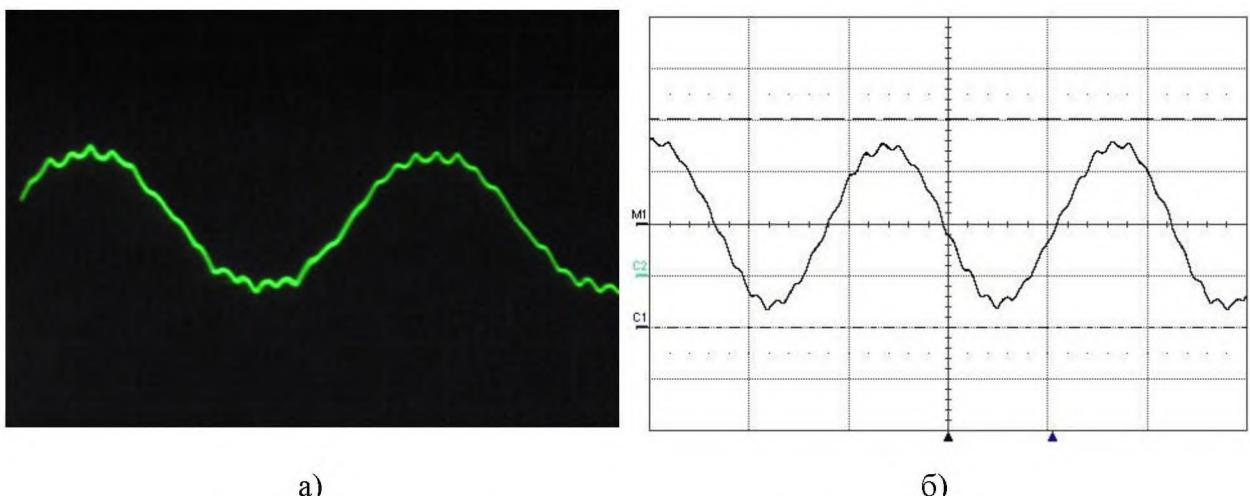


Рис. 4.12. Осциллограммы на выходе генератора: а) тока, б) напряжения.

ВЫВОДЫ:

1. С использованием разработанных в главе рекомендаций по выполнению обмоток в совмещенном магнитопроводе электротехнического комплекса, позволяющих исключить взаимовлияние магнитных полей входящих в его состав электрических машин, был создан опытный образец совмещенного двухмашинного генератора;
2. Для проведения экспериментов с опытным образцом совмещенного двухмашинного генератора создан универсальный стенд, исследованы процессы, происходящие в электротехническом комплексе, и определены его основные характеристики;
3. Характеристики, построенные по итогам исследования опытного образца генератора, подтверждают результаты моделирования. Погрешности полученных экспериментальным путем характеристик имеют отклонения от теоретических не более 5%, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов экспериментальных исследований с теоретическими положениями; а это, в свою очередь, свидетельствует об адекватности разработанной математической модели автономного источника электроснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований совмещенного двухмашинного генератора можно сделать следующие выводы.

1. В результате анализа результатов известных исследований и технических решений автономных источников электроснабжения определены присущие им недостатки, многие из которых устраняются применением новой схемы их построения на базе совмещенного двухмашинного генератора (СДМГ). В связи с необходимостью оценки возможности использования новой схемы была признана актуальной задача исследования предложенного электротехнического комплекса.

2. Для исследования новой схемы разработана математическая модель в дифференциальных уравнениях, проведена классификация СДМГ. На основании полученных выражений, в пакете Simulink реализована модель, позволяющая исследовать процессы в СДМГ.

3. Симуляцией процессов с использованием модели определены характеристики СДМГ: внешняя, нагрузочная, регулировочная, регулировочная по частоте, получены зависимости КПД от мощности. Изучены режимы, особенности работы и энергетические соотношения генератора.

4. Выведены аналитические зависимости для амплитуд и фаз токов обмоток и электромагнитного момента СДМГ в установившемся режиме работы как функции от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки. Полученные выражения позволяют исследовать процессы в СДМГ методами математического анализа.

5. Выработаны рекомендации по подбору параметров разнополюсных обмоток, позволяющие решить проблему их взаимовлияния

через магнитные поля при совмещении их в общем магнитопроводе электротехнического комплекса.

6. С использованием рекомендаций по подбору параметров разнополюсных обмоток создан опытный образец совмещенного двухмашинного генератора.

7. Для проведения экспериментов с опытным образцом СДМГ создан универсальный стенд, исследованы процессы, происходящие в электротехническом комплексе, и определены его основные характеристики.

8. Проведены экспериментальные исследования процессов в СДМГ. Характеристики, построенные по итогам исследования опытного образца генератора, подтверждают результаты моделирования. Погрешности полученных экспериментальным путем характеристик имеют отклонения от теоретических не более 5%, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов экспериментальных исследований с теоретическими положениями; а это, в свою очередь, свидетельствует об адекватности разработанной математической модели автономного источника электроснабжения.

9. Полученные в результате теоретических и подтвержденные при экспериментальных исследованиях внешняя, нагрузочная и регулировочная характеристики генератора, а также зависимость КПД от мощности нагрузки, имеют внешнее сходство с аналогичными характеристиками синхронного генератора. Это позволяет сделать вывод о возможности замены электротехнических комплексов на базе синхронных генераторов на электротехнические комплексы на базе совмещенного двухмашинного генератора. Преимуществом применения последних является возможность регулирования частоты выходного напряжения за счет изменения частоты напряжения возбуждения и получение вследствие этого напряжения заданной частоты на выходе генератора без применения полупроводниковых преобразователей в широком диапазоне частот вращения ротора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Радин В.И., Загорский А.Е., Белоновский В.А. Электромеханические устройства стабилизации частоты. М.: Энергоиздат, 1981. 168 с.
2. Радин В.И., Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управляемые электрические генераторы при переменной частоте. М.: Энергия, 1978. 152 с.
3. Радин В.И., Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Электромеханические устройства стабильной частоты. М.: Энергия, 1978. 144 с.
4. А.с. 921020 СССР, МКИ ³ Н02Р 7/46, Н02Р 9/04. Электропривод постоянной скорости / Г.А. Сипайлов, В.А. Ш.С. Ройз, В.М. Кузьмин, А.Б. Цукублин (СССР). - № 2835198/24-07; заявл. 26.10.79; опубл. 15.04.82, Бюл. № 14. 6 с.
5. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы. М.: Оборонгиз, 1959. 594 с.
6. Красношапка М.М. Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты. Киев: Техника, 1974. 168 с.
7. Кузьмин В.М. Привод постоянной скорости с МДП // Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем: Межвуз. сб. научн. тр. / Томск: Томский политехнический институт, 1979. 160-162 с.
8. Злочевский В.С. Системы электроснабжения пассажирских самолетов. М.: Машиностроение, 1971. 320 с.
9. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, Ч. 2. - Машины переменного тока: Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. - 3 -е изд., перераб. Л.: Энергия, 1973. 648 с.
10. Цукублин А.Б., Лукутин Б.В. Вентильные электрические машины: Учеб. пособие. Томск: Томский политехнический институт, 1984. 94 с.
11. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.

12. Дубровский И.Н. Трёхфазный автономный источник электропитания стабильной частоты: дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук / Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. Комсомольск-на-Амуре, 2009. 193 с.
13. Титов В.Г., Хватов О.С. Автономный генератор по схеме машины двойного питания // Электротехника. 1998. № 8.
14. Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А. Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем, Ч. 1. Учеб. пособие. Новосибирск: Издательство Новосибирского государственного технического университета, 1997. 60 с.
15. Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М.: Энергия, 1977. 280 с.
16. А.с. 729776 СССР, МКИ ² Н02М 5/48, Н02Р 13/30. Машинно-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / Ю.И. Рябчиков, В.А. Денисов, Ш.С. Ройз, В.С. Саяпин, В.М. Кузьмин (СССР). - № 2484113/24-07; заявл. 10.05.77; опубл. 25.04.80, Бюл. № 15. 7 с.
17. А.с. 782086 СССР, МКИ ³ Н02М 5/48. Машинно-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / В.С. Саяпин, Ш.С. Ройз, В.А. Денисов, В.М. Кузьмин (СССР). - № 2718251/24-07; заявл. 29.01.79; опубл. 23.11.80, Бюл. № 43. 4с.
18. А.с. 104862 СССР, МКИ ³ Н02К 29/00. Машинно-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, В.М. Кузьмин, Б.В. Лукутин, А.И. Озга (СССР). - № 338001/24-07; заявл. 08.01.82; опубл. 07.10.83, Бюл. № 37. 6 с.
19. А.с. 1051660 СССР, МКИ ³ Н02К 29/00. Машинно-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, В.М. Кузьмин, А.И. Озга (СССР). - № 3383511/24-07; заявл. 20.01.82; опубл. 30.10.83, Бюл. № 40. 5 с.

20. А.с. 1144171 СССР, МКИ ³ Н02К 29/00, Н02М 5/48. Машино-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, Б.В. Лукутин, А.И. Озга, А.В. Пяталов, В.М. Кузьмин, (СССР). - № 363340/24-07; заявл. 05.08.83; опубл. 07.03.85, Бюл. № 9. 6 с.
21. А.с. 1149357 СССР, МКИ ³ Н02М 5/48, Н02К 29/00. Машино-вентильный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты / Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, В.М. Кузьмин, А.И. Озга (СССР). - № 22.3576674/24-07; заявл. 11.04.83; опубл. 07.04.85, Бюл. № 13. 5 с.
23. Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1974. 128 с.
24. Брускин Д.Э., Мыцык Г.С., Ульяновский В.Н. Система электроснабжения стабильной частоты на базе генератор-модулятора со статическим преобразователем // Труды Московского энергетического института. 1976. № 287. 62-65 с.
25. Киница О.И. Автономный источник напряжения стабильной частоты для систем децентрализованного электроснабжения: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. Комсомольск-на-Амуре, 2006. 18 с.
26. Киница О.И., Дубровский И.Н. Автономный источник трёхфазного напряжения стабильной частоты на основе модуляционного вентильного генератора // Актуальные проблемы управления транспортными и техническими системами: сб. тр. II Всероссийской науч-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» 13-15 ноября 2007 г. Санкт-Петербург / под общ. ред. д-ра экон. наук, профессора Н.В. Афанасьевой – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. 112-118 с.
27. Кузьмин В.М., Ройз Ш.С. Электромагнитные процессы в источнике с электромашинным формированием кривой выходного напряжения //

- Расчет и исследование динамических показателей элементов и систем автоматизированного электропривода: Межвуз. сб. научн. тр. / Хабаровск: Хабаровский политехнический институт, 1990.
- 28.Кузьмин В.М., Ройз Ш.С., Цукублин А.Б. Энергетические соотношения в модуляционном вентильном генераторе // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвуз. сб. / Красноярск: Красноярский политехнический институт, 1981. 54-59 с.
- 29.Кузьмин В.М. Автономный источник с электромашинным формированием кривой выходного напряжения: Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук / Томский политехнический институт. Томск, 1981. 20 с.
- 30.Кузьмин В.М., Дубровский И.Н. Автономный источник переменного напряжения стабильной частоты на основе двухмашинного совмещённого генератора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2.
- 31.Лукутин Б.Ф., Петрович В.П., Трофименко Б.Е., Цукублин А. Б., Шварцкопф Л.М. Источник стабильной частоты и напряжения при переменной скорости вращения приводного вала // Вопросы теории и проектирования электрических машин: Сб. научн. тр. / Томск: Томский политехнический институт, 1974. 41-43 с.
- 32.Попов М.И. Разработка и исследование системы генерирования переменного тока стабильной частоты при изменяющейся скорости вращения генератора без привода постоянной скорости: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Киевский ордена трудового Красного знамени институт инженеров гражданской авиации. Киев, 1970. 121 с.
- 33.Ройз Ш.С., Скороспешкин А.И. Автономный источник переменного тока стабильной частоты // Известия Томского политехнического института / Томск: Томский политехнический институт, 1972. т. 229. 98-100 с.
- 34.Саяпин В.С., Кузьмин В.М., Ройз Ш.С. ЭДС модуляционного вентильного генератора // Исследование специальных электрических машин и

- машино-вентильных систем: Межвуз. сб. научн. тр. / Томск: Томский политехнический институт, 1980. 48-52 с.
35. Саяпин В.С., Ройз Ш.С., Кузьмин В.М. Модуляционные вентильные генераторы стабильной частоты // Электрооборудование и автоматизация промышленных установок: Сб. научн. тр. / Хабаровск: Хабаровский политехнический институт, 1977. 69-75 с.
36. Денисов В.А. Разработка и исследование модуляционных вентильных генераторов: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Томский политехнический институт. Томск, 1975. 16 с.
37. Дубровский И.Н., Кузьмин В.М. Автономный источник переменного напряжения стабильной частоты на основе двухмашинного совмещенного генератора // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. № 3 (26). Вып. 1. 121-127 с.
38. Дубровский И.Н., Кузьмин В.М. Автономный источник электропитания на основе двухмашинного совмещенного генератора // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов. Материалы докл. 37 научно-технической конференции аспирантов и студентов 3-17 апреля 2007 г. Ч.1. / Редкол. А.И. Евстигнеев и др.- Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. 54-55 с.
39. Дубровский И.Н., Кузьмин В.М. Экспериментальные исследования источника переменного напряжения стабильной частоты // Новые технологии и материалы. Инновации и инвестиции в промышленности Дальнего Востока. Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции 15-19 октября 2007 г. Ч.1 / Редкол. А.М. Шпилев и др.- Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. 91-93 с.
40. Патент на полезную модель № 82076 МПК H02M 5/48, H02K 29/00. Машино-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты / В.М. Кузьмин, И.Н. Дубровский, А.И. Якушкин (Россия).- № 2008120578/22; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10.-2 с.

- 41.Петухов, А.М. Расчет параметров совмещенного электромашинного генератора автономного источника электропитания переменного тока / А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, И.Н. Дубровский// Ученые записки КнАГТУ. – 2011. – №III-1(7). – С.21.
- 42.Петухов, А.М. Автономный источник электропитания переменного тока стабильной частоты/ А.М. Петухов// Материалы международной научно – технической конференции «Электротехнические комплексы и системы». – Комсомольск - на - Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ» . – 2010. – С.229.
- 43.Петухов, А.М. Определение зависимости амплитуды и частоты ЭДС фаз выходных обмоток совмещенного электромашинного генератора от частот возбуждения и вращения ротора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин// Сборник докладов V международной научно – практической заочной конференции «Электротехника и энергоэффективные технологии». – Липецк: «ЛГТУ» , 2012. – С.70.
- 44.Патент на полезную модель № 129719 (Россия). Совмещенный электромашинный генератор /Петухов А.М. – Опубл. в Б. И., 27.06.2013.
- 45.Петухов, А.М. Использование магнитного совмещения электрических машин для генерации электрической энергии/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской научно – практической конференции. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – С.128.
- 46.Адкинс Б.А. Общая теория электрических машин / Пер. с англ. М.; Л, Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
- 47.Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. 928 с.
- 48.Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
- 49.Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1980. 176 с.

- 50.Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- 51.Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М., Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
52. Макаров В. Г. Оценка точности математической модели трехфазного асинхронного двигателя// Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий. Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции. Том 1. Уфа. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2009.
53. Хрисанов В.И. Математическая модель асинхронных машин в фазных осях статора// Электротехника. 2004. №7.
- 54.Петухов, А.М. Математическая модель совмещенного электромашинного генератора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, Кузьмин, Р.В., И.Н. Дубровский // Электротехника. – 2013. – №5. – С.45.
- 55.Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. 312 с.
- 56.Коник Б.Е. Учет дискретности активной зоны в электрических машинах. Haifa: Gutenberg, 2008. 230 с.
- 57.Петухов, А.М. Режимы работы электрических машин в совмещенном генераторе/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: часть 2. Материалы докладов 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов. – Комсомольск - на - Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ» , 2013. – С.208.
- 58.Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб. Питер, 2008. 288 с.
- 59.Попов В. И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты. М.: Энергия, 1980. 175 с.
- 60.Петухов, А.М. Возможности совмещения электрических машин в общем магнитопроводе/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Научно-техническое

- творчество аспирантов и студентов: часть 2. Материалы докладов 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов. – Комсомольск - на - Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ» , 2013. – С.211.
61. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. заведений. - 3 - е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
62. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов.-2-е изд., перераб. М.: Высшая школа, Логос, 2000. 607 с.
63. Петухов, А.М. Особенности формирования магнитного поля воздушного зазора и ЭДС фаз совмещенного электромашинного генератора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, И.Н. Дубровский // Ученые записки КнАГТУ. – 2013. – №1(13). – С.12.

Приложение №1

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВПО «КнАГТУ»

Шпилев А.М.

октября 2013 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы **Петухова А.М.** «Автономный источник электроснабжения переменного тока», выполненной на кафедре «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и направленной на разработку и исследование автономного источника электроснабжения переменного тока на основе совмещенного двухмашинного генератора; используются центром энергосбережения в виде технической документации и рекомендаций по разработке энергосберегающих мероприятий при построении систем на основе совмещенного электромашинного генератора. Результаты диссертационной работы использованы при разработке энергосберегающих мероприятий для поселковых энергетических систем Хабаровского края и в учебном процессе при обучении ответственных за энергосбережение предприятий и организаций региона.

Директор учебно-научного
инновационного центра

Суздорф В.И.

Приложение №2

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВПО «КнАГТУ»



Шпилев А.М.
10 2013 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы **Петухова А.М.**, направленной на разработку и исследование автономного источника электроснабжения переменного тока на основе совмещенного двухмашинного генератора и выполненной на кафедре «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 140601 «Электромеханика» и бакалавров по направлениям 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», 140200 «Электроэнергетика» и 140400 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин «Математическое моделирование электрических машин», «Электрические машины», «Электроэнергетика» при проведении практических и лабораторных занятий по указанным курсам, а также при курсовом, дипломном проектировании и при подготовке магистерских диссертаций по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика и электротехника».

Первый проректор
КнАГТУ

Куделько А.Р.

Декан электротехнического
Факультета КнАГТУ

Степанов А.Н.

Заведующий кафедрой
«Электромеханика»

Сериков А.В.

Приложение №3

«УТВЕРЖДАЮ»
Управляющий директор ОАО «Амурская ЭРА»
Г.А.Туизов
«12» 2013 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов научно-исследовательских работ

В Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете на кафедре «Электромеханика» выполнена диссертационная работа Петухова А.М. по созданию автономных источников переменного тока стабильной частоты.

Результаты работы в форме технической документации и методик расчетов переданы для рассмотрения возможности использования при разработке, проектировании и подготовке производства автономных источников электропитания переменной частоты для гальванической развязки приемников электрической энергии от питающей сети.

Такая необходимость вызвана требованиями ФСТЭК РФ к питающим электрическим сетям лаборатории защиты информации после проведения сертификации устройства по требованиям безопасности.

Заместитель директора ОАО «Амурская ЭРА»,
начальник лаборатории защиты информации
к.т.н., доктор наук АЭН РФ

Г.Ф.Вильдайкин