

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный  
университет (национальный исследовательский университет)»

*На правах рукописи*



Журавлев Артем Михайлович

УДК62-83::621.313.3

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОБЪЕКТОВ  
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальности: 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

05.09.12 – “Силовая электроника”

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук

**Усынин Ю.С.**

Научный руководитель –  
доктор технических наук

**Григорьев М.А.**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ .....	10
1.1. Обзор технологических объектов, питающихся от полупроводниковых преобразователей .....	10
1.2. Особенности работы электропривода эксгаустера кислородного конвертора .....	13
1.3. Обзор проблем в электроприводах эксгаустеров .....	16
1.4. Существующие пути повышения надежности полупроводниковых преобразователей и электрических приводов .....	21
1.5. Постановка задачи исследований .....	25
1.6. Выводы по главе 1 .....	27
ГЛАВА 2. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	29
2.1. Анализ существующих методов повышения надежностных показателей .....	29
2.1.1. Экономический подход обоснования надежностных показателей электропривода .....	31
2.1.2. Анализ существующих методов увеличения времени безотказной работы электроприводов .....	36
2.1.3. Метод введения избыточности системы .....	42
2.1.4. Применение метода введения избыточности для преобразователей напряжения .....	44
2.2. Постановка задачи оптимизации полупроводниковых преобразователей .....	65
2.3. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей .....	68
2.4. Результаты оптимизации .....	75
2.5. Выводы по главе 2 .....	80
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РАБОТАЮЩЕГО В ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ .....	82
3.1. Постановка задачи математического моделирования электроприводов, работающих в пускотормозных режимах .....	82
3.2. Обзор существующих математических моделей .....	83
3.3. Принятые допущения .....	88
3.4. Синтез математической модели .....	89
3.5. Оценка адекватности разработанной математической модели .....	92
3.6. Выводы по главе 3 .....	94

ГЛАВА 4. ПРИМЕР ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ.....	96
4.1. Анализ основных причин отказов электрических машин .....	96
4.2. Методика синтеза схем силовых цепей электроприводов.....	104
4.3. Пример реализации методики синтеза электропривода с импульсно векторной схемой управления .....	110
4.3.1. Идея импульсно-векторного способа управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением. ....	122
4.3.2. Математическая модель импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением.....	130
4.3.3. Преобразование Кларка.....	135
4.3.4. Описание особенностей ввода резерва в схеме импульсно- векторного управления.....	142
4.4. Выводы по главе 4.....	144
Заключение.....	146
Литература .....	148

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В современной металлургии за последние десятилетия существенно возросла значимость кислородно-конвертерного производства. Так, по данным металлургов, количество выплавляемой стали в кислородных конвертерах возросло с 431 до 811 млн. т. в год с 1996 по 2006 гг. что составило 65,5 % от суммарного мирового объема металла. В частности, на Южном Урале конвертерное производство широко представлено на крупных промышленных предприятиях: Челябинском металлургическом комбинате, Магнитогорском металлургическом комбинате.

В настоящее время в мире насчитывается около 280 кислородно-конвертерных цехов, которые производят порядка 70% от общего числа углеродистой, низколегированной и легированной стали в год. Примерно седьмая часть (35-40) таких цехов располагается на территории России. В каждом из цехов находится обычно 3 или 4 кислородных конвертера, каждый из которых в свою очередь оснащен промышленным дымососом – эксгаустером. Таким образом, в настоящий момент на территории нашей страны функционирует порядка 100 мощных эксгаустеров. Подавляющее большинство этих установок было создано еще в советские годы, лишь незначительная часть из них была введена в эксплуатацию в XXI веке. Этот факт говорит о том, что на сегодняшний день достаточно большой группе механизмов требуется модернизация.

По данным опроса специалистов ОАО ЧМК, отказы эксгаустера на кислородном конвертере случаются с частотой в среднем один раз в два месяца. Причиной остановок в настроенной системе электропривода служат отключение преобразователя частоты по максимально токовой защите, а также отказы в системе возбуждения синхронного двигателя.

Существующие системы с преобразователями частоты решают

проблему регулирования производительности, однако, часто имеют избыточные регулировочные возможности, большие капиталовложения, требуют высокой подготовки обслуживающего персонала, и, что самое главное, имеют относительно невысокие показатели надежности. Для механизмов, не требующих большой точности регулирования (к которым можем отнести и эксгаустеры), имеется потребность в простых, относительно недорогих, но отличающихся повышенной надежностью системах электроприводов. Одной из таких систем является импульсно-векторная система управления.

Одним из способов повышения надежности электропривода является применение синхронной реактивной машины с независимым возбуждением (СРМНВ), обладающей рядом преимуществ по сравнению с традиционными типами электрических машин. По этой причине задача создания новой системы управления, отличающейся повышенной надежностью, для перспективного типа электропривода является актуальной.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0154 от 28 ноября 2014 года (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0154).

**Степень научной разработанности проблемы.** Большой вклад в общую теорию синхронных реактивных машин внесли Weh, H., Vagati A., Lipo T. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Горожанкин А.Н. и др.

Все большее внимание специалистов в области управления привлекают системы с импульсно-векторным формированием электромагнитного момента. Разработки таких систем управления для машин общепромышленной серии вели Давыдкин М.Н., Валов А.В., Басков С.Н. Больших успехов в создании и исследовании бездатчиковой системы с импульсно-векторным управлением асинхронным двигателем добилась Козина Т.А.

Однако, несмотря на большое количество исследований в этой области, вопрос создания надежного и недорого электропривода на базе перспективной синхронной реактивной машины с независимым возбуждением для общепромышленных механизмов до конца не решен.

**Объекты исследования** – силовые полупроводниковые преобразователи и мощные электроприводы общепромышленных механизмов.

**Предмет исследования** – взаимосвязи между надежностными показателями полупроводниковых преобразователей, электроприводов и их параметрами, а также процессы в системах с импульсно-векторным управлением.

**Целью** диссертационной работы является повышение надежностных силовых полупроводниковых преобразователей и электроприводов промышленных установок.

**Идея работы.** Повышение надежностных показателей в объектах исследования достигается за счет выбора рациональной схемы силовых цепей, резервирования узлов полупроводникового преобразователя и использования рациональных структур управления электроприводами.

**Задачи исследования:**

- уточнение и анализ требований технологического процесса к электроприводам промышленных дымососов;
- синтез методики оптимизации схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей;
- разработка математической модели электроприводов, работающих в пуско-тормозных режимах;
- оценка адекватности математической модели;
- разработка методики синтеза электроприводов по критерию надежности;

**Методы исследований.** В процессе выполнения работы использовались

основные положения теории электрических машин, теории электропривода, теории полупроводниковой преобразовательной техники, частотные методы теории автоматического управления, методы математического моделирования систем на ЭВМ, метод конечных элементов, коэффициентный метод расчета надежности.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается корректным применением математических методов, обоснованностью принятых допущений, согласованностью экспериментальных данных и результатов моделирования исследуемых процессов.

### **Научные положения, выносимые на защиту и их научная новизна**

1. Предложена методика оптимизации схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей, содержащая этапы выбора конфигурации схем силовых цепей по критерию минимума полупроводниковых ключей, выбора оптимальных количества фаз и резервных узлов, и *отличающаяся* принятым критерием – вероятностью безотказной работы. По сравнению с известной методикой синтеза по критерию суммарных годовых затрат разработанная методика позволяет снизить затраты на установленную мощность полупроводникового преобразователя.

2. Предложена математическая модель синхронных электроприводов, в которой параметры электрической машины представлены распределенными, полупроводниковый преобразователь – безынерционным звеном, и *отличающаяся* тем, что узел формирования фазных токов реализовывал пуско-тормозные режимы, что позволило уточнить осциллограмму тока при реализации интенсивных процессов пуска технологических объектов.

3. Разработана *математическая модель* электропривода на базе синхронной реактивной машины с независимым возбуждением с импульсно-векторной системой управления, обеспечивающая надежную работу электропривода, позволяющая выполнить расчёт различных режимов работы

электропривода, *отличающаяся* тем, что для коммутации фазных токов цепи нагрузки используется всего один *IGBT* транзистор.

**Практическое значение** работы заключается в следующем:

– предложенная математическая модель электропривода с импульсно-векторной системой управления СРМНВ с датчиком положения на валу двигателя, позволяющая решать задачи синтеза систем автоматического управления, анализа динамики систем управления, может быть положена в основу построения расчетной методики электроприводов, работающих с широким диапазоном регулирования скорости;

– методика синтеза силовой части и законов управления электропривода на базе СРМНВ для механизмов с пониженными скоростями вращения использована при разработке электроприводов промышленных механизмов и успешно применяется на производственных предприятиях, что подтверждается актами о внедрении.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

– и были приняты к внедрению в ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск) при разработке электроприводов компрессорных установок;

– в учебном процессе на кафедре электропривода ФГАО ВО “Южно-Уральский государственный университет”;

**Апробация работы.** В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедр:

– “Электропривод и автоматизация промышленных установок” ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”, г. Челябинск;

– “Электропривод и электрооборудование” ФГБОУ ВПО “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на следующих конференциях: XV научно-технической Международной конференции “Электроприводы переменного тока”, Екатеринбург, 2012 г; VII Международной конференции

по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012 г.; Международной конференции «Перспективные научные исследования», 2013г., София, Болгария; VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, из них –7 в периодических изданиях, **рекомендованных ВАК РФ**, 1 - входящая в систему цитирования **Scopus**, 4 доклада на конференциях, 2 патента РФ на изобретение.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач научного исследования, разработке методов решения задач научного исследования, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [1, 3, 6] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента; в работах [12–17] разработка математических моделей; в публикациях [2, 4, 5, 7–11] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 163 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 12 таблиц, список используемой литературы из 139 наименований.

**Соответствие научной специальности:** исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и пп. 1, 3 области исследования, приведённой в паспорте специальности 05.09.03 и – п. 3 (специальность 05.09.12).

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

## 1.1. Обзор технологических объектов, питающихся от полупроводниковых преобразователей

Развитие экономики в индустриальном мире приводит к увеличению объемов промышленного производства, неотъемлемой частью которого является энергетика. Важное место в ней занимают полупроводниковые преобразователи напряжений, используемые во всех сферах производства передачи распределения и потребления электроэнергии. Основная доля производимых полупроводниковых преобразователей предназначена для осуществления питания и управления электрическими приводами (70-80% от общего числа преобразователей). Широкое распространение также получили полупроводниковые преобразователи для питания различных электротехнологических установок: электрические печи и электронагревательные установки, электросварочные установки, установки для электрофизической и электрохимической обработки металлов и др. Отдельно можно выделить полупроводниковые преобразователи, которые используются в качестве корректирующих устройств. Классификация полупроводниковых преобразователей по сферам применения приведена на рис. 1.1.

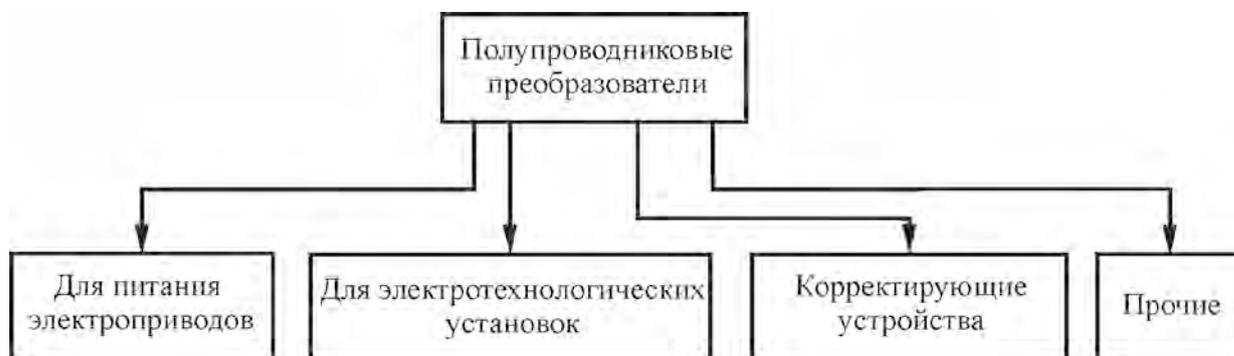


Рис. 1.1. Классификация полупроводниковых преобразователей

Среди компенсирующих преобразователей наиболее перспективным видом являются динамические компенсаторы искажения напряжений (ДКИН). Функциональная схема такого преобразователя приведена на рис. 1.2.

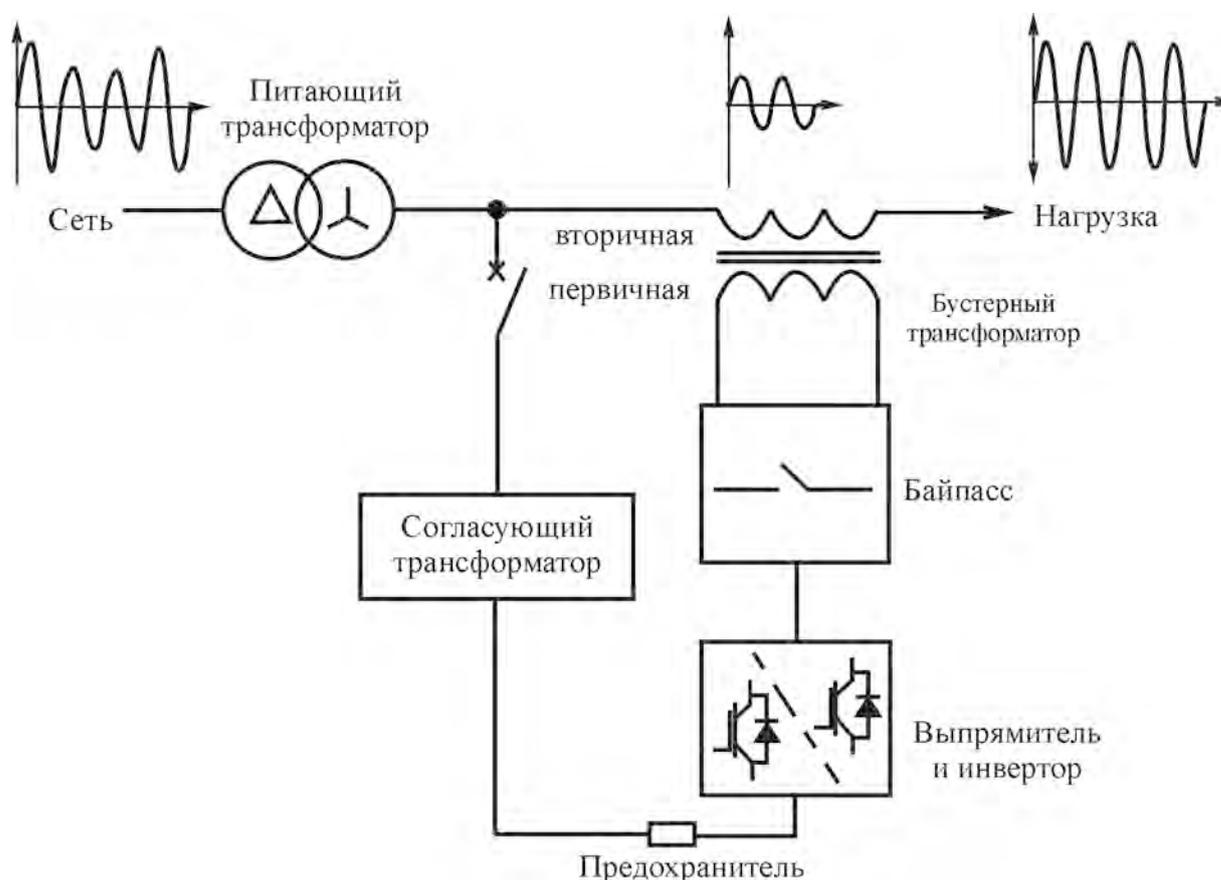


Рис. 1.2. Функциональная схема динамического компенсатора искажения напряжений

Динамические компенсаторы применяются для обеспечения надежного и непрерывного электроснабжения потребителей в случае провалов напряжений в электрических сетях. ДКИН представляет собой полупроводниковый преобразователь напряжения (инверторный блок состоит из *IGBT* модулей), который подключен к сети питания потребителя и через вольтодобавочный трансформатор перераспределяет мощности таким образом, чтобы добавка напряжения на вторичной обмотке трансформатора полностью компенсировала провал напряжения при внешнем КЗ или просадке напряжения.

Диапазон мощностей существующих на сегодняшний день полупроводниковых преобразователей близок к  $10^{12}$ : от единиц мкВт в приборных системах до десятков МВт для электроприводов насосов и компрессоров на перекачивающих станциях.

Полупроводниковые преобразователи широко применяются для питания электроприводов ответственных механизмов. Проблема надежности в таких установках стоит одной из первых. Стоит отметить, что с ростом удельных мощностей установок растет как их ответственность, так и величина последствий аварии при их отключении. На рис. 1.3. приведена гистограмма вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей .

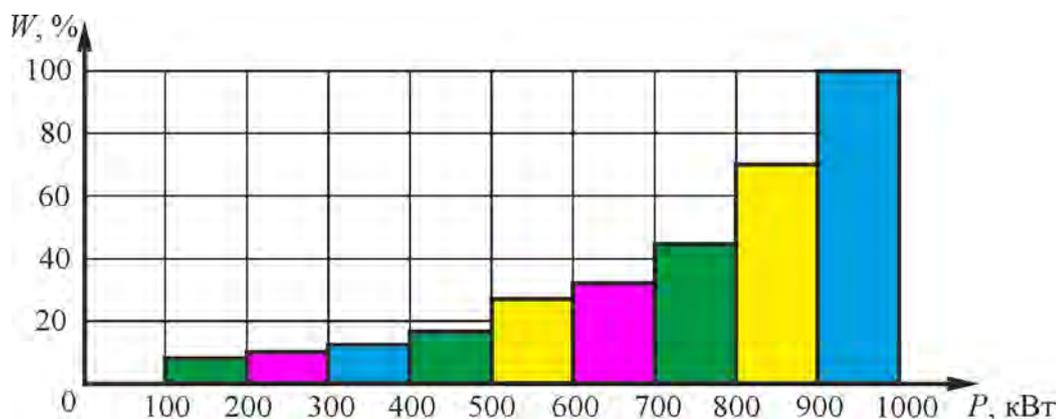


Рис. 1.3. Гистограммы вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей

Анализ статистики, предоставленной специалистами отдела сервиса ООО НТЦ "Приводная техника", показал, что подавляющее число отказов (более 85%) полупроводниковых преобразователей происходит по причине выхода из строя силового транзисторного модуля. Причины отказов могут быть различными: токи короткого замыкания, перенапряжения, нарушение теплового режима, ошибки при проектировании и эксплуатации и др. модуль выпрямления и звено постоянного тока вместе приходится не более 15% отказов полупроводниковых преобразователей (см. рис. 1.4).

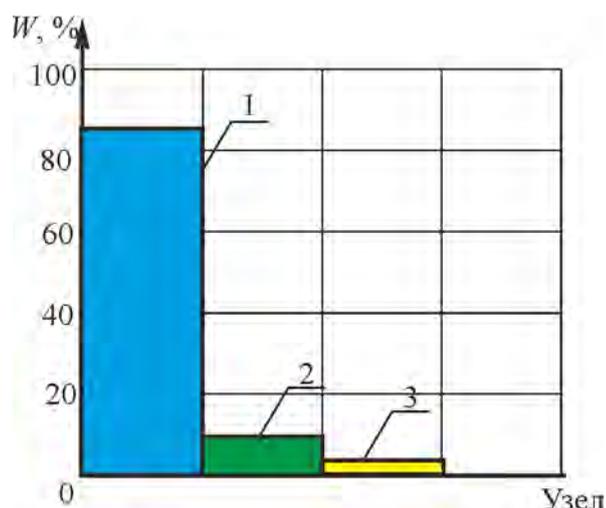


Рис. 1.4. Зависимость доли выходов из строя преобразователя напряжения по причине отказов узлов полупроводниковых преобразователей:  
 1 – силовой блок «транзистор – драйвер», 2 – узел выпрямления, 3 – блок

## 1.2. Особенности работы электропривода эксгаустера кислородного конвертора

В современной металлургии существенно возросла за последние десятилетия значимость кислородно-конверторного производства. Так по данным [64] количество выплавляемой стали в кислородных конверторах возросло с 431 до 811 млн. т. в год с 1996 по 2006 гг. что составило 65,5 % от суммарного мирового объема металла [57]. В частности, на Южном Урале конверторное производство широко представлено на крупных промышленных предприятиях: Челябинском металлургическом комбинате, Магнитогорском металлургическом комбинате.

Преимуществом кислородно-конверторного способа производства стали является высокая производительность процесса, простота устройства конвертора, отсутствие необходимости использования топлива для нагрева металла (вместо этого используется кислород), невысокие эксплуатационные расходы. Общий расход технического кислорода на получение 1 т. стали составляет 50 – 60 м<sup>3</sup>. Удельные капитальные затраты на выплавку одной тонны стали в конверторных цехах в 1,5 – 2 раза ниже чем в мартеновских, а

эксплуатационные расходы ниже на 28-45% [54].

Перед началом процесса плавки конвертор поворачивают в наклонное положение, загружают металлический лом и заливают жидкий чугун, имеющий температуру 1250 – 1400 °С. Затем конвертор ставят в вертикальное положение, загружают известняк, опускают водоохлаждаемую форму и подают кислород под давлением 1,0... 1,4 МПа. После окончания продувки конвертор снова наклоняют и производят слив годного металла. Продолжительность плавки в современном конверторе составляет 30 – 45 мин. Очередность и продолжительность операций приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Очередность и продолжительность операций плавки стали в кислородном конверторе

№ п/п	Операция	Продолжительность операции, мин.
1	Завалка лома и заливка чугуна	5-10
2	Продувка кислородом	12-17
3	Повалка, отбор проб, замер температуры	4-6
4	Слив металла и шлака	6-9
5	Осмотр футеровки, подготовка к следующей плавке	2-3
	Итого	29-45

На рис. 1.5 представлен внешний вид макета кислородного конвертора, механизма эксгаустера, системы электропривода эксгаустера, а также пылеулавливающей системы.

При конверторном способе производства стали происходит сильное пылеобразование, обусловленное обильным окислением и испарением железа. Это требует обязательного сооружения при конверторах сложных и дорогих пылеочистительных установок [17]. Таким образом, роль эксгаустеров и дымососов в конверторном производстве крайне высока.

Ниже приведены показатели работы кислородного конвертора, на которые оказывает влияние работа газоочистительной системы.

1) Производительность. При недостаточном отводе образованных при плавке газов примеси, содержащиеся в них, будут оседать на верхнем слое металла в конверторе, что приводит к увеличению доли шлака, а следовательно, уменьшению количества годного металла.

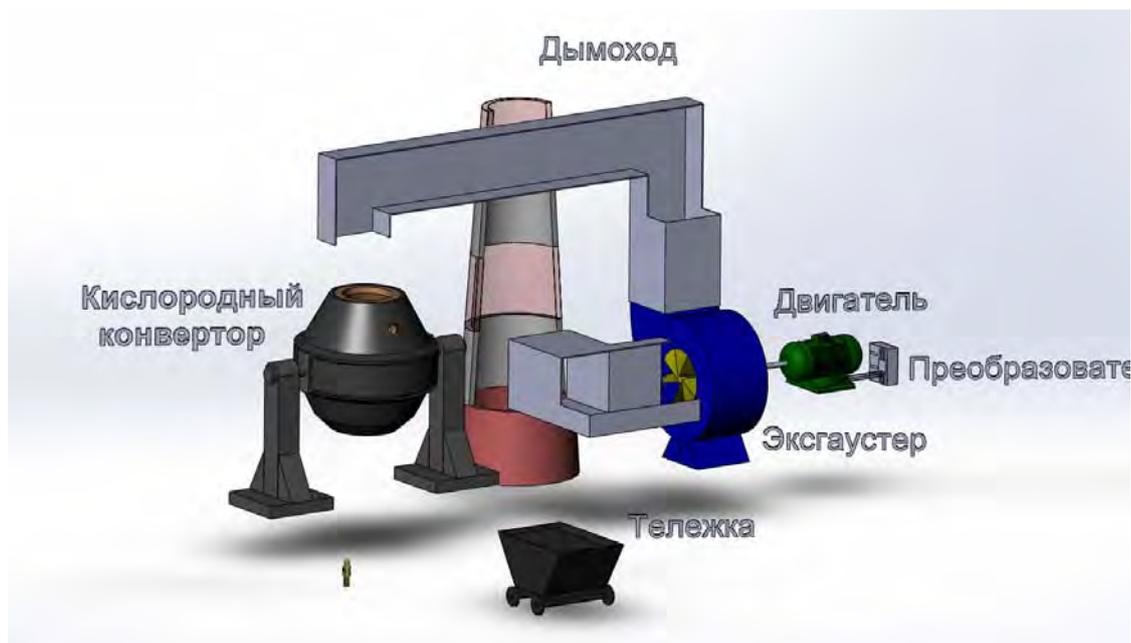


Рис. 1.5. Внешний вид макета кислородного конвертора, механизма эксгаустера, системы электропривода эксгаустера, а также пылеулавливающей системы.

2) Качество плавки. Продувка осуществляется до тех пор, пока содержание углерода и примесей в стали не будет соответствовать требуемым значениям. При недостаточном отводе образовавшихся газов пыль, содержащаяся в них, будет возвращаться в конвертор, тем самым ухудшая качество получаемой стали.

3) Энергосбережение. Температура конверторных газов достигает  $1500\text{—}1700^\circ$  [78]. Таким образом, они являются источником тепловой энергии, которую можно использовать в производственных нуждах.

4) Экология. Эксгаустеры засасывают продукты реакции окисления, которые содержат серу, фосфор, магний, и т.д. Все эти элементы,

взвешенные в воздухе, при высокой концентрации вредны для здоровья человека. Необходима фильтрация этих газов в газоочистительной системе, одним из основных элементов которой помимо фильтров является эксгаустер.

Основным показателем работы кислородного конвертора является себестоимость выработки 1 т. стали. Все усилия по модернизации таких установок направлены на снижение этого значения.

### **1.3. Обзор проблем в электроприводах эксгаустеров**

В настоящее время в мире насчитывается около 280 кислородно-конверторных цехов [64], которые производят порядка 70% от общего числа углеродистой, низколегированной и легированной стали в год. Примерно седьмая часть (35-40) таких цехов располагается на территории России. В каждом из цехов находится обычно 3 или 4 кислородных конвертора, каждый из которых в свою очередь оснащен промышленным дымососом – эксгаустером. Таким образом, в настоящий момент на территории нашей страны функционирует порядка 100 мощных эксгаустеров. Подавляющее большинство этих установок были созданы еще в советские годы, лишь незначительная часть из них была введена в эксплуатацию в XXI веке. Этот факт говорит о том, что на сегодняшний день достаточно большой группе механизмов требуется модернизация.

В большинстве своем на электроприводы эксгаустеров устанавливаются синхронные машины [39, 42, 34, 91]. Это обусловлено рядом факторов, важнейшим из которых является способность синхронных машин работать в режиме компенсации реактивной мощности. Поскольку эксгаустер должен работать на протяжении всей плавки, процесс возврата реактивной энергии в сеть происходит также длительный промежуток времени (остановки производят только в аварийных ситуациях и для проведения планово-предупредительных мероприятий), что заметно

сокращает расходы на электрическую энергию всего производства. По данным энергетиков Челябинский цинковый завод за 2015 г. потребил 800 млн. кВт·ч электрической энергии стоимостью около 1,4 млрд. руб. На Магнитогорском Metallургическом комбинате за аналогичный период времени было использовано 7622 млн. кВт·ч, и затрачена сумма 13 млрд. руб. Параметры синхронной машины, установленной на эксгаустере кислородного конвертора ЧМК, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Параметры электродвигателя ДСПУ-140/84-4-УХЛ4

№	Параметры электродвигателя	Величина
1	Тип синхронного двигателя	ДСПУ-140/84-4-УХЛ4
2	Номинальная мощность, кВт	2500
3	Синхронная скорость вращения, об/мин	1500
4	Номинальное напряжение статора, В	6000
5	Номинальный ток статора, А	280
6	Напряжение возбуждения, В	25
7	Ток возбуждения, А	400
8	Номинальный $\cos \varphi$	0,9

Долгое время электропривод эксгаустера оставался нерегулируемым. Такая ситуация объяснялась недостаточным развитием полупроводниковой техники для создания мощных и надежных преобразователей и возбуждителей для синхронных машин. На самом деле, если проанализировать работу кислородного конвертора, то можно заметить, что наибольшее образование газа в конверторе происходит во время продувки металла кислородом, что занимает почти половину времени процесса плавки [52,2]. Все остальные операции, а именно: завалка лома и заливка чугуна, повалка, отбор проб, замер температуры, слив металла и шлака происходят при меньшем количестве образованного вредного газа. В этой связи целесообразно

переводить электропривод механизма газоуловителя на пониженную скорость в указанные промежутки времени. Остановка электропривода эксгаустера во время вспомогательных операций экономически неэффективна, так как потери энергии при пуске очень велики (см. табл. 1.4). Полное отключение системы газоочистки невозможно также для предотвращения обратного выброса образовавшихся газов из коллектора в рабочее пространство цеха.

Произведем расчет потерь при различных видах пуска с различной нагрузкой.

Таблица 1.3

Исходные данные для расчета

№	Параметр	Значение
1	Номинальная мощность двигателя, кВт	315
2	Синхронная скорость, об/мин	1000
3	Номинальная скорость, об/мин	987
4	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	0,0074
5	Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	0,0153
6	Момент инерции двигателя, кг·м <sup>2</sup>	3,48
	Номинальный момент, Н·м	3047,9

Таблица 1.4.

Результаты расчета потерь в асинхронном двигателе при различных способах пуска с различными видами нагрузок

№	Режим	Величина потерь, Вт	Величина потерь, о.е
	<b>Прямой пуск</b>		
1	Холостой ход	27574	0,12
2	Номинальный момент	233601	1
3	Вентиляторный закон	101601	0,43

	изменения нагрузки		
	<b>Частотный пуск</b>		
1	Холостой ход	108	0,005
2	Номинальный момент	21074	0,11
3	Вентиляторный закон изменения нагрузки	15349	0,065

Результаты расчетов сведены в табл. 1.4.

Технологические требования, предъявляемые к электроприводам различных механизмов, сведены в табл. 1.5. В таблице выделены величины того или иного параметра для механизмов с вентиляторным типом нагрузки.

Таблица 1.5.

Технологические требования, предъявляемые к электроприводам различных механизмов

№	Точность поддержания момента	Характер момента	Быстродействие	Диапазон регулирования момента	Точность поддержания скорости	Наличие реверса	Быстродействие	Диапазон регулирования скорости
1	высокая	активный момент	высокое	большой	высокая	требуется	высокое	большой
2	средняя	реактивный момент	умеренное	ограниченный	средняя	не требуется	умеренное	ограниченный
3	не требуется		не требуется	не требуется	не требуется		не требуется	не требуется

Как можно видеть из табл. 1.5, все требования к параметрам электроприводов с вентиляторным типом нагрузки весьма невелики.

Известно, что основным требованием, предъявляемым к механизму промышленного дымососа, является надежность. Повышение надежности

работы газоочистительной системы будет способствовать увеличению количества годного металла, уменьшению брака и улучшению качества получаемой стали. Существуют технологические механизмы (экспаустеры кислородных конверторов, печей и т.д.), в которых остановка работы промышленного дымососа приводит к тяжелым последствиям, вплоть до остановки плавки и слива металла из котла конвертора.

По данным опроса специалистов ОАО ЧМК, отказы эксгаустера на кислородном конверторе случаются с частотой в среднем один раз в два месяца. Причиной остановок в настроенной системе электропривода служат отключение преобразователя частоты по максимально токовой защите, а также отказы в системе возбуждения синхронного двигателя. Ниже приведен расчёт экономических потерь от простоя оборудования кислородно-конверторных цехов. Стоимость углеродистой стали на официальном рынке составляет примерно 500 долларов за тонну (по данным на 2015 г.). Вместимость современных конверторов варьируется от 100 до 250 т., существуют также сверхкрупные кислородные конверторы вместимостью 300-350 т. Четыре сверхкрупных конвертора расположены на территории России (Череповецкий, Магнитогорский, Новолипецкий и Западносибирский металлургические комбинаты). Продолжительность плавки варьируется от 40 до 60 минут в зависимости от объема и качества выплавляемой стали. В среднем сутки простоя кислородного конвертора средней мощности порядка 200 т обойдётся в:  $200 \text{ (т)} \cdot 24 \text{ (плавки)} \cdot 500 \text{ (\$)} = 2,4 \text{ млн. долларов США}$  убытков от не выпущенной стали.

Помимо экономического вреда, остановка эксгаустера может нанести вред здоровью обслуживающего установку персонала, так как газы, образовавшиеся в процессе плавки, на 80-90% состоят из углекислого газа, содержат до 170 г/м пыли и имеют температуру 1500-1700° С.

В этой связи при модернизации данного типа электроприводов стоит учитывать два основных параметра системы: надежность и экономичность.

Обеспечить регулирование скорости в заданном диапазоне и увеличить надежность системы электропривода можно при помощи установки преобразователей частоты. Помимо регулирования скорости, с помощью преобразователей частоты можно обеспечить плавные пуски двигателей в работу, что положительно отразится на энергетике рабочих процессов. Однако, как уже было отмечено выше, необходимость частых пусков и остановов электроприводов эксгаустеров отсутствует. В работе таких механизмов преобладают установившиеся режимы работы. Таким образом, частотные преобразователи имеют избыточные регулировочные возможности, за которые приходится платить завышенной стоимостью. В настоящее время нет оценки выгоды от применения более простых схем в системах управления электроприводов таких механизмов без ухудшения качества работы. В этой связи актуальной является попытка создания системы управления, которая характеризуется, с одной стороны, низкой стоимостью, а с другой – удовлетворяет большому количеству предъявляемых требований.

#### **1.4. Существующие пути повышения надежности полупроводниковых преобразователей и электрических приводов**

В наибольшей степени требованиям надежности отвечают электроприводы с новыми, нетрадиционными типами конструкций электрических машин. Такие электроприводы характеризуется большим разнообразием схем и решений. Электротехнические комплексы на базе вентильно-индукторных электроприводов или реактивных машин получили широкое распространение в последние годы [10, 12, 28, 30, 48, 85, 100, 19,23]. Изученность вариантов таких схем электроприводов следует считать недостаточными для уверенного и успешного применения на практике, в частности в электроприводах металлургических механизмов, отличающихся тяжелыми условиями эксплуатации. Одним из примеров такой системы

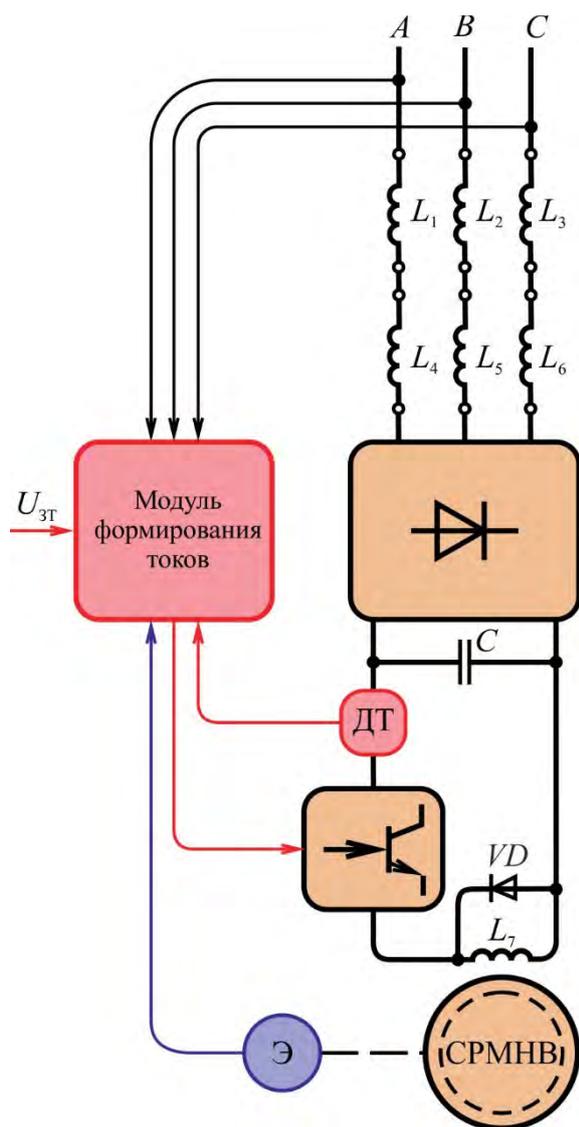


Рис. 1.6. Пример упрощенной схемы импульсно-векторного управления СРМНВ

может служить импульсно-векторная система управления (ИВСУ) синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [74]. Сама машина отличается простотой конструкции ротора и высокой технологичностью изготовления [100, 24, 56, 62, 65]. В исходном случае схема силовых цепей выполняется многофазной с индивидуальными источниками питания [66, 70, 71, 72,73]. Отказ от индивидуальных источников в пользу более простой схемы приводит к структуре с импульсно-векторным управлением [74] (см. рис. 1.6.). На рисунке  $L_1...L_6$  – фазные обмотки машины, силовая часть полупроводникового преобразователя представляет собой трехфазную мостовую схему, выполненную на

диодах, имеется всего один транзистор (независимо от фазности системы). Наличие в преобразователе всего одного IGBT транзистора приводит, в первую очередь, к повышенной надежности схемы (чем меньше количество элементов в схеме, тем она более надежна), а во вторую – к относительной дешевизне данной системы. Импульсно-векторная схема может обеспечить требуемый для механизма эксгаустера диапазон регулирования скорости 1:2 или 1:3. В настоящее время электропривод эксгаустера реализован на частотно-регулируемом синхронном электроприводе [34]. Существующее

решение, как уже было отмечено выше, имеет свои преимущества и недостатки. Вместе с тем, низкие показатели надежности частотно-токового управления синхронной машины открывают перед нами широкий простор для совершенствования электропривода эксгаустера.

Повышение надежности механизма электропривода предлагается произвести по двум направлениям: 1) изменение типа электромеханического преобразователя 2) упрощение схемы силового преобразователя. В табл. 1.6 сведены показатели надежности и экономичности существующих и предлагаемой системы электропривода эксгаустера. За базовые величины приняты существующие показатели электропривода эксгаустера.

Таблица 1.6.

Сравнение различных систем электроприводов промышленного эксгаустера по критериям экономичности и надежности

Показатель	Частотно-регулируемый синхронный электропривод	ПЧ-АД	ИВСУ-СРМНВ
Надежность двигателя	1	1,1	1,2
Надежность силовых преобразователей	1	1,2	1,4
Стоимость двигателя	1	0,9	0,85
Стоимость полупроводниковых преобразователей	1	0,95	0,7 -0,8

Коэффициенты в этой таблице будут подкреплены результатами расчетов и экспериментов, освещенных во второй главе.

Ввиду конструктивных особенностей асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (отсутствие контактных колец на роторе, упрощение изоляции обмоток ротора, технологичность изготовления двигателя), его надежность относительно синхронного двигателя той же мощности будет несколько выше.

Надежность электромеханического преобразователя ИВСУ-СРМНВ повышается за счет конструктивных особенностей самой машины. В первую очередь у СРМНВ отсутствует необходимость подведения электрической энергии к вращающимся частям машины, т.к. на роторе отсутствуют обмотки, вследствие чего отсутствует коллектор. Ротор машины может выполняться монолитным, что повышает его механическую прочность, уменьшает деформации ротора эксгаустера.

Повышение надежности системы управления в ИВСУ достигается упрощением преобразователя напряжения, подаваемого на статор машины (один управляемый ключ вместо шести), а также исключением целого устройства в силовой части электропривода – возбuditеля. Отказ от такого сложного элемента системы значительно увеличивает надежность системы порядка на 30% (статистика отказов по причине поломки или неисправности возбuditеля экспертов с ЧМК и специалистов ООО «Приводная техника»), позволяет снизить трудозатраты обслуживающего установку персонала, уменьшить эксплуатационные затраты.

При внедрении предлагаемого электропривода неизбежной становится проблема согласования напряжений. В преобразователе имеется *IGBT* транзистор на номинальный ток 1000 А и напряжение 600 В. Существующее энергоснабжение осуществляется по внутривозводской сети от собственной понизительной подстанции на 6 кВ. Таким образом, для питания нашей машины необходимо будет организовать пониженное напряжение 600 В. С другой стороны, снижение напряжения электроустановки приведет к снижению требований к квалификации эксплуатирующего и ремонтного

персонала, т.к. в установки с напряжением до 1000 В допускается электротехнический персонал с II и выше группой электробезопасности.

### 1.5. Постановка задачи исследований

На сегодняшний день в связи с развитием элементной базы в преобразовательной технике наблюдаются следующие тенденции:

- рост единичной мощности преобразователя;
- снижение стоимости полупроводниковых преобразователей;
- появление интегральных модулей «IGBT ключ – драйвер» в едином корпусе, что позволяет снизить габариты устройств, обеспечить эргономичность и удобство проектирования и эксплуатации преобразовательных устройств.

Однако, при всей положительной динамике, стоит отметить некую инерционность в промышленном производстве полупроводниковых преобразователей. Крупным компаниям-производителям силовой преобразовательной техники требуется значительное количество времени для разработки, производства и «обкатки» новых технических решений. Так, например, линейка преобразователей частоты компании *ABB ACS800* вышла на рынок в начале 2000-ых годов. Следующий продукт компании, в котором были исправлены все недостатки, усовершенствованы алгоритмы управления и установлены силовые ключи нового поколения, *ABB ACS880* появился лишь спустя десятилетие в начале 2010-ых годов. Идентичная ситуация в компании *Siemens* с ее последними линейками преобразователей *Simovert*, вышедших в начале XXI века, и современных преобразователях *Sinamics*, появившихся на рынке несколько лет назад.

В полной мере раскрыть все потенциальные возможности полупроводниковой техники могут менее крупные промышленные компании, имеющие меньшую инерционность производства, и обладающие способностью гибко подходить к ситуации на рынке. Челябинский НТЦ

«Приводная техника», являясь такой компанией, занимается разработкой и производством полупроводниковых преобразователей. Применение последних новинок в полупроводниковой технике и использование нетрадиционных схемных решений позволяет осуществлять прорывные разработки в области полупроводниковых преобразователей, таких, как трехуровневых преобразователь частоты «*Momentum*» и динамический компенсатор искажения напряжения на базе современных *IGBT* модулей.

Проанализировав требования технологического процесса к электроприводу промышленного дымососа, были сформулированы следующие задачи для достижения поставленной цели работы – повышение надежных показателей электропривода эксгаустера кислородно-конверторного производства:

- сравнение различных систем электроприводов по критериям экономичности и надежности;
- разработка математической модели электропривода с импульсно-векторной системой управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением;
- оценка адекватности математической модели;
- разработка методики синтеза силовой части и системы управления электропривода;

Сравнение существующих систем электроприводов должно производиться по наиболее важным для механизма эксгаустера показателям – надежности и экономичности. Для анализа необходимо использовать статистические данные наработок на отказ различных устройств, входящих в систему электропривода.

Разрабатываемая математическая модель должна наиболее полно описывать работу импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением, иметь простую структуру, содержать несколько блоков для возможности проверки

адекватности каждого из них. В составе модели наиболее подробно должны быть представлены электрический и электромеханический преобразователи, т.к. от работы именно этих устройств наиболее сильно зависит надежность всего комплекса.

Оценку адекватности модели необходимо производить при сравнении работы составляющих ее элементов и работы реальных устройств, входящих в состав системы электропривода.

Методика синтеза силовой части электропривода и системы управления должна отвечать требованиям простоты и при этом однозначно приводить к результату. При составлении методики необходимо учитывать новые возможности электроприводов, выполненных на базе нетрадиционных типов электрических машин. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения характеризуются простотой конструкции (вследствие чего достигаются повышенные надежность показатели), имеют большую перегрузочную способность, а также высокие регулировочные показатели, что может быть успешно использовано при синтезе системы электропривода.

## **1.6. Выводы по главе 1**

1. Анализ требований и условий ведения технологического процесса электропривода эксгаустера кислородного конвертора позволил определить наиболее узкие, с точки зрения надежности, места существующей системы электропривода, к которым следует отнести: наличие возбудителя синхронной машины в силовой части электропривода, большое количество управляемых полупроводниковых элементов в схемах силовых цепей преобразователей напряжения, наличие контактного двигателя в электроприводе, работающем в тяжелых условиях.

2. Обзор существующей научной и технической информации по надежности работы кислородно-конверторных агрегатов, и их

электроприводов [54, 78, 104,51] подтверждает мнение автора работы о том, что безаварийная работа эксгаустера кислородного конвертора исключает такие тяжелые последствия, как: остановки плавки и слива металла из котла конвертора, что в свою очередь приводит к многомиллионным убыткам, риск нанесения вреда жизни и здоровью персонала сталеплавильного цеха.

3. Предложенные автором в сотрудничестве с работниками кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных комплексов» Южно-Уральского Государственного Университета [74] способ и устройство импульсно-векторной системы регулирования скорости электропривода с СРМНВ, характеризуется рядом положительных качеств (бесконтактность и простота конструкции двигателя, малое число управляемых полупроводниковых элементов, относительная простота и дешевизна системы управления). Вместе с тем, в силу своей новизны требует более глубокого изучения в плане решения следующих вопросов: энергетика электропривода, величины предельных моментов и факторы, их ограничивающие, уровень пульсаций момента и тока, габаритные размеры двигателя и преобразователя, устойчивость замкнутой системы и выбор типа регуляторов.

## ГЛАВА 2. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 2.1. Анализ существующих методов повышения надежностных показателей

Надежность электрической системы – это свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих требуемым режимам и условиям использования.

Надежность является комплексным свойством, которое, в зависимости от назначения электрического привода и условий его эксплуатации, включает в себя такие свойства системы, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств. В современной литературе [21, 107,13] при описании надежности системы часто пользуются понятием вероятности безотказной работы  $P(t)$ – вероятности того, что в пределах заданного времени  $t$  наработки системы не возникнет ни одного отказа.

Для системы электропривода эксгаустера необходимо сочетание всех названных четырех свойств. Тогда под надежностью электропривода эксгаустера будем понимать функцию  $P(t)=B(t)+D(t)+Рем+C(t)$ , где  $B(t)$  – произведение вероятности безотказной работы всех элементов;  $D(t)$  – долговечность – параметр, заявляемый фирмой-производителем; Рем – ремонтпригодность – свойство, зависящее от унификации и сложности элементной базы устройства, а также квалификации и технической оснащенности персонала эксплуатирующего предприятия;  $C(t)$  – свойство машины сохранять исправное и работоспособное состояние в течение всего гарантийного срока службы после хранения и транспортирования.

Вероятность безотказной работы системы  $P_{\text{сис}}$  есть произведение

вероятностей безотказной работы всех элементов, входящих в систему  $P_i$ . Основными элементами системы электропривода, определяющими надежность всего комплекса, являются двигатель и преобразователь. Именно для них и имеет смысл считать вероятность безотказной работы.

Расчетный срок службы асинхронных двигателей - не менее 15 лет при наработке 40 тыс. часов или 4,5 года непрерывной работы (мощности асинхронных двигателей серии 4А от 0,37 кВт до 400кВт). Нарботка обмотки статора - не менее 20 тыс. часов, расчетная наработка подшипников - не менее 14 тыс. часов. Вероятность безотказной работы  $P_{Ад}$  электрического асинхронного двигателя промышленного исполнения - не менее 0,9 за 10 тыс. часов наработки. Другими словами, это означает, что с вероятностью 0,9 за время работы 10000 часов асинхронный двигатель ни разу не выйдет из строя [20]. Удовлетворительным значением показателя вероятности безотказной работы  $P_{П}$  для преобразователя является 0,9 в течение 10000 часов. [47].

Из классификации Правил Устройства Электроустановок [75] известно, что по степени надежности все электроустановки делятся на три категории: первая категория, из состава которой выделяют особую группу, вторая и третья категории электроприемников.

Воздуходувки, насосы, компрессоры, вентиляторы относятся, как правило, к первой категории надежности, а на ряде производств, (металлургических, химических) – к «особой» группе той же категории. Эксгаустеры кислородно-конверторного производства относят к категории особых электроприемников, так как их бесперебойная работа необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров.

Примером электрооборудования из «особой» группы по электробезопасности и, соответственно, надежности, может служить электропривод трубопроводной арматуры на атомных электростанциях. В

табл. 2.1 приведены количественные значения вероятности безотказной работы механизмов трубопроводной арматуры АЭС [101].

Таблица 2.1.

Количественные значения вероятности безотказной работы механизмов трубопроводной арматуры АЭС

№	Наименование	Вероятность безотказной работы за период до капитального ремонта, не менее
1	Арматура запорная систем нормальной эксплуатации, в том числе:	
2	электроприводная и с ЭМП	0,95
3	электроприводная с промежуточным редуктором	0,93
4	с ручным управлением	0,98
5	с ручным управлением с промежуточным редуктором	0,96
6	с ручным дистанционным управлением	0,96
7	с ручным дистанционным управлением с промежуточным редуктором	0,94
8	Арматура регулирующая:	
9	систем безопасности	0,96
10	систем нормальной эксплуатации, важных для безопасности	0,94
11	других систем нормальной эксплуатации	0,9
13	Арматура (кроме регулирующей) систем безопасности	0,995 на 25 циклов
14	Электроприводы и ЭМП арматуры систем безопасности	0,998 на 25 циклов
15	Электроприводы и ЭМП арматуры других систем	0,98

Можно подчеркнуть, что в современной промышленности надежность производства выходит на передний план и является одним из определяющих факторов работы электропривода наряду с производительностью и экономичностью.

### **2.1.1. Экономический подход обоснования надежностных показателей электропривода**

Устранение причин, снижающих надежность функционирования оборудования, производят на всех стадиях жизненного цикла его существования: проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации.

Эксплуатационная надежность оборудования зависит не только от базовой надежности, которая создается на первых трех стадиях, но и от уровня его эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Повышение надежности является не самоцелью, а средством достижения эффективности функционирования оборудования. Теоретически, возможно достижение уровня надежности, близкого к единице, однако затраты для обеспечения этого показателя могут свести на нет целесообразность его применения.

На рис. 2.1 приведены экспериментальные данные Жиркина Ю.В. [32], отражающие зависимость затрат на создание и эксплуатацию промышленного оборудования от уровня надежности. Экспоненциальная форма кривой зависимости затрат от вероятности безотказной работы обусловлена экспоненциальным (нормальным) законом распределения вероятности безотказной работы.

Проанализировав зависимости, можно сделать ряд выводов. Исходя из формы кривых общего уровня затрат, все промышленные электрические установки можно условно разбить на три категории. В I зоне находятся электроустановки неответственных производств, где экономически более выгодно сделать новое дешевое и малонадежное устройство, чем производить дорогостоящее надежное оборудование или обеспечивать модернизацию и ремонт старого. Во II зоне располагаются общепромышленные механизмы, надежность которых лежит в пределах от 0,5 до 0,8. Таких показателей надежности можно достичь относительно невысокими затратами на техническое обслуживание и ремонт, а также увеличенным количеством средств на создание объекта. Объекты в III зоне обладают повышенной надежностью и применяются на производствах, где существует угроза жизни и здоровью людей при отказе оборудования. К объектам третьей категории можно отнести металлургическое производство, в том числе механизм эксгаустера кислородного конвертора.

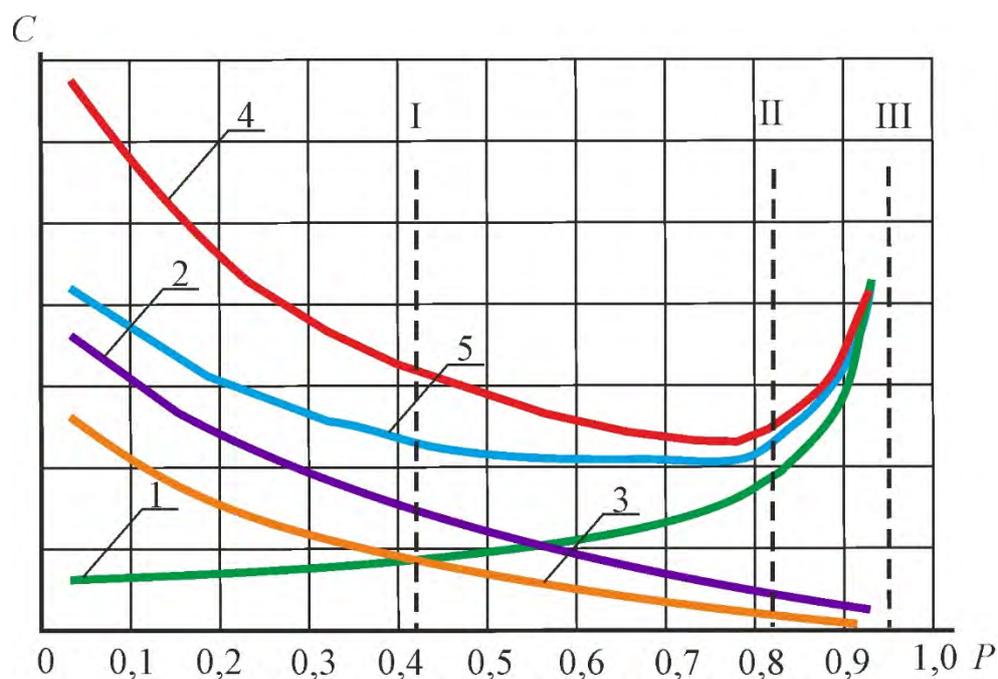


Рис. 2.1. Зависимость уровня затрат  $C$  на создание и эксплуатацию оборудования от надежности  $P$ ; 1 – затраты на создание, 2 – затраты на техническое обслуживание и ремонт, 3 – затраты на модернизацию, 4 – общие затраты с учетом модернизации, 5 – общие затраты без модернизации

Из анализа взаимосвязи уровня надежности и всех видов затрат видно, что с увеличением базовой надежности затраты на создание оборудования возрастают. Особенно значителен этот рост при величине надежности 0,8 и выше. Оптимальную эксплуатационную надежность, равную 0,8...0,9, следует считать средней заданной величиной надежности металлургического оборудования. Обычно этот уровень лежит в пределах 0,8...0,95. Для особо ответственных изделий гамма-процентный ресурс достигает 99,9 % (например, для пилотируемой космической техники).

Судя по кривой общих затрат, оптимальный уровень надежности без модернизации составляет всего 0,7-0,8, что не соответствует требованиям металлургического производства.

Характер кривых в зонах повышенной надежности 0,95...1 можно объяснить следующим образом. Устраняя негативное воздействие основного фактора, влияющего на надежность системы, большее влияние на

надежность начинают оказывать прочие, ранее малозначимые факторы, на снижение влияния которых также требуется затрачивать средства. Так, например, у электрических двигателей наибольшее число отказов (90%) происходит по причине выхода из строя обмоток машины. Если произвести комплекс мероприятий, сделать изоляцию обмоток из новейших материалов, улучшить отвод тепла от греющихся элементов, повысить качество вентиляции и охлаждения, то на передний план выйдут отказы по причине выхода из строя подшипников, хотя до модернизации доля отказов машин по этой причине составляла небольшую долю, лишь 5...8%. Если теперь основной упор мероприятий по увеличению надежности машины делать на совершенствование подшипников и добиться здесь хороших результатов, то неудовлетворительными (но уже на более высоком уровне) вновь окажутся показатели изоляции обмоток, что приведет к новому витку модернизации и кратному удорожанию объекта совершенствования.

Еще одним объяснением асимптотического вида кривых затрат при приближении к значению единичной надежности является то, что при таких высоких показателях надежности (0,99 и выше) очень велика роль эксплуатационных факторов, человеческого фактора, а также форс мажорных ситуаций.

Определение оптимальной долговечности оборудования основано на экономическом подходе [82,110]. На рис. 2.2 приведены зависимости себестоимости продукции от срока службы. Суммированием всех затрат получают общую зависимость себестоимости продукции от срока службы машины. Она имеет четко выраженный минимум  $C_{min}$ , который соответствует определенному сроку службы. Срок службы машины, при котором достигается наименьшая себестоимость единицы продукции, считают оптимальным сроком  $T_{opt}$  ее службы по физическому износу.

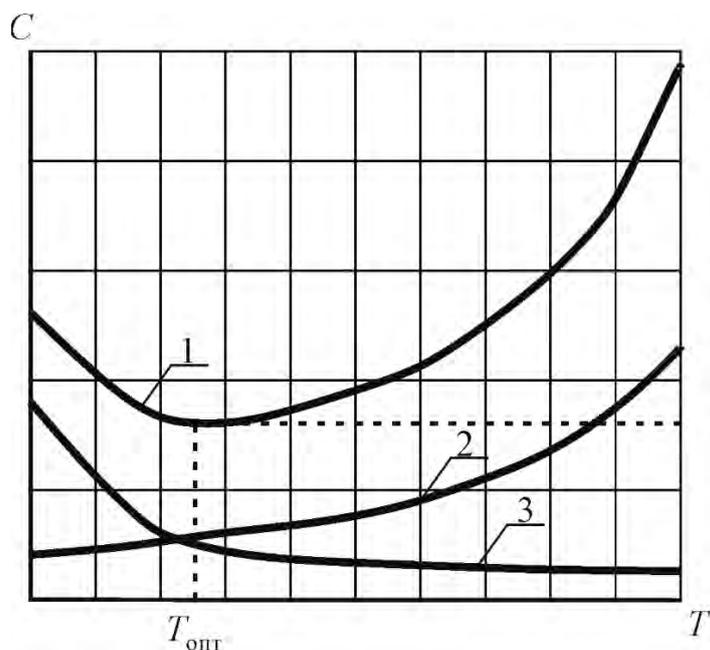


Рис. 2.2. Зависимость себестоимости продукции  $C$  от срока службы  $T$ ;  
 1 – сумма затрат; 2 – эксплуатационные расходы;  
 3 – амортизационные отчисления

Существуют такие устройства, которые некоторую часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не выполняют свои основные задачи. Для таких устройств наибольшая часть отказов связана с коррозией, вредным воздействием грязи, пыли, температуры и влаги. Для устройств, большую часть времени использующихся по назначению для выполнения

полезной работы, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов объекта значительно ниже, чем в рабочем состоянии. Так, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30 [32].

Подводя итог вышесказанному, следует сделать вывод о необходимости соблюдения баланса между показателями надежности электропривода и капитальными затратами на его создание и эксплуатацию, исходя требований, предъявляемых к конкретному механизму в конкретных условиях.

### **2.1.2. Анализ существующих методов увеличения времени безотказной работы электроприводов**

При рассмотрении надежности электропривода большее внимание стоит уделить надежности двух основных элементов системы, а именно – электрического преобразователя и электромеханического преобразователя. Статистика отказов [79, 22, 111,93] говорит о том, что именно по причине выхода из строя этих элементов происходят отказы систем электропривода на производстве.

Производители часто скрывают реальные показатели надежности своего продукта. Чуть ли не единственным параметром, который можно встретить в паспорте или шильдике электрического устройства, является гарантированный срок службы. Лучший способ оценить показатели надежности объекта – это экспертный (или экспериментальный) способ.

Согласно [21], средний срок службы наиболее распространенных на производстве асинхронных двигателей общепромышленной серии составляет 15 лет при наработке 40000 часов непрерывной работы. При этом наработка активных частей обмотки статора – не менее 20000 часов, наработка подшипников – не менее 10000 часов. Таким образом, вероятность безотказной работы асинхронного двигателя серии 4А средней мощности составляет 0,9 при 10000 ч наработки. По экспертным оценкам, в 95% случаев отказы происходят из-за повреждения фазных обмоток машин, и порядка 5% электродвигателей отказывают из-за повреждения подшипников [18]. Около 35% отказов происходит из-за низкого качества изготовления двигателей. Порядка 50% отказов происходит по причине нарушений условий эксплуатации, например, неудовлетворительной тепловой защиты. Остальные 15% отказов приходится на несоответствие конструктивного исполнения электродвигателей условиям эксплуатации.

Как уже было отмечено выше, наиболее «слабым местом» с позиции

безотказной работы электрической машины являются обмотки. С точки зрения надежности изоляцию обмоток асинхронных двигателей можно рассматривать как систему, состоящую из последовательно соединенных звеньев. Такими звеньями являются изоляция пары соседних проводников, пазовая изоляция, межфазовая изоляция в лобовой части, а при двуслойной обмотке появляется необходимость учитывать надежность изоляции между секциями. Поскольку отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, то надежность (вероятность безотказной работы) обмотки может быть определена согласно теореме умножения вероятностей [18,14] по формуле:

$$P_{об}(t) = \prod_{i=1}^n P_{пары\ p\ и}(t) \cdot \prod_{i=1}^n P_{паз\ и}(t) \cdot \prod_{i=1}^n P_{мфи}(t) \cdot \prod_{i=1}^n P_{мсекци}(t)$$

Необходимо отметить, что в приведенной формуле не все сомножители равноценны. Наименьшее значение имеет первый сомножитель (надежность межвитковой изоляции пары проводников), который в основном и определяет надежность обмотки. Это объясняется двумя факторами: относительно низкой надежностью межвитковой изоляции, т.к. на малых и средних мощностях проводники имеют относительно маленькие размеры,  $0,1 \dots 1 \text{ мм}^2$  в сечении, что делает задачу создания надежной изоляции таких проводников сложной, а вследствие этого дорогостоящей задачей; и значительным числом проводников в одной ветви в асинхронном двигателе. Статистика отказов электрических машин по причине выхода из строя какого-либо типа изоляции следующая: межвитковые замыкания – 93%, пробой пазовой изоляции – 2%, пробой межфазной изоляции 5%. Низкий процент отказов пазовой и фазной изоляции объясняется технологичностью их изготовления. Таким образом, можно сделать вывод о том, что, увеличение или уменьшение количества фаз в машине, а вследствие этого

изменение площади фазной изоляции не приведет к серьезному изменению надежности изоляции обмоток машины.

Помимо вероятности безотказной работы, для описания надежности применяют также показатель наработки на отказ. Нарботка – это продолжительность или объем работы объекта, измеряемый в часах, мото-часах, гектарах, километрах пробега, циклов включений и др. Измеряется статистически, путём испытания множества приборов или вычисляется методами теории надёжности:

$$T = 1/m * \sum t_i$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -го объекта между отказами;  $m$  – число отказов.

В табл. 2.2 приведены значения наработки на отказ преобразователей напряжения различных производителей, указанные самими производителями в каталогах [121].

Таблица 2.2.

Значения наработки на отказ преобразователей напряжения различных производителей

№	Производитель	Заявленное значение наработки на отказ, ч.
1	<i>Siemens</i>	400000
2	<i>ERMAN</i>	280000
3	<i>ESD-TCL</i>	50000
4	Триол	15000

Замечено, что на долю ошибок проектирования систем электроприводов приходится до 40...50% всех отказов преобразователей. Отказы из-за ошибок (дефектов) производства возникают в 20...30% случаев. На долю ошибок оператора приходится примерно 25...35% всех отказов.

Надежностные свойства микропроцессорных систем, используемых в преобразователях напряжения, не зависят от мощности и фазности преобразователя, поэтому в дальнейших расчетах примем их за константу и

этими составляющими преобразователя при расчете его надежности будем пренебрегать.

Основными элементами силовой части полупроводниковых преобразователей частоты являются: выпрямитель, который чаще всего выполнен на неуправляемых полупроводниковых элементах – диодах, инвертор, выполненный на *IGBT*-транзисторах и звено постоянного тока – конденсатор. При составлении картины надежности преобразователя необходимо иметь представление, какова доля отказов, произошедших из-за неисправностей того или иного элемента.

Как у диодов, так и у транзисторов отказы могут быть вызваны короткими замыканиями (теплоэлектрической пробой), обрывами и изменениями параметров. Статистика отказов приведена в [113]. Например, для диода 2Д522 минимальная наработка составляет 80000 часов, а в облегченном режиме – около 100000 часов.

Интенсивность отказов транзистора составляет примерно  $\lambda_T = 1 * 10^{-7} \text{ч}^{-1}$  или порядка 50000 часов безотказной работы при  $P=0,95$  [120]. Этот показатель может сильно варьироваться в зависимости от номинального рабочего тока, технологии изготовления и производителя.

Интенсивность отказов для транзисторов рассчитывают по зависимости:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{бсг}} \cdot K_{\text{р}} \cdot K_{\text{дн}} \cdot K_{\text{ф}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{э}} \cdot K_{\text{к}},$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  – значения эксплуатационной интенсивности отказов;  $\lambda_{\text{бсг}}$  – значения базовой среднегрупповой интенсивности отказов;  $K_{\text{р}}$  – коэффициент режима,  $K_{\text{дн}}$  – коэффициент динамической нагрузки;  $K_{\text{ф}}$  – коэффициент функциональности;  $K_{\text{н}}$  – коэффициент нагрузки;  $K_{\text{э}}$  – коэффициент жесткости условий эксплуатации;  $K_{\text{к}}$  – коэффициент качества изготовления, значения коэффициентов берутся из соответствующих таблиц и справочных материалов [112].

Вероятность отказа двух последовательно соединенных транзисторов равна  $P_2 = P_1 \cdot P_1 = 0,95 \cdot 0,95 = 0,9025$ . С увеличением количества последовательно соединенных транзисторов вероятность их безотказной работы падает по экспоненциальной зависимости.

На рис. 2.3 приведены зависимости количества термоциклов транзистора от рабочей температуры. На рис. 2.4 приведена зависимость наработки на отказ микросхемы от температуры кристалла.

Чаще всего в преобразователях частоты применяются электролитические конденсаторы. С прогрессом современных технологий показатели долговечности всех элементов, применяемых в электронике и электротехнике, возрастает. Так, например, срок службы ниобиевых конденсаторов составляет порядка 250000 часов [114]. Возможными причинами выхода из строя конденсаторов являются чаще всего высыхание, перегрев, нарушение герметичности. Чем больше емкость конденсатора, тем больше его объем, т.е. больше площадь корпуса, соответственно, возрастает вероятность нарушения герметичности, с другой стороны, повышается теплоотдача.

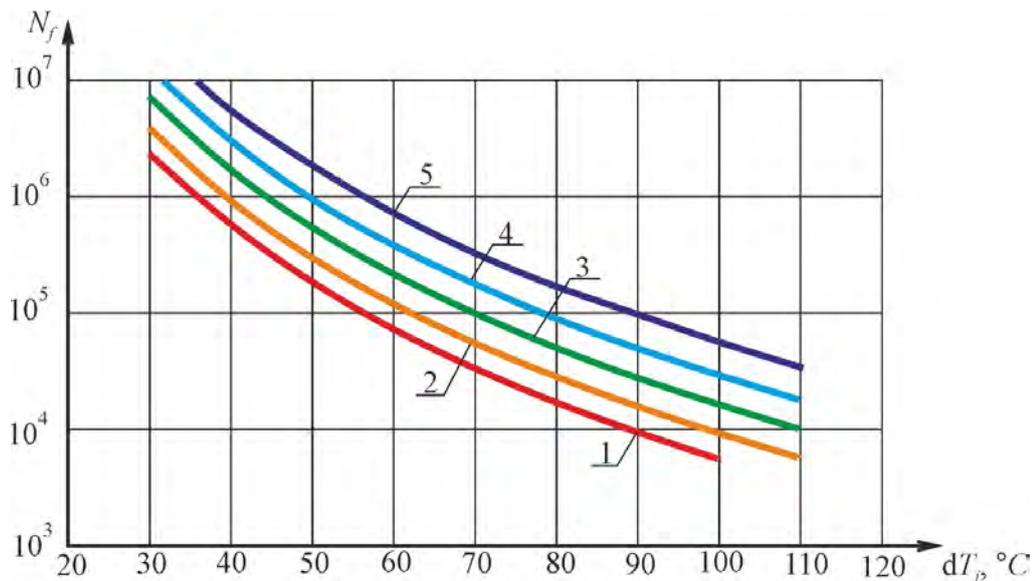


Рис. 2.3. Зависимость количества термоциклов  $N_f$  от средней температуры  $T_T$  и градиента  $dT$ ; 1 –  $T_T = 100^\circ C$ , 2 –  $T_T = 90^\circ C$ , 3 –  $T_T = 80^\circ C$ , 4 –  $T_T = 70^\circ C$ , 5 –  $T_T = 60^\circ C$

По наблюдениям специалистов ООО НТЦ «Приводная Техника», долгое время эксплуатирующихся частотные преобразователи, применяемые на сегодняшний день, в электроприводах электролитические конденсаторы могут служить 10 и более лет. Основываясь на многолетнем опыте, можно сказать, что надежность конденсаторов, используемых в современных электроприводах, значительно превышает надежность транзисторов. Следовательно, при расчете надежностных показателей преобразователя, вероятность безотказной работы конденсаторов мы учитывать не будем.

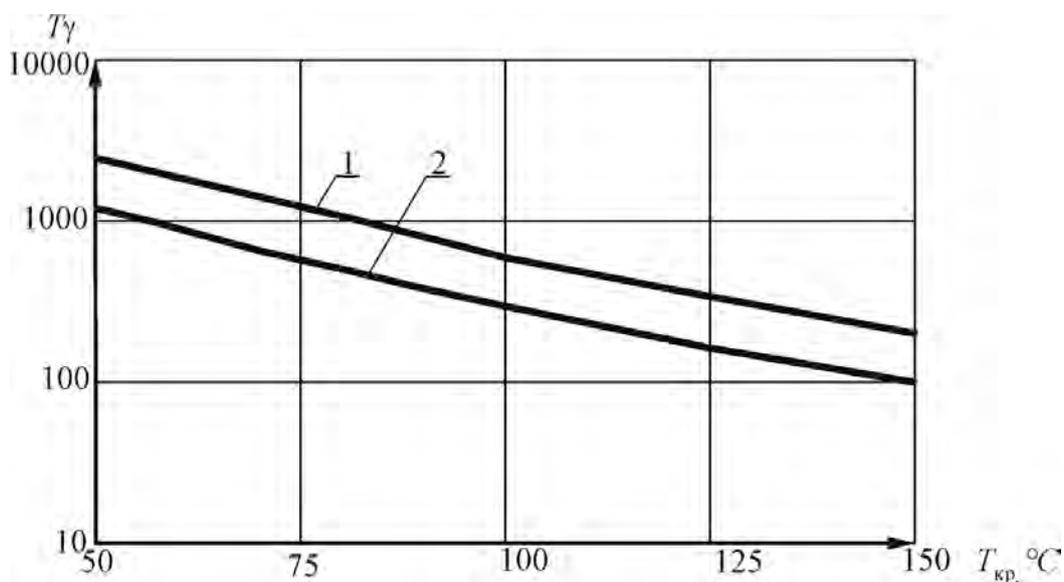


Рис. 2.4. Зависимость гамма-процентной наработки до отказа  $T_\gamma$  микросхемы от температуры кристалла  $T_{кр}$ ; 1 –  $\gamma=97,5\%$ , 2 –  $\gamma=99\%$

Таким образом, наиболее «узким местом» с позиции надежности в преобразователе будем считать силовые транзисторы. По этой причине все предпринимаемые усилия по повышению надежности преобразователей будут направлены на повышение надежности применяемых полупроводниковых элементов либо на сокращение их количества в силовой схеме.

Существует два основных метода повышения надежности любой системы [5, 41, 32,18]: а) введение внутренней избыточности системы; б) переход к принципиально новым элементам системы, обладающим повышенными надежностными показателями.

Первый путь снижения потока отказов является наиболее простым: необходимо выбирать элементы, рассчитанные на работу с большей нагрузкой и использовать их в системе, нагруженной меньшими усилиями. Очевидно, что для увеличения срока безотказной работы двигателя необходимо выбирать его с запасом по мощности. Еще один вариант повышения надежности электрической машины – это увеличение количества фаз двигателя, что приведет к снижению среднего тока, приходящегося на каждую фазу, что, в свою очередь, снизит нагрузку на изоляцию, а это, как уже было отмечено выше, благоприятно отразится на продолжительности эксплуатации двигателя.

Второй и наиболее перспективный путь повышения надежности системы электропривода – применение новых, нетрадиционных технических решений как для силовых цепей, так и для самой машины.

В данном параграфе выделены «слабые места» электроприводов с позиций надежной работы, и показаны пути устранения недостатков в этих местах двумя способами, подробнее о которых речь пойдет ниже.

### **2.1.3. Метод введения избыточности системы**

Существует несколько методов расчета надежности системы [5, 41, 32,18]. Наряду с экспериментальным методом, одним из самых точных является коэффициентный метод [83]. Этот метод расчета надежности прост в использовании и не требует знания значений интенсивности отказов элементов, входящих в систему. Необходимо иметь сведения о коэффициентах надежности элементов и знать абсолютное значение интенсивности отказов лишь одного базового.

Интенсивность отказов численно равна числу отказов в единицу времени, отнесенному к числу узлов, безотказно проработавших до этого времени:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{\text{ср}}\Delta t} = \frac{n(t)}{[N-n(t)]\Delta t} = \frac{f(t)}{P(t)},$$

где  $N$  – общее число рассматриваемых изделий;  $f(t)$  – скорость отказов – количество изделий, отказавших к моменту времени  $t$  в единицу времени;  $P(t)$  – количество изделий, не отказавших к моменту времени  $t$ ;  $n(t)$  – число отказавших образцов в интервале времени  $t - (\Delta t/2) < t < t + (\Delta t/2)$ ;  $\Delta t$  – интервал времени;  $N_{\text{ср}}$  – среднее число исправно работающих образцов в интервале  $\Delta t$ . Интенсивность отказов обратна пропорциональна времени и измеряется числом отказов в час.

Учет влияния режимов работы и условий окружающей среды на показатели надежности элементов может быть произведен с помощью поправочных коэффициентов, изменяющих значение параметра  $\lambda$  – интенсивности отказов. Эти безразмерные коэффициенты  $a_i$  являются функциями совокупности различных воздействующих факторов. Интенсивность отказов элемента с учетом условий работы и окружающей среды

$$\lambda_i = \lambda_{\text{н}} \prod_{i=1}^n a_i$$

Надежность системы принято оценивать по показателю  $P$  – вероятности безотказной работы за промежуток времени  $t$ :

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

При отсутствии данных о надежности отдельных элементов электрической машины используют обобщенные среднестатистические данные о надежности электрических машин в целом. Существенное влияние на надежность машины оказывает величина электрической нагрузки. Для понимания того, во сколько раз недогружена или перегружена машина, вводится коэффициент нагрузки, который определяется отношением рабочей

мощности к номинальной мощности машины:

$$K_H = \frac{P_{\text{раб}}}{P_H}$$

#### **2.1.4. Применение метода введения избыточности для преобразователей напряжения**

Наименее надежным элементом силовой части полупроводникового преобразователя принято считать силовые транзисторы. Для оценки анализа надежностных показателей преобразователей частоты были проведены экспериментальные и статистические исследования силовых транзисторов.

В первую очередь, используя коэффициентный метод расчета [83], были получены значения поправочных коэффициентов  $a_{\text{транз}}$  для определения вероятности безотказной работы транзисторов в зависимости от коэффициента нагрузки  $K_H$  для при температурах транзистора 20<sup>0</sup>С и 50<sup>0</sup>С (см. рис. 2.5).

Для транзисторов коэффициент электрической нагрузки определяется отношением фактической суммарной мощности, рассеиваемой на переходах в непрерывном или импульсном режиме, к допустимой мощности рассеивания.

$$K_H = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{доп}}}$$

Для построения данной зависимости (рис. 2.5) использовался каталог компании *ABB* – известного производителя полупроводниковых преобразователей.

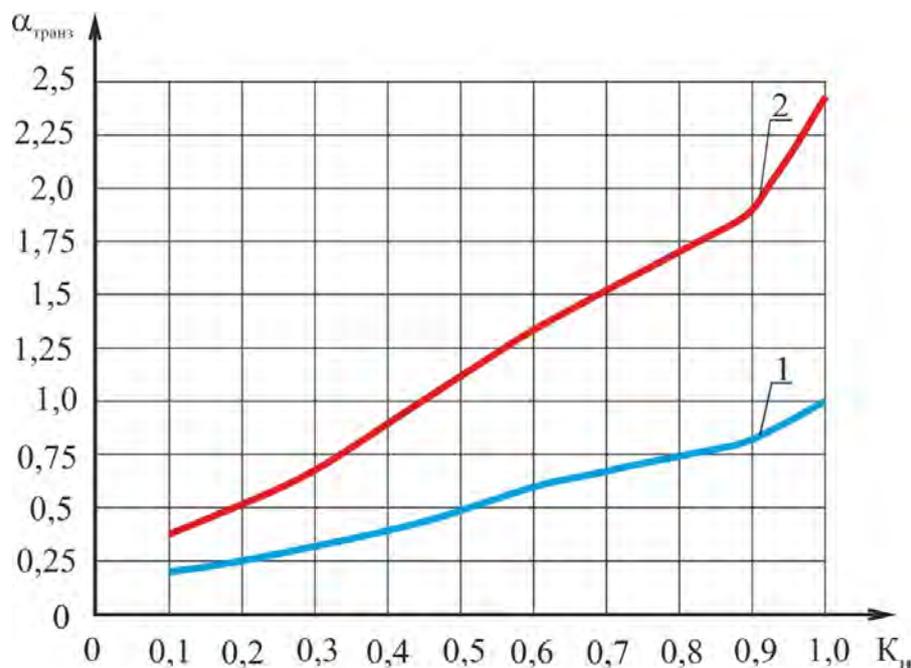


Рис. 2.5. Зависимость поправочного коэффициента  $\alpha_{\text{транз}}$  от коэффициента нагрузки транзистора  $K_n$  при различных температурах транзистора: 1 –  $T_{\text{транз}} = 20^\circ\text{C}$ , 2 –  $T_{\text{транз}} = 50^\circ\text{C}$

При создании надежного преобразователя частоты или напряжения необходимо учитывать режимы работы готового преобразователя, и с учетом этого подбирать элементную базу. Нами были выполнены вычисления и произведен анализ полученных зависимостей величины безотказной работы транзистора, рассчитанного на номинальный ток 15 А от запаса по рассеиваемой мощности при различных температурах. Результаты расчетов приведены на рис. 2.6.

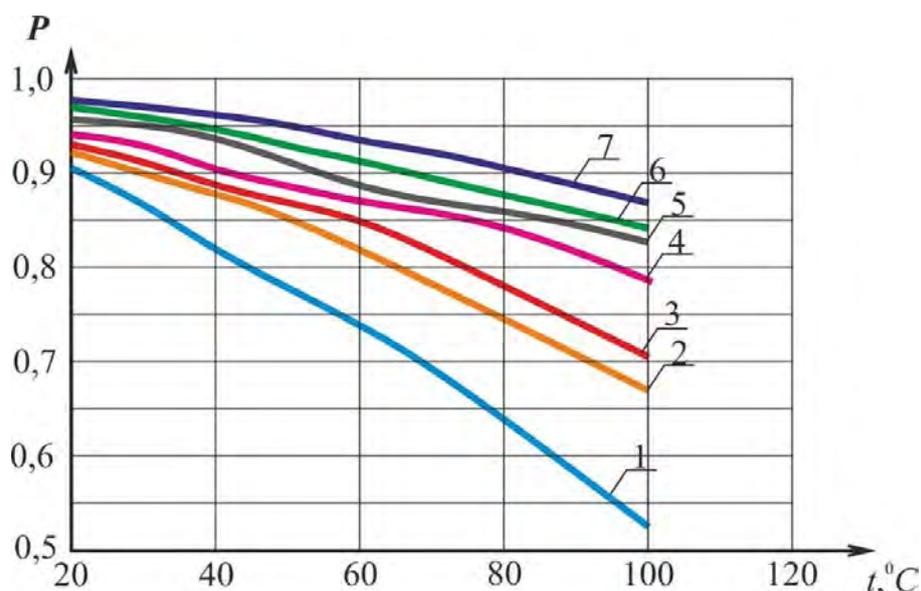


Рис. 2.6. Зависимость безотказной работы  $P$  транзистора при наработке 10000 часов, от запаса по рассеиваемой мощности  $P$  и температуры окружающей среды  $t$ :

$$1 - P_{\text{факт}} = P_{\text{н}}, \quad 2 - P_{\text{факт}} = 1,35 \cdot P_{\text{н}}, \quad 3 - P_{\text{факт}} = 1,6 \cdot P_{\text{н}}, \\ 4 - P_{\text{факт}} = 2,3 \cdot P_{\text{н}}, \quad 5 - P_{\text{факт}} = 2,7 \cdot P_{\text{н}}, \quad 6 - P_{\text{факт}} = 3,3 \cdot P_{\text{н}}, \quad 7 - P_{\text{факт}} = 4,1 \cdot P_{\text{н}}$$

При увеличении температуры транзистора на  $80^\circ\text{C}$  вероятность безотказной работы снижается до 0,5, что фактически означает равную вероятность рабочего и нерабочего состояний на протяжении отведенного на работу транзистора времени. При двукратном запасе транзистора по мощности на рабочих температурах 80-100 градусов наблюдаются относительно приемлемые показатели надежности 0,8-0,85 (см. рис. 2.6). Дальнейшее увеличение запаса мощности приводит к кратному удорожанию самого преобразователя, однако транзисторы становятся менее восприимчивыми к превышению температуры, так как рассчитаны они уже на большие токи.

### Экономический эффект.

На данном этапе исследования выявлялась доля стоимости автономного инвертора от стоимости всего преобразователя. Информация об относительной стоимости силовой части преобразователей была получена от специалистов научно-технического центра «Приводная техника». Исходными данными для статистической обработки являлась выборка значений стоимости преобразователей с шестью *IGBT*-транзисторами в

автономном инверторе и производилась у следующих фирм-производителей преобразователей частоты: *Toshiba, Instart, Combarco, ABB, DeltaElectronics, GeneralElectric*[117]. Исследования производились для различных моделей преобразователей в диапазоне мощностей от 1,1 до 160 кВт. С помощью методики, приведенной выше, были обработаны величины  $\Delta C_T$  – относительной стоимости силовой части преобразователей. Диапазон мощностей был представлен двадцатью четырьмя величинами. Количество степеней свободы при такой выборке равно 23. С вероятностью в 95% регрессионная зависимость относительной стоимости силовой части  $q_2$  является адекватной и достоверной, так как полученный квантиль Стьюдента  $t=1,88$  меньше критического  $t_{\text{КРИТ}}$ . Результаты статистической обработки относительной стоимости силовой части преобразователей частоты приведены в табл. 2.3.

Для того чтобы прийти к общему представлению о средней стоимости силовой части преобразователей, приведем обобщенную регрессионную зависимость (рис. 2.7).

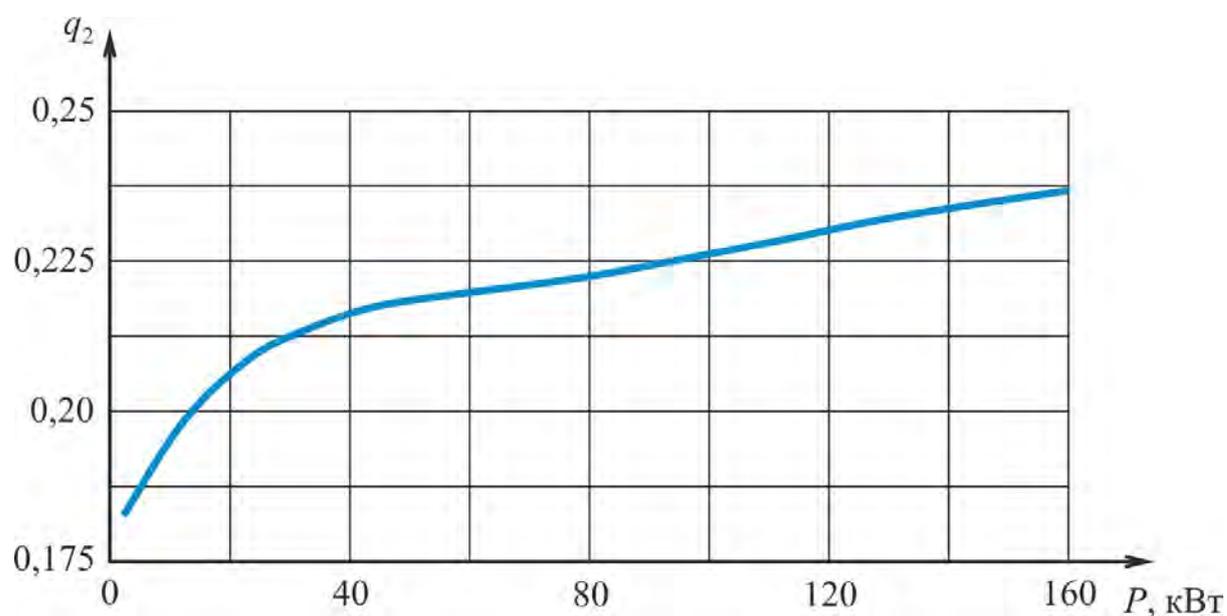


Рис. 2.7. Регрессионная зависимость относительной стоимости силового полупроводникового моста с драйверами  $q_2$  от номинальной мощности преобразователя  $P$

Таким образом, можно сделать вывод, что с ростом мощности преобразователя доля стоимости силового *IGBT* моста увеличивается.

Надежность преобразователя зависит от схемы силовых цепей, количества фаз и мощности.

Для анализа надежности преобразователя была создана модель *n*-фазного выпрямителя, нагруженного на активно-индуктивное сопротивление. Математическая модель была собрана в программном продукте *MATLAB*. Функциональная схема выпрямителя показана на рис. 2.8.

На модели производились следующие эксперименты. Последовательно увеличивали количество фаз у преобразователя. Контролировалось значение среднеквадратичного тока фазы преобразователя. Как можем видеть из графика на рис. 2.9, зависимость среднеквадратичного тока имеет линейный характер.

Таблица 2.3.

Результаты статистической обработки относительной стоимости силовой части преобразователей частоты

Параметр	$P_{\text{н}}$ , кВт	$\Delta C_{\text{T}}$	$q_2$	$d$	$d^2 \cdot 10^3$
Номер эксперимента					
1	1,1	0,185	0,182	0,0025	0,00611
2	1,5	0,185	0,185	0,0004	0,00019
3	2,2	0,185	0,188	0,0037	0,01359
4	3	0,188	0,191	0,0037	0,01338
...					
24	160	0,236	0,236	0,0001	0,00001
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,002				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,88				
$t_{\text{КРИТ}}$	2,0687				

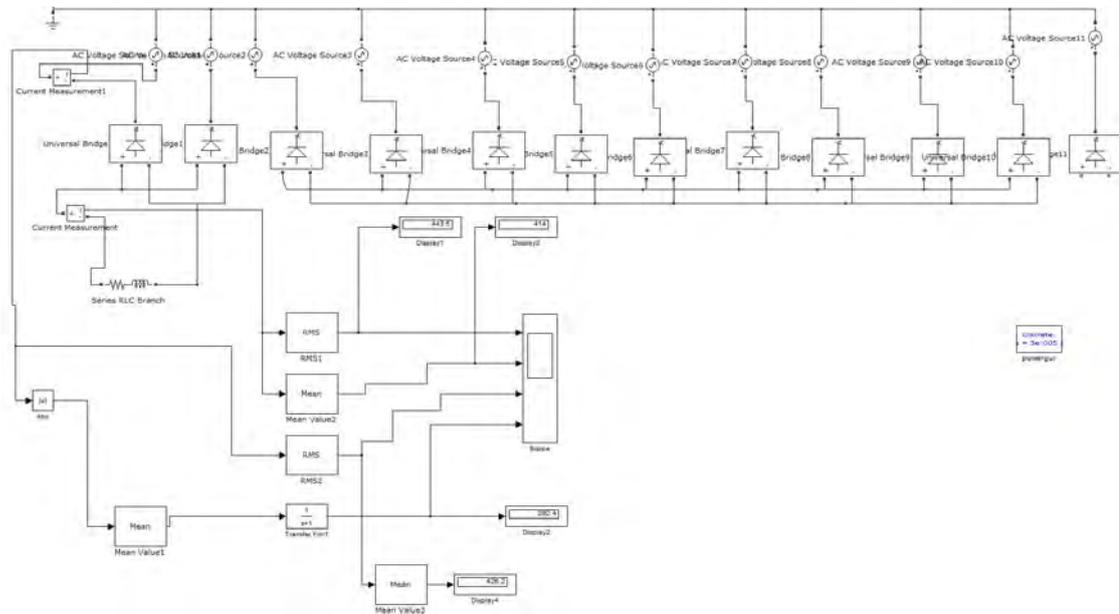


Рис. 2.8. Функциональная схема выпрямителя в программном продукте *MATLABSimulink*.

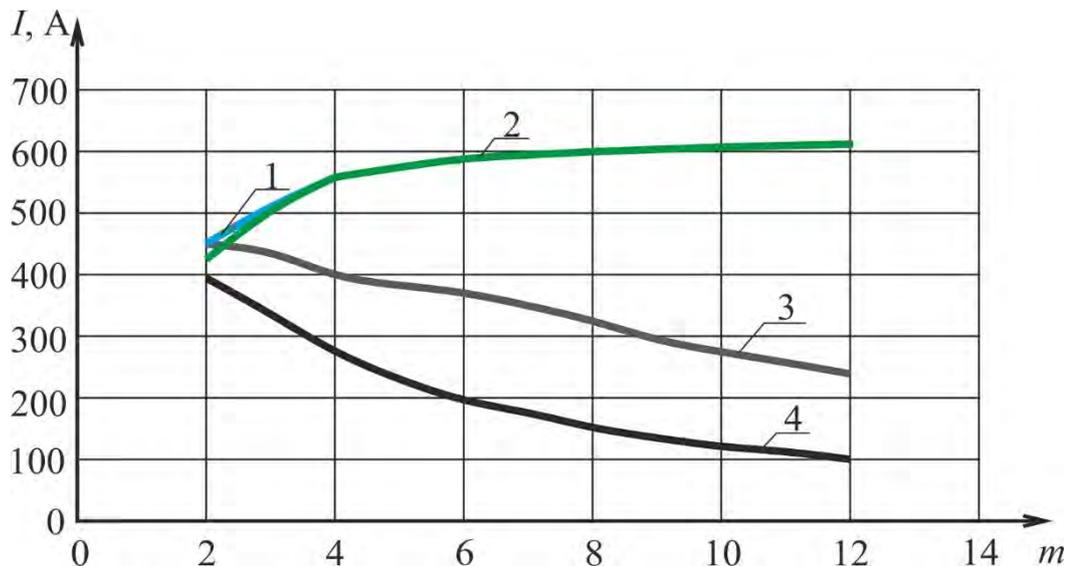


Рис. 2.9. Зависимости среднеквадратичного тока нагрузки  $I_{ср.кв.нагр}$ , среднего тока нагрузки  $I_{ср.нагр}$ , среднеквадратичного тока фазы  $I_{ср.кв.ф}$  и среднего тока фазы выпрямителя  $I_{ср.ф}$  от числа фаз  $m$ ;  
 1 –  $I_{ср.кв.нагр}$ , 2 –  $I_{ср.нагр}$ , 3 –  $I_{ср.кв.ф}$ , 4 –  $I_{ср.ф}$

Вторая серия экспериментов производилась на той же модели, но при поддержании постоянной мощности источника питания. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.10.

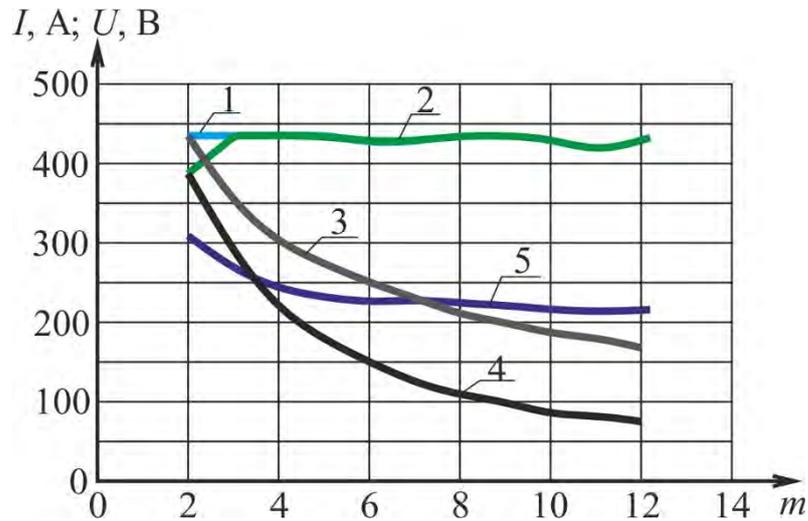


Рис. 2.10. Зависимости среднеквадратичного тока нагрузки  $I_{\text{ср.кв.нагр}}$ , среднего тока нагрузки  $I_{\text{ср.нагр}}$ , среднеквадратичного тока фазы  $I_{\text{ср.кв.ф}}$  и среднего тока фазы выпрямителя  $I_{\text{ср.ф}}$  от числа фаз  $m$  при  $P_{\text{преобр}} = \text{const}$ ; 1 –  $I_{\text{ср.кв.нагр}}$ , 2 –  $I_{\text{ср.нагр}}$ , 3 –  $I_{\text{ср.кв.ф}}$ , 4 –  $I_{\text{ср.ф}}$ , 5 –  $U_{\text{max}}$

Теперь в схеме заменим диоды транзисторами и будем пропускать не все положительные полуволны тока и напряжения, а будем открывать транзисторы на определенную часть периода. На рис 2.11 приведена зависимость тока от числа фаз при открытых транзисторных ключах на половину периода.

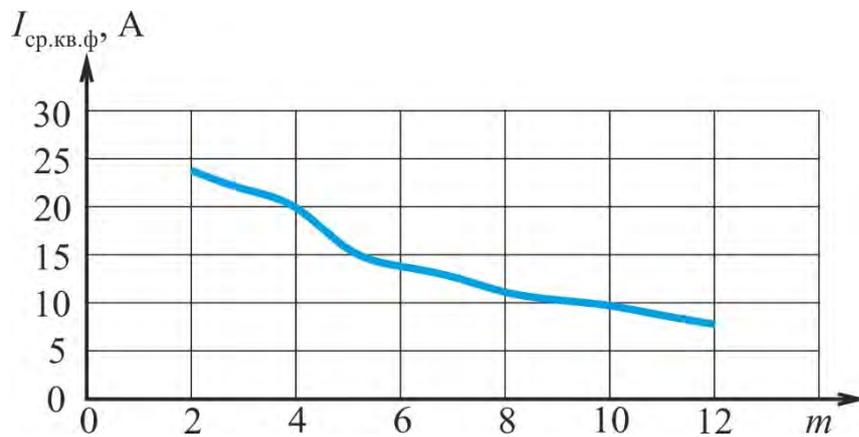


Рис. 2.11. Зависимости среднеквадратичного тока фазы  $I_{\text{ср.кв.ф}}$  выпрямителя от числа фаз  $m$  при  $T_D = 0,5 \cdot T$

На рис 2.12 приведена зависимость тока от числа фаз при открытых транзисторных ключах на четверть периода.

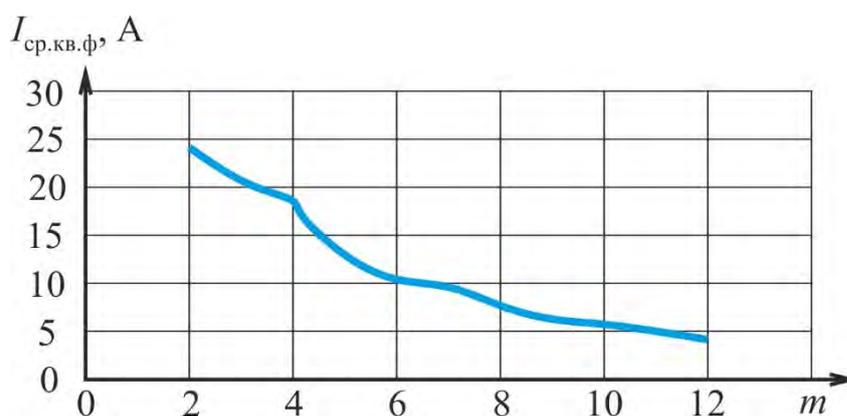


Рис. 2.12. Зависимости среднеквадратичного тока фазы  $I_{\text{ср.кв.ф}}$  выпрямителя от числа фаз  $m$  при  $T_p = 0,25 \cdot T$

При проектировании преобразователя для увеличения срока службы силовых транзисторов их выбирают с запасом по рассеиваемой мощности.

Для оценки рассеиваемой мощности производилась серия экспериментов, задачей которых было определить влияние несущей частоты переключений *IGBT* транзисторов на величину тепловых потерь в силовом ключе. Эксперименты производились на лабораторном стенде, оснащённом преобразователем частоты *SiemensSinamicsS120*. Несущая частота варьировалась в диапазоне от 0 до 16 кГц. В настоящий момент ведущие производители преобразовательной техники позволяют пользователю самостоятельно выбирать величину несущей частоты отпираания ключей в своих устройствах. Исходя из задач регулирования, эксплуатирующий персонал может самостоятельно зайти в настройки привода и выбрать из списка нужный ему параметр. Как видно из рис. 2.13, наименьший перегрев транзистора, а соответственно, и потери в ключе, образуются на малых частотах порядка 1-4 кГц.

Аналогичный эксперимент производился на преобразователе фирмы АВВ. Параметры преобразователя *ACS 880*:  $P_H=5,5$  кВт,  $I_H=12,9$  А,  $I_{max}=16$  А,  $U_{ном}=380$ В,  $P_{\text{рассеив}} = 172$  Вт. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.14.

Аналогичный эксперимент производился на лабораторном стенде, оснащённом преобразователем *UnidriveSP* с номинальным током  $I_H=10,5$  А. При изменении напряжения ток менялся, а температура меняется незначительно на 1-2 °С. При изменении частоты ШИМ в данном преобразователе, была получена зависимость, представленная на рис. 2.15.

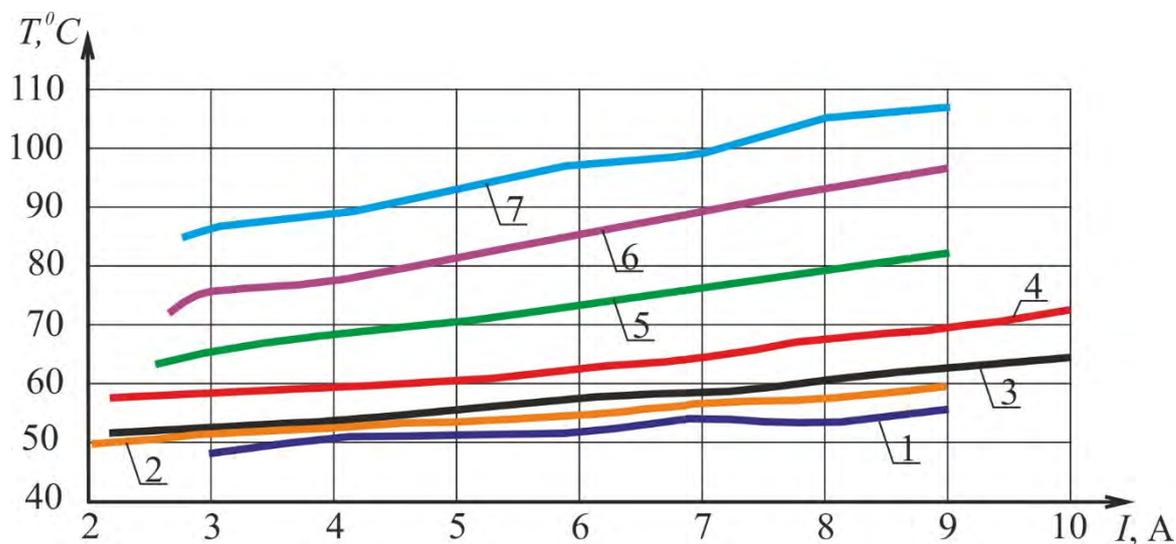


Рис.2.13. Зависимость потерь в полупроводниковых преобразователях в функции несущей частоты ШИМ;  
1 – 0 кГц, 2 – 1 кГц, 3 – 2 кГц, 4 – 4 кГц, 5 – 8 кГц, 6 – 12 кГц, 7 – 16 кГц

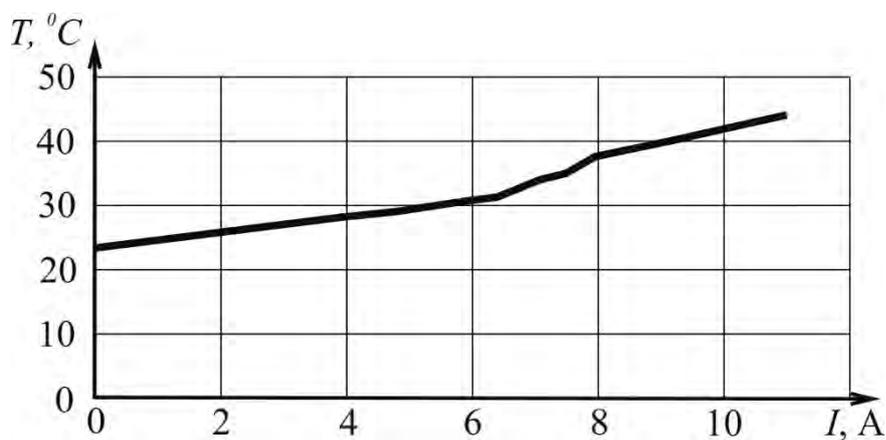


Рис.2.14. Зависимость температуры ключа  $T$  от тока статора  $I$  при изменении напряжения  $f=50$  Гц

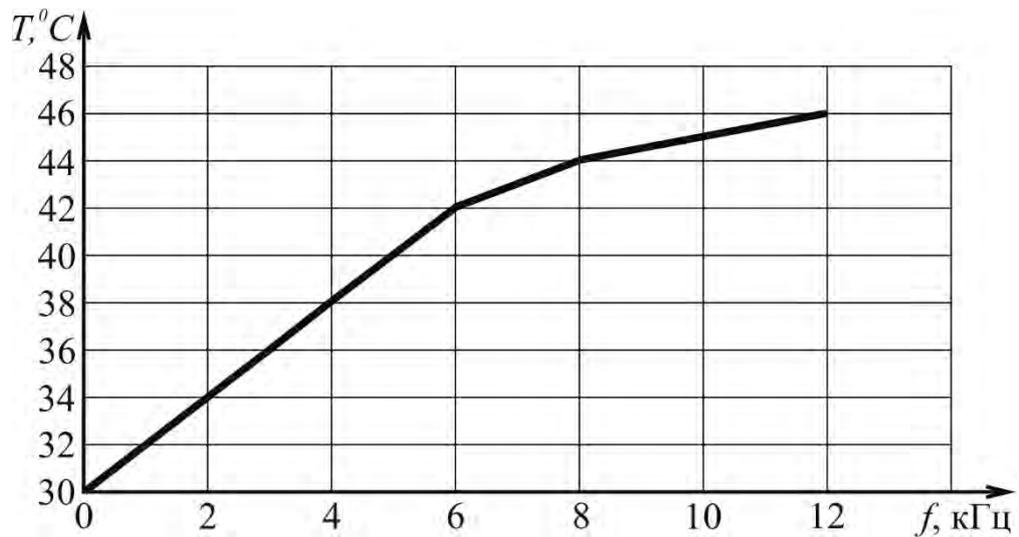


Рис.2.15. Зависимость температуры транзистора  $T$  от частоты ШИМ преобразователя  $f$

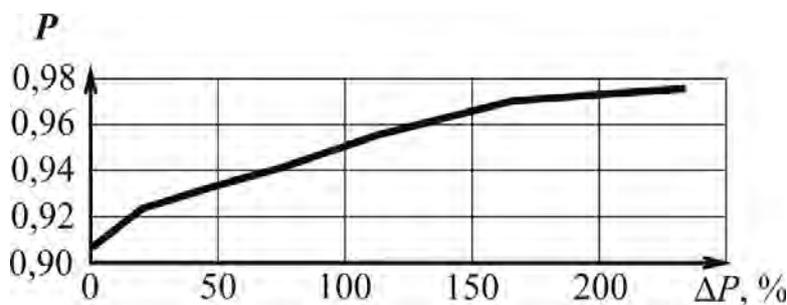


Рис.2.16. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  транзистора при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  в диапазоне мощностей преобразователя от 75 кВт до 250 кВт от запаса мощности преобразователя  $\Delta P$

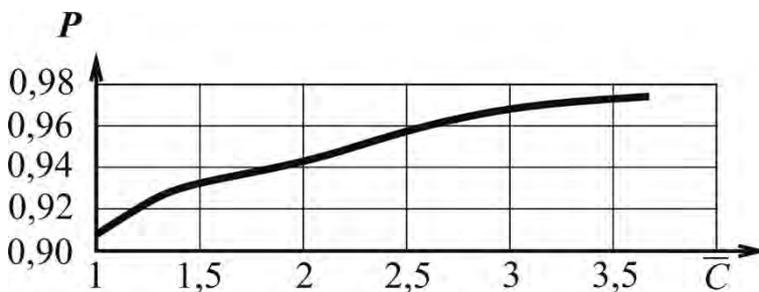


Рис.2.17. Зависимость вероятности безотказной работы транзистора  $P$  от относительной стоимости транзисторного модуля  $\bar{C}$  в о.е. при увеличении запаса мощности для температуры  $20^{\circ}\text{C}$  в диапазоне мощностей от 75кВт до 250кВт

Используя каталожные данные для транзисторов различных производителей [119] и коэффициентный метод расчета надежности, были рассчитаны и построены следующие зависимости вероятности безотказной работы транзисторов от запаса по мощности и от стоимости при различных рабочих температурах рис. 2.14 -2.17.

Если сравнить полученные зависимости с аналогичными

зависимостями для двигателей, то можно заметить, что для увеличения надежности транзисторных модулей до требуемого уровня 0,95-0,9 необходимо увеличение стоимости не в 2-2,5 раза (как у двигателей) а 3,5-4 кратное увеличение. Надежность преобразователей при данном методе введения внутренней избыточности системы возрастает меньше, чем у электрических машин.

Рабочие температуры современных транзисторов находятся в пределах 50-60<sup>0</sup>С, поэтому расчёт производится для рабочей температуры 50<sup>0</sup>С. Максимально допустимая температура коллекторного перехода составляет 70-120<sup>0</sup>С для германиевых и 125-200<sup>0</sup>С для кремниевых транзисторов.

Из рис. 2.18 видим, что при увеличении температуры транзистора достигнуть требуемых условий надежности становится еще труднее. Для достижения показателя вероятности безотказной работы 0,95 требуется уже пятикратный запас по мощности.

На рис. 2.18 приведена зависимость вероятности безотказной работы преобразователя при постоянстве рабочей температуры ( $T=50^0\text{C}$ ) от коэффициента нагрузки равного отношению фактической мощности рассеивания ключа к допустимой мощности рассеивания рассматриваемого транзисторного модуля  $K_n = P_{\text{факт}}/P_{\text{доп}}$ .

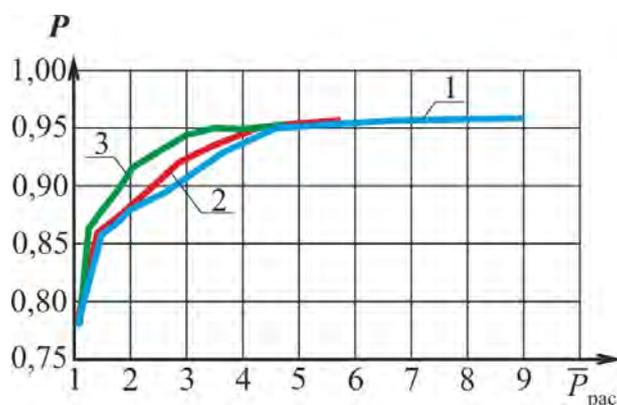


Рис.2.18. Вероятность безотказной работы  $P$  преобразователя от запаса по мощности рассеивания  $P_{\text{рас}}$  при  $T=50^0\text{C}$  в разных диапазонах мощностей;  
1 – 1,5-15кВт, 2 – 11-75кВт, 3 – 75-355кВт

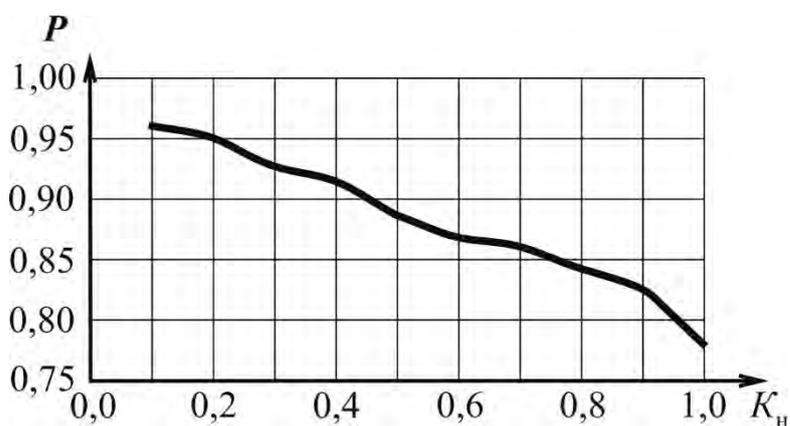


Рис.2.19. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  транзистора в одном габарите транзисторного модуля при изменении коэффициента нагрузки  $K_n$  при рабочей температуре  $T=50^{\circ}\text{C}$

Как мы можем видеть из рис. 2.17 и 2.18 базовая надежность преобразователя с ростом рабочей температуры падает (0,9 при  $20^{\circ}\text{C}$  и уже 0,77 при  $50^{\circ}\text{C}$ ). Интерес также вызывает изменение полученных

зависимостей с ростом мощности самого преобразователя (см. рис. 2.19, 2.20).

Зависимость относительной мощности рассеивания  $P_{\text{рас}}$  от номинальной мощности преобразователя  $P_{\text{транз}}$  в относительных единицах представлена на рис. 2.21 для диапазона мощностей от 1, 5 до 250 кВт.

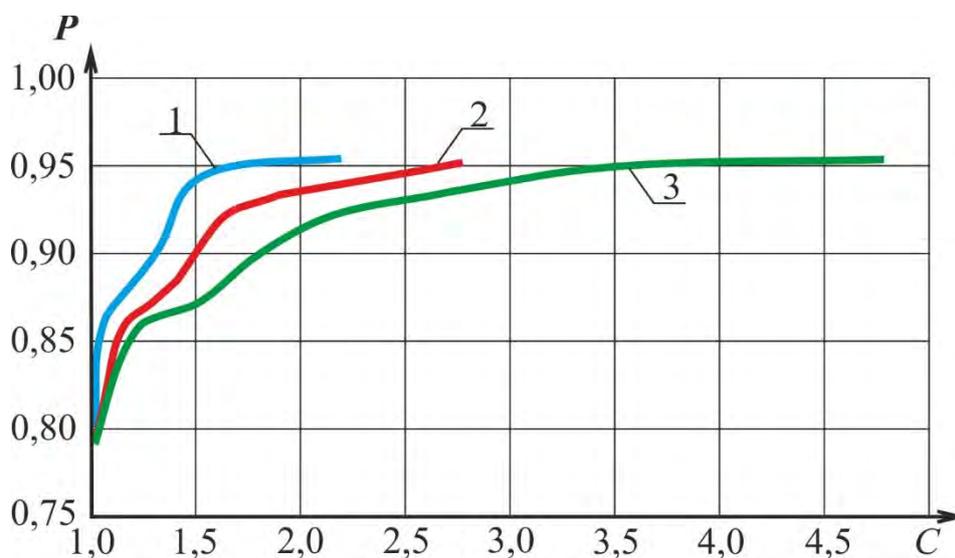


Рис.2.20. Вероятность безотказной работы  $P$  транзистора от относительной стоимости  $C$  преобразователя при рабочей температуре  $T=50^{\circ}\text{C}$  для различных диапазонов мощностей; 1 - 1,5-15кВт, 2 - 11-75кВт, 3 - 75-250кВт

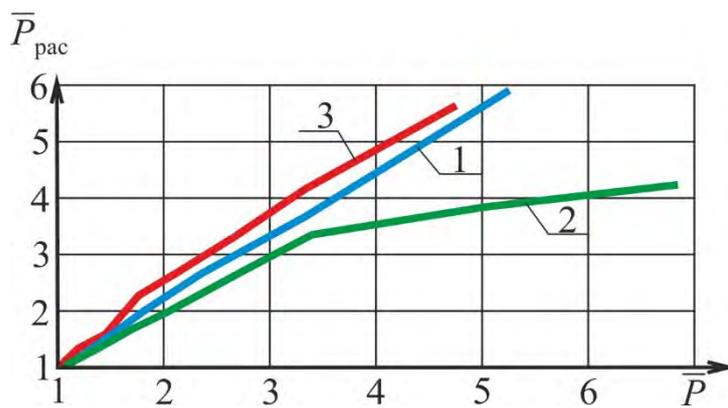


Рис.2.21. Зависимость мощности рассеивания в преобразователе  $P_{\text{рас}}$  в о.е. от номинальной мощности преобразователя  $P$  в о.е. для различных диапазонов мощностей преобразователей; 1 – 1,5-15 кВт, 2 – 11-75 кВт, 3 – 75-250 кВт

У транзисторов определяющее значения надежности имеет мощность рассеивания, так как характеристики транзисторов сильно зависят от температуры (то есть величины потерь), и номинальная мощность преобразователя здесь вторична. Так, например,

обратный ток  $p-n$  перехода увеличивается в 2 раза при повышении температуры на  $10^0 \text{C}$ .

Зависимость мощности рассеивания транзисторных ключей преобразователя *ABBACS 880 5,5 кВт* при изменении тока статора асинхронного двигателя представлена на рис.2.22.

Рассеиваемая мощность транзистора от температуры. При нагревании транзистор не успевает отдать тепло в окружающую среду и греется. Зависимость линейна.

Был рассмотрен диапазон мощностей от 1 кВт до 4,5 МВт. Расчет

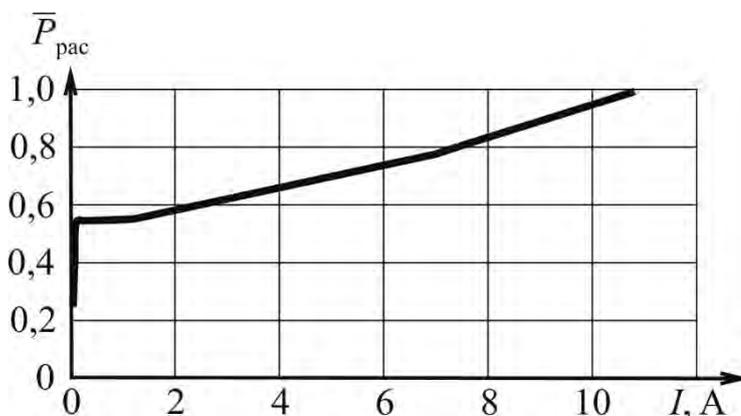


Рис.2.22. Зависимость мощности рассеивания в преобразователе  $P_{\text{рас}}$  в о.е. от величины тока статора  $I$ .

производился для мостовой схемы силовых цепей. В расчете учитывалось количество силовых ключей и степень их загруженности ( $K_H$ ) при заданной ( $50^0\text{C}$ )

температуре. Результаты исследований приведены на рис. 2.23 (а. б. в, г).

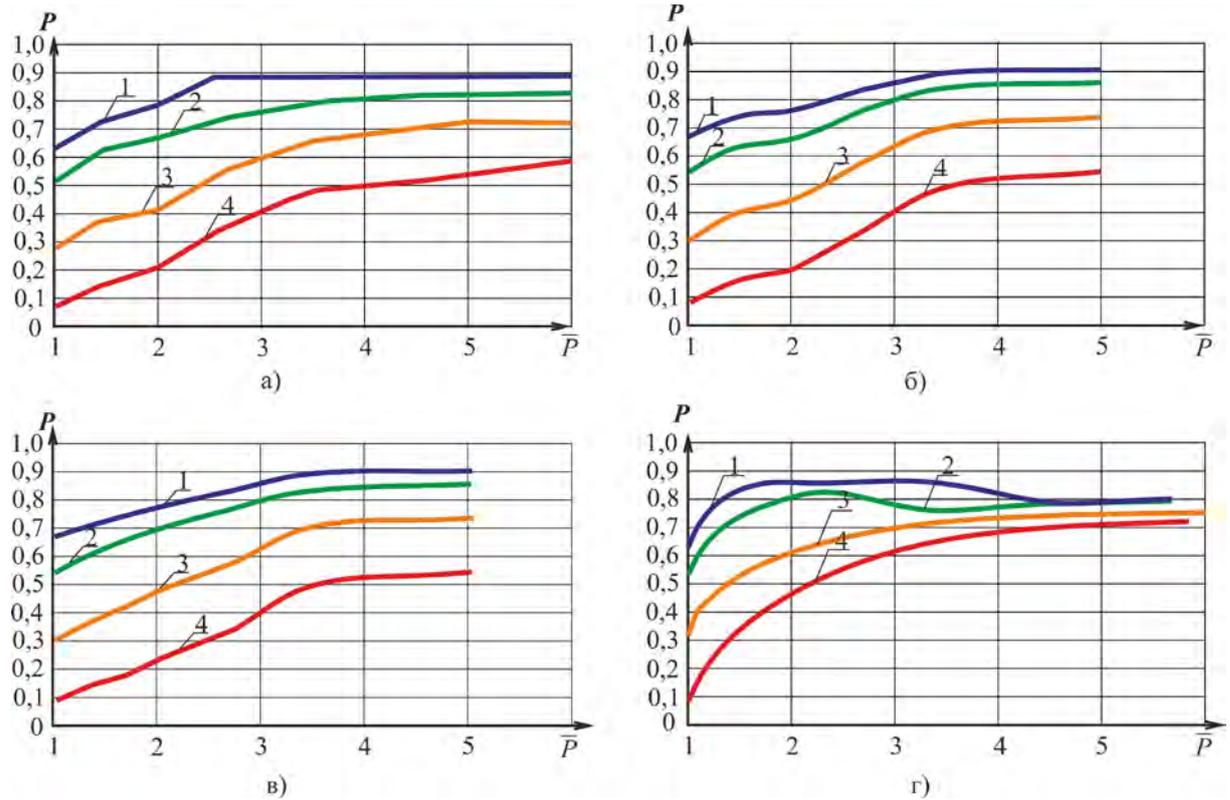


Рис.2.23. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  преобразователей от запаса мощности преобразователя  $\bar{P}$  в о.е. в мостовой схеме, для различного числа фаз и разных диапазонов мощностей; а) от 1,5 до 11 кВт, б) от 11 до 55 кВт, в) от 75 до 355 кВт, г) от 450 до 2800 кВт; 1 – двухфазные преобразователи, 2 – трехфазные преобразователи, 3 – шестифазные преобразователи, 4 – двенадцати фазные преобразователи

Используя информацию о стоимости преобразователей различных фирм производителей были рассчитаны и построены зависимости надежности преобразователей от отношения запаса мощности к цене.

Из рис. 2.24 видно, что приращения мощности (запас) на малых мощностях (1.5-7,5 кВт) обходится дешевле, чем на больших (сотни кВт). Коэффициент запаса мощности в относительных единицах к стоимости преобразователя в относительных единицах здесь выше. Коэффициент  $P/C$  дает представление о затратах на повышение надежности приводов разной мощности.

Также были построены и проанализированы зависимости вероятности безотказной работы преобразователей от увеличения стоимости при

увеличении установленной мощности преобразователя. На рис. 2.25 а и 2.25 б построены множество кривых, отражающих зависимости при различном количестве фаз преобразователя. На рис. 2.25а представлено семейство кривых для диапазона мощностей от 11 до 55 кВт, на рис. 2.25 б. построены те же зависимости для диапазона мощностей от 185 до 1295 кВт. Характер кривых схож. Однако, стоит отметить, что на больших мощностях для достижения приемлемого уровня вероятности безотказной работы, необходимо затратить в 2-3 раза больше средств, чем на малых мощностях. Максимальное количество стоек, подключенных в параллель в одной фазе преобразователя, зависит от его мощности, величины рабочего тока и фирмы производителя. Например, компания *ABB* выпускает преобразователи частоты мощностью 5,5 МВт. Собирается такой преобразователь из нескольких единичных модулей мощностью в 350 кВт. Таким образом, максимальное количество транзисторных модулей, подключенных в параллель равно 15, соответственно, 15 стоек силовых транзисторов подключаются параллельно друг другу. Компания *Siemens* производит транзисторные модули единичной мощности 185 кВт.

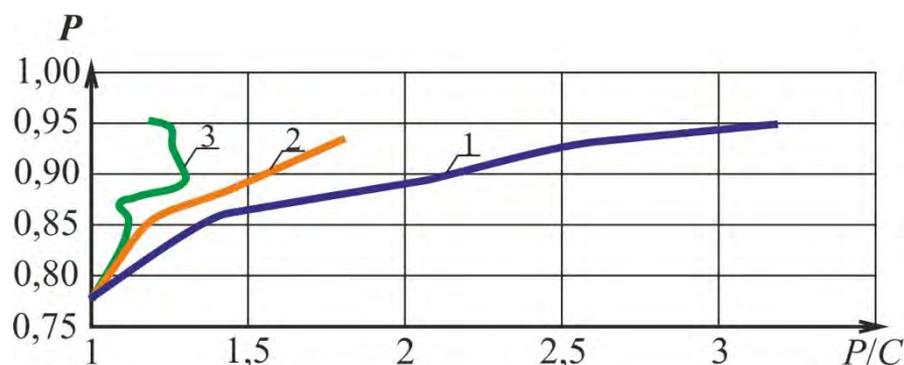


Рис. 2.24. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  преобразователей различных диапазонов мощностей от отношения запаса мощности к цене  $P/C$  трехфазных преобразователей напряжения; 1 – 1,5-7,5 кВт, 2 – 11-55кВт, 3 – 75-355кВт

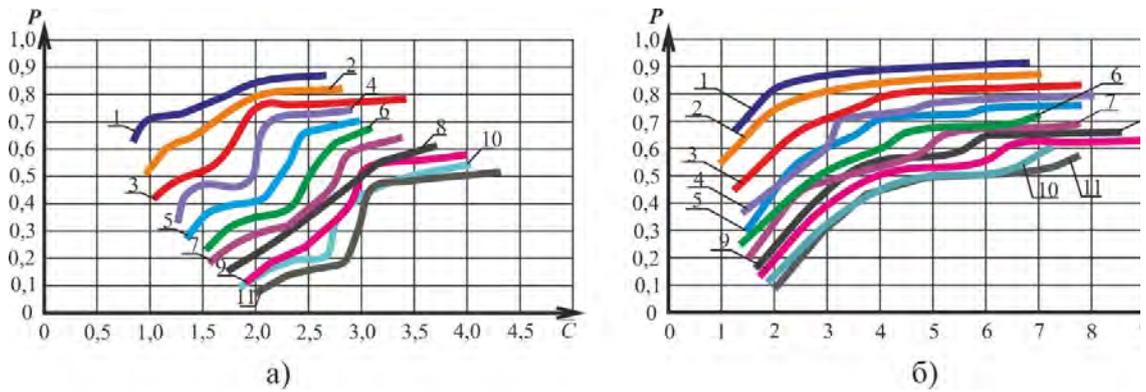


Рис. 2.25. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от относительной стоимости  $C$  преобразователя для  $m$ -фазного преобразователя в различных диапазоне мощностей; а) диапазон 11-55 кВт, б) диапазон 185-1295 кВт, 1 – 2 фазные преобразователи, 2 – 3 фазные преобразователи, 3 – 4 фазные преобразователи, 4 – 5 фазные преобразователи, 5 – 6 фазные преобразователи, 6 – 7 фазные преобразователи, 7 – 8 фазные преобразователи, 8 – 9 фазные преобразователи, 9 – 10 фазные преобразователи, 10 – 11 фазные преобразователи, 11 – 12 фазные преобразователи,

Ранее нами был сделан вывод о росте относительной стоимости силовой части преобразователя при увеличении мощности самого преобразователя. На данном этапе исследования появляется необходимость узнать зависимость увеличения относительной стоимости силового полупроводникового преобразователя от роста номинальной мощности преобразователя в различных диапазонах мощностей. На малых мощностях (0,75-7,5 кВт), ввиду малой доли стоимости силовой части в стоимости всего преобразователя, при десятикратном увеличении мощности преобразователя, цена увеличивается лишь в 2 раза (см. рис. 2.25 а). В диапазоне мощностей от 75 до 355 кВт увеличение мощности в 5 раз приводит к увеличению стоимости преобразователя в 5 раз.

На рис. 2.26 б) представлены те же зависимости, однако линия наибольшего диапазона мощностей (от 185 до 1665 кВт) сформирована за счет цен на преобразователи, выполненные в модульном исполнении. Такой способ изготовления преобразователей обходится дешевле, так как изготовление преобразователя из отдельных готовых элементов – транзисторных модулей – является более надежным и технологичным

способом производства. Именно по этой причине линия 4 (185-1665 кВт) лежит ниже линии 3 (75 – 355кВт).

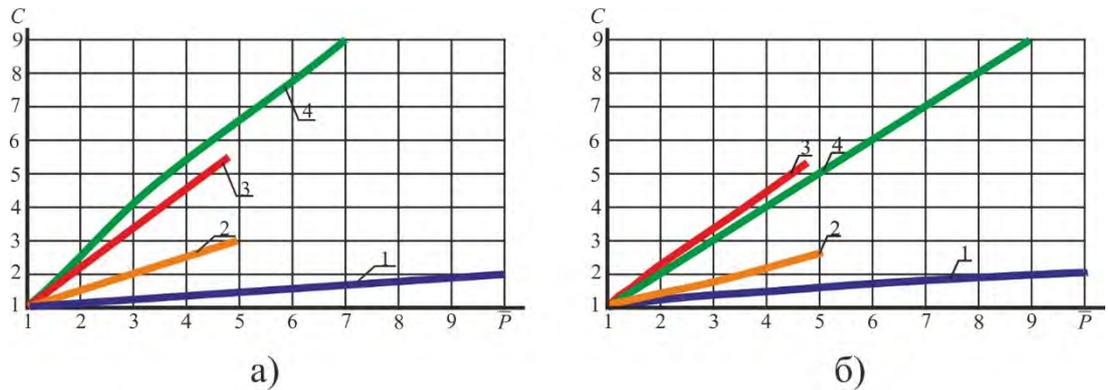


Рис.2.26. Зависимости относительной стоимости преобразователей напряжения  $C$  от номинальной мощности преобразователей  $P$  различных диапазонов мощностей; а) 1 – 0,75-7,5 кВт, 2 – 11-55 кВт, 3 – 75-355 кВт, 4 – 400-2800 кВт, б) с учетом модульного исполнения приводов больших мощностей 1 – 0,75-7,5 кВт, 2 – 11-55 кВт, 3 – 75-355 кВт, 4 – 185-1665 кВт

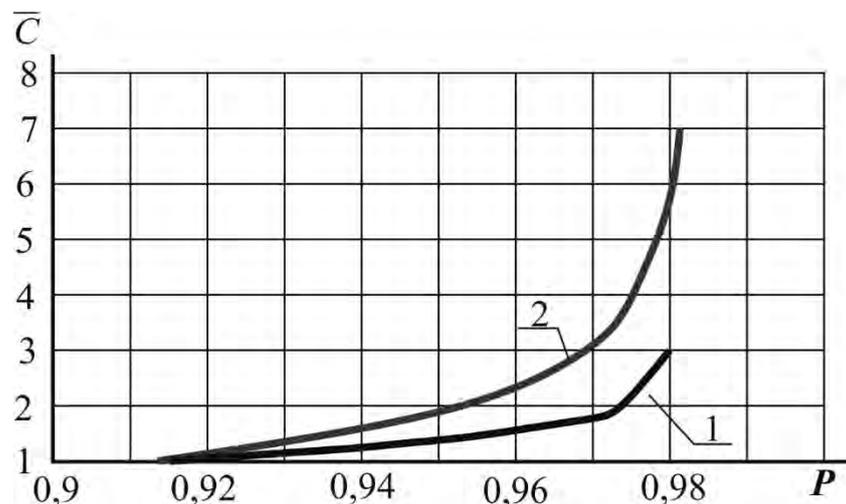


Рис. 2.27. Зависимость относительных затрат  $\bar{C}$  на полупроводниковый преобразователь от вероятности его безотказной работы  $P$  для диапазона мощностей: 1 – (0,18– 1,1) кВт; 2 – (1 000 до 2 000) кВт

Были построены зависимости относительных затрат на полупроводниковый преобразователь от вероятности безотказной работы  $P$  (см. рис. 2.27). Эти зависимости качественно совпадают с кривыми рис. 2.1, но при этом для обеспечения уровня надежности  $P=0,98$  требуется увеличить относительные затраты  $C$ . Наиболее выразительно это проявляется для электроприводов больших мощностей (рис. 2, кривая 2.27). Объясняется это тем, что в суммарной стоимости установленного электрооборудования доля

затрат на полупроводниковый преобразователь является существенной [26,25].

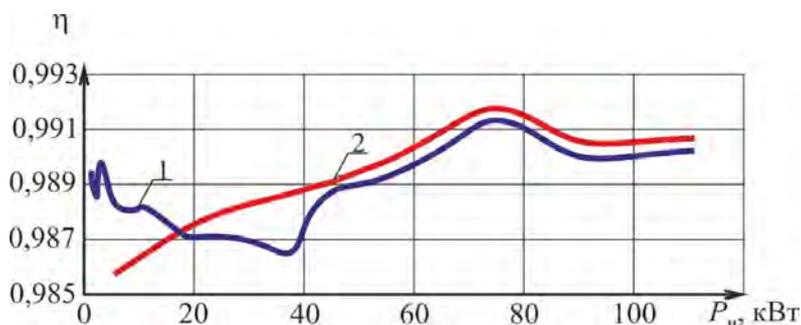


Рис. 2.28. Зависимость КПД преобразователей от номинальной мощности привода в диапазоне мощностей от 1,5 до 110 кВт;  
1 –  $U_{\text{ном}}=380$  В, 2 –  $U_{\text{ном}}=690$  В

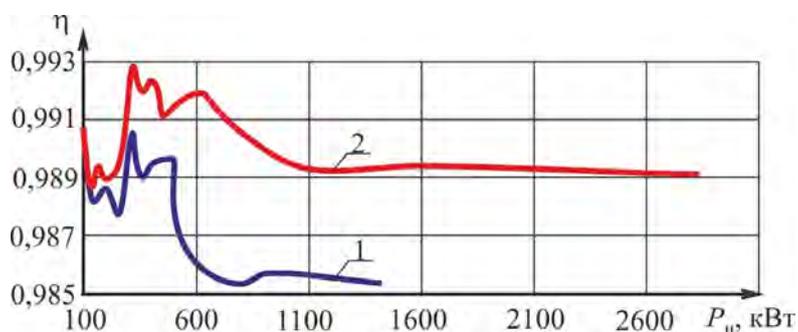


Рис. 2.29. Зависимость КПД преобразователей от номинальной мощности привода в диапазоне мощностей от 100 до 2800 кВт;  
1 –  $U_{\text{ном}}=380$  В, 2 –  $U_{\text{ном}}=690$  В

При конструировании системы электропривода необходимо учитывать КПД (потери) силовых полупроводниковых преобразователей. Несмотря на высокие значения КПД преобразователей, на мощностях свыше 1 МВт даже 1% потерь мощности – это огромное количество энергии. На основе каталожных данных [118] были построены следующие зависимости КПД от величины номинальной мощности преобразователя в двух диапазонах мощностей: от 1 до 100 кВт (см. рис. 2.28) и от 100 до 2800 кВт (см. рис. 2.29).

КПД преобразователей, рассчитанных на большие фазные напряжения, выше, чем КПД преобразователей той же мощности, но меньшего напряжения. Это объясняется зависимостью потерь от квадрата тока. Соответственной с ростом напряжения и при сохранении мощности, ток

преобразователя уменьшается, а соответственной во второй степени снижаются и потери. На рис. 2.30 а и 2.30 б построены зависимости относительной величины мощности потерь от полной мощности преобразователя для разных диапазонов мощностей.

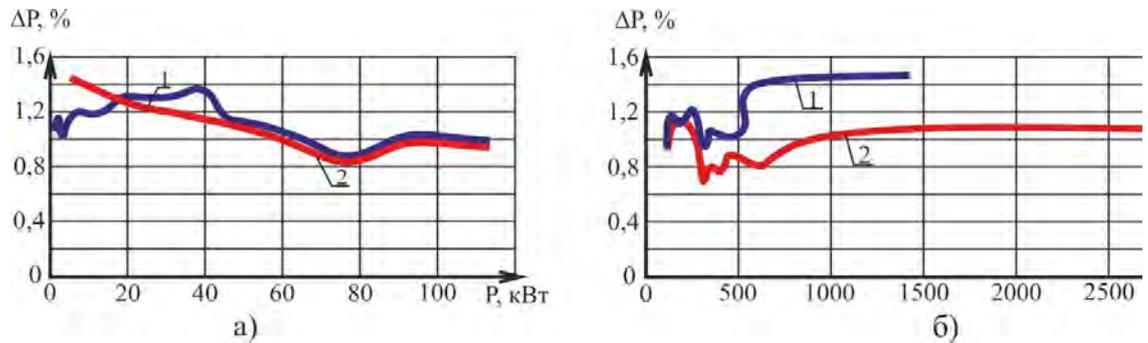


Рис.2.30. Зависимости величины мощности потерь преобразователей  $\Delta P$  от номинальной полной мощности преобразователей  $P$  различных диапазонов мощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт, 1 –  $U_{\text{ном}}=380$  В, 2 –  $U_{\text{ном}}=690$  В,

б) диапазон 110-2800кВт, 1 –  $U_{\text{ном}}=380$  В, 2 –  $U_{\text{ном}}=690$  В

На основе полученных данных о величине потерь электрического и электромеханического преобразователей можно произвести анализ потерь системы электропривода в зависимости от номинальной мощности. Результаты расчета потерь в системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель для различных диапазонов мощностей и величин напряжений приведены на рис. 2.31 – рис. 2.34.

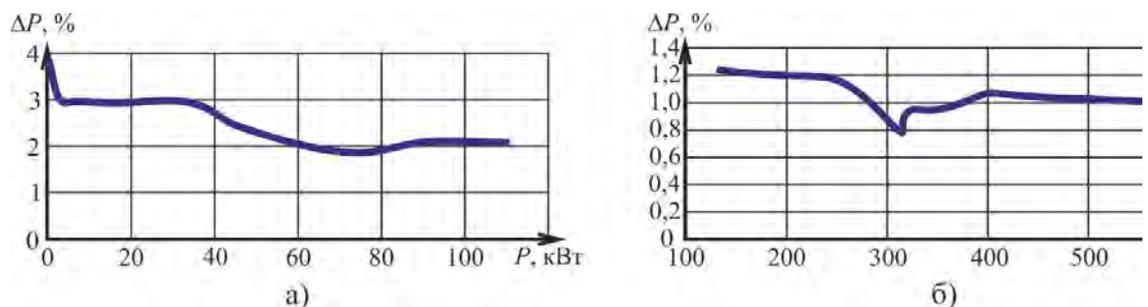


Рис.2.31. Зависимости величины мощности потерь системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель  $\Delta P$  от номинальной мощности двигателей  $P$  для различных диапазонов мощностей и напряжений питания;

а) диапазон 0,75-110кВт,  $U_{\text{ном}}=380$  В, б) диапазон 132-560 кВт,  $U_{\text{ном}}=3000$  В

Как видим из рисунков, относительная доля потерь мощности в

системах большей мощности снижается. Это объясняется тем, что наибольшие потери в системе электропривода присущи электрическим двигателям, и, как уже было отмечено выше, потери в двигателях уменьшаются с ростом мощности.

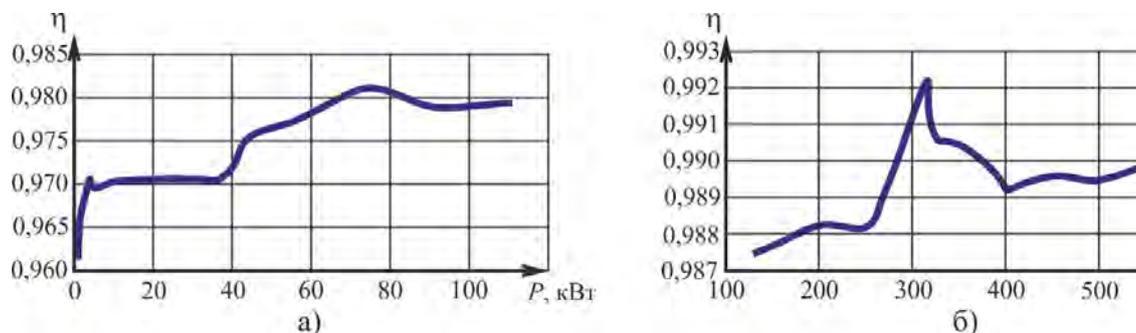


Рис.2.32. Зависимости величины КПД системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель от номинальной мощности двигателей  $P$  различных диапазонов мощностей и напряжений питания;

а) диапазон 0,75-110кВт,  $U_{\text{ном}}=380$  В, б) диапазон 132-560 кВт,  $U_{\text{ном}}=3000$  В

На рис. 2.33 а и рис. 2.33 б для сравнения показаны зависимости КПД преобразователя и КПД системы электропривода.

На рис. 2.34 а и рис. 2.34 б представлены зависимости тепловых потерь от объема корпуса преобразователя для линейки преобразователей фирмы *ABB*. Вертикальные линии на графиках говорят о том, что в одном корпусе были выполнены преобразователи на разные мощности, которые имеют соответственно разные величины потерь.

Однако, для качественной оценки потерь от объема (габарита) преобразователя необходимо ввести понятие удельных потерь, т.е. отношение величины потерь к единице объема  $dP/V$  кВт/м<sup>3</sup>. На рис. 2.35 а) и рис. 2.35 б) приведены получившиеся зависимости для разных диапазонов мощностей.

Еще более корректной была бы зависимость величины тепловых потерь от площади теплоотводящей поверхности преобразователей. Эти зависимости отражены на рис. 2.36 а и рис. 2.36 а для различных диапазонов мощностей.

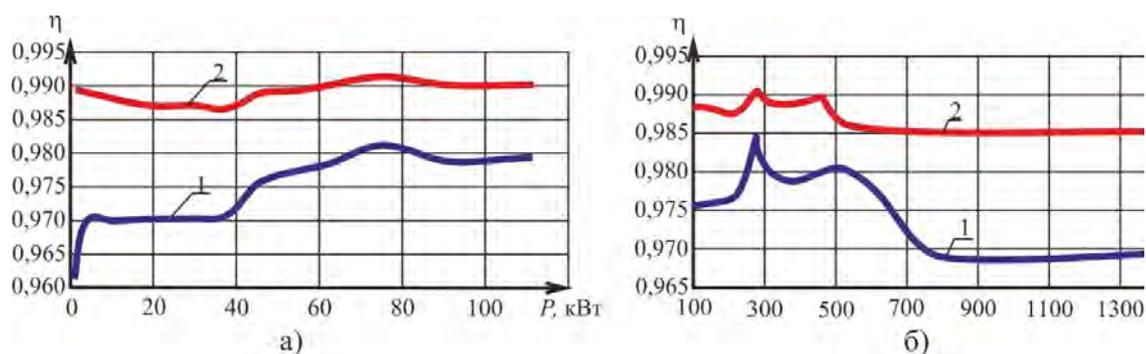


Рис.2.33. Зависимости величин КПД преобразователя и КПД системы электропривода от номинальной мощности преобразователей различных диапазонов мощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт, 1 – система электропривода, 2 – преобразователь без двигателя б) диапазон 132-1400 кВт, 1 – система электропривода, 2 – преобразователь без двигателя

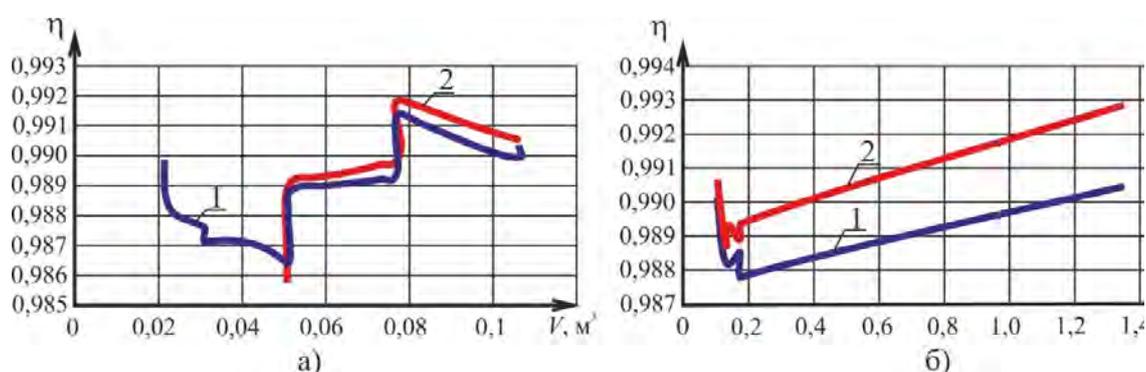


Рис.2.34. Зависимости величин КПД преобразователя от объема корпуса  $V$  преобразователей различных диапазонов мощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт, б) диапазон 110-315 кВт, 1 –  $U_{ном}=380$  В, 2 –  $U_{ном}=690$  В

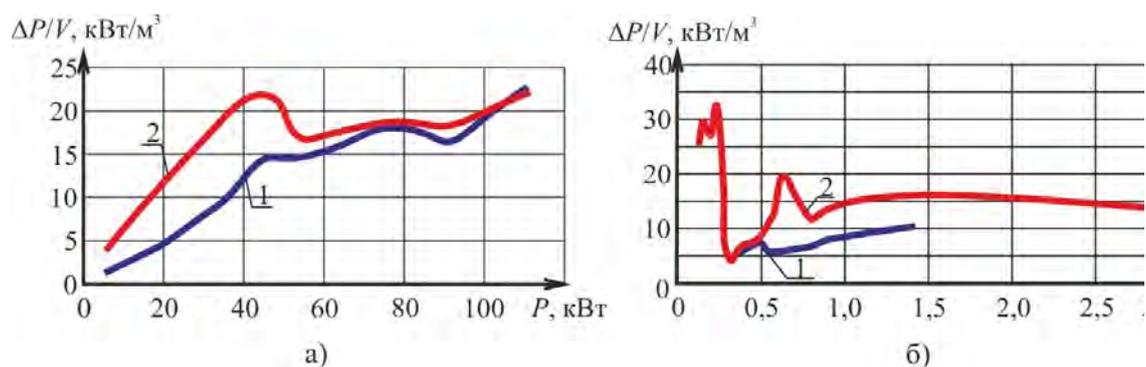


Рис.2.35. Зависимости отношения потерь в преобразователе  $\Delta P_k$  объему корпуса преобразователя  $V_{от}$  от мощности преобразователей  $P$  различных диапазонов мощностей;

а) диапазон 5,5-110кВт, б) диапазон 132-2800 кВт, 1 –  $U_{ном}=380$  В, 2 –  $U_{ном}=690$  В

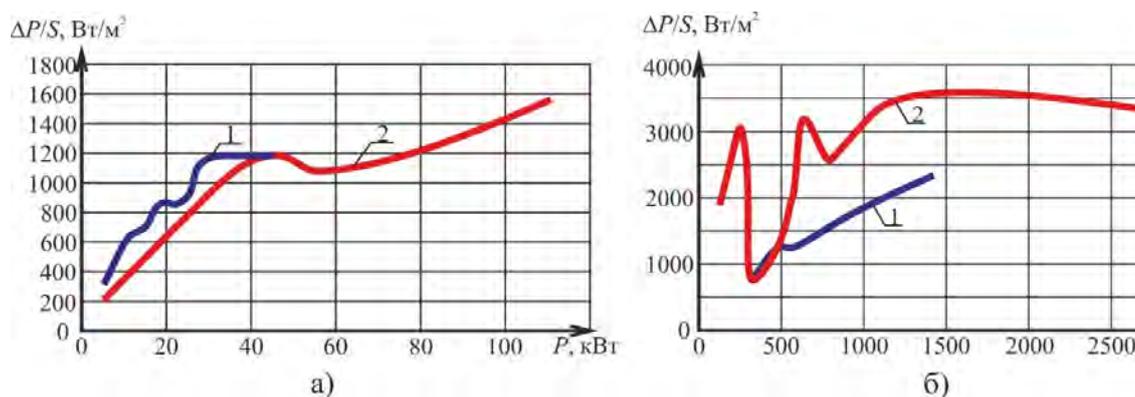


Рис.2.36. Зависимости отношения потерь в преобразователе  $\Delta P_k$  площади теплоотводящей поверхности корпуса преобразователя  $S_{от}$  мощности преобразователей  $P$  для различных диапазонов мощностей;

а) диапазон 5,5-110кВт, б) диапазон 132-2800 кВт, 1 –  $U_{ном}=380$  В, 2 –  $U_{ном}=690$  В

Таким образом, выбирая элементы «с запасом» или с так называемой внутренней избыточностью, надежность всей системы повышается. Важно отметить, что повышение надежности этим путем влечет за собой повышение стоимости составляющих в отдельных случаях в 3-5 раз. Однако, при увеличении затрат на изготовление, наблюдается снижение затрат на ремонт оборудования. Во многих случаях с экономической точки зрения выгодно делать более надёжное изделие, даже в том случае, если к нему не предъявляются высокие требования безотказности по условиям эксплуатации.

## 2.2. Постановка задачи оптимизации полупроводниковых преобразователей

Вместе с развитием технологий изготовления полупроводниковых элементов растут требования к полупроводниковым преобразователями со стороны потребителя. Эти требования могут отличаться в зависимости от сферы применения системы электропривода. При проектировании полупроводниковых преобразователей традиционно в качестве основного критерия эффективности выбирают энергетические показатели, такие, как КПД или  $\cos\phi$ . Это связано с широким распространением электроприводов

насосов и компрессоров, в которых режимы пусков и торможений нечасты, а нагрузка носит равномерный характер. В связи с этим критерии, связанные с массогабаритными показателями или перегрузочными способностями, для таких систем не являются приоритетными. Однако, существует целый ряд механизмов, для которых на первый план выходят надежность показатели системы электропривода, а точнее вероятность безотказной работы системы. В таком случае критерии по энергетической эффективности, удельным массогабаритным показателям и надежностным характеристикам могут оказаться противоречивыми. Например, в электроприводах на базе СРМНВ, для улучшения энергетических показателей прибегают к увеличению количества фаз [23], что, в свою очередь, положительно сказывается на надежности системы, однако, снижает массогабаритные показатели и неоднозначно может повлиять на показатель экономической эффективности системы в целом. В этой связи, решая задачи многокритериальной оптимизации необходимо находить компромиссные решения, удовлетворяющие условиям конкретной задачи.

Постановка задачи оптимизации полупроводникового преобразователя требует определения и обоснования критериев оптимизации, параметров оптимизации и ограничений.

Задача многокритериальной оптимизации в общем случае может быть сформулирована в виде обобщенной целевой функции

$$Q = \max\{q_1, q_2, q_3\}.$$

Здесь  $Q$  – целевая функция, а  $q_1, q_2, q_3$  – критерии оптимизации.

В нашем случае критерием оптимизации будет выступать величина  $P$  – вероятность безотказной работы преобразователя. Параметрами оптимизации, т. е. величинами, на которые мы можем оказывать воздействие, будут выступать:

– конфигурация схемы силовых цепей полупроводникового преобразователя;

- количество фаз в полупроводниковом преобразователе;
- температурный режим работы преобразователя;
- кратность резервирования;

Оценку максимума вероятности безотказной работы преобразователя будем производить в рамках наложенных ограничений на целевую функцию. Поскольку количество фаз является целым числом, то итоговая функция будет носить дискретный (шаговый) характер при переходе от одного количества фаз к другому. Вторым ограничением выступает цена на техническое решение. Экстремум функции, если таковой будет обнаружен, будем находить в условиях равенства цен для различных решений.

С ростом мощности преобразователей напряжения, начиная с определенной величины тока, полупроводниковые ключи в каждой фазе преобразователя устанавливают параллельно для уменьшения токовой нагрузки. В этой связи, выбор в качестве параметра оптимизации количество фаз преобразователя является наиболее естественным решением. С увеличением количества фаз возрастает и общее количество полупроводниковых ключей.

Основные элементы полупроводникового преобразователя подлежащие оптимизации представлены на рис. 2.37.

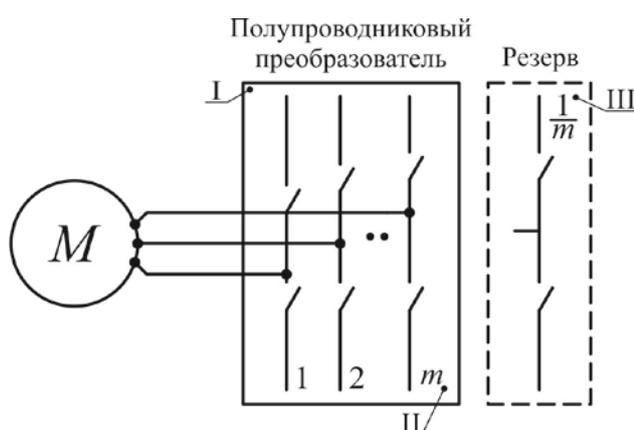


Рис. 2.37. Основные элементы полупроводникового преобразователя подлежащие оптимизации: I – схема силовых цепей преобразователя; II – количество фаз преобразователя; III – кратность резервирования.

### 2.3. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей

На первом этапе параметрической оптимизации строится зависимость отношения приращения цены полупроводникового преобразователя по сравнению с преобразователем, идущим следом линейке мощностей к цене на этот преобразователь, к отношению приращения рабочего тока (читай мощности) полупроводникового преобразователя к рабочему току (мощности) преобразователя, идущего следом в линейке мощностей от тока (мощности) преобразователя и рассчитывается коэффициент  $C$  относительной цены преобразователя к относительному номинальному току преобразователя:

$$C = \frac{\Delta C / C_1}{\Delta I / I_1}$$

где  $C$  – коэффициент относительной цены преобразователя к относительному номинальному току преобразователя,  $\Delta C$  – относительное увеличение цены на преобразователь,  $C_1$  – изначальная стоимость базового преобразователя,  $\Delta I$  – относительное увеличение номинального тока преобразователя при переходе к преобразователю по мощности на одну ступень выше.  $I_1$  – номинальный ток базового рассматриваемого преобразователя.

Произведем расчет коэффициента  $C$ , воспользовавшись информацией из каталогов фирм производителей преобразователей *ABB* и *Control Techniques* для некоторых линеек преобразователей частоты. Полученные зависимости представлены на рис. 2.38.

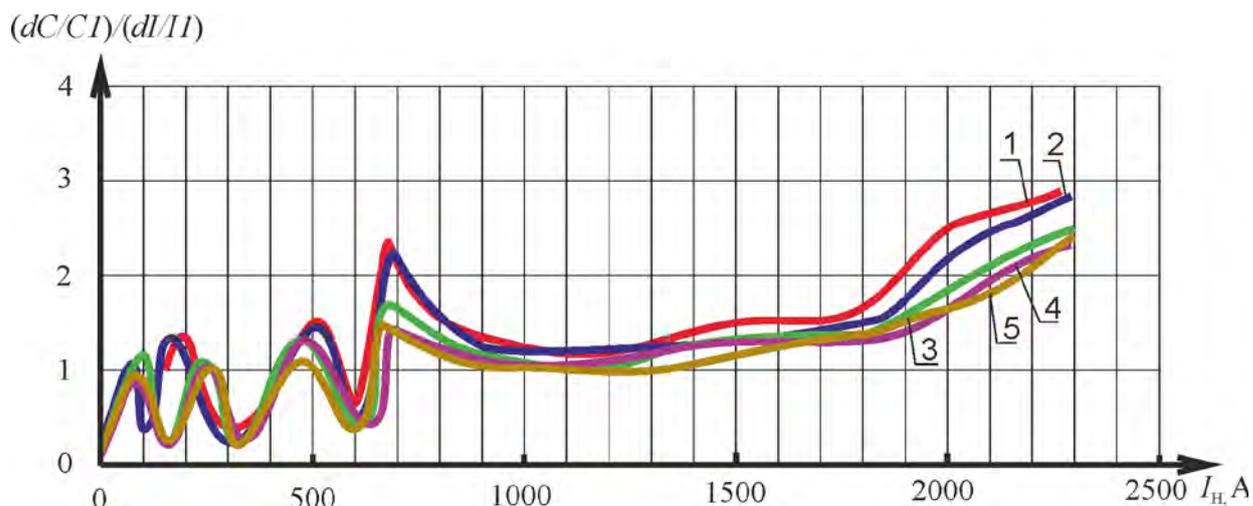


Рис. 2.38. Зависимость коэффициента  $C$  относительной цены преобразователя к относительному номинальному току преобразователя от тока преобразователя для линейек преобразователей фирм производителей *Control Techniques* и *ABB*:  
 1 – *ABB ACS800-07*; 2 – *ABB ACS800-07*; 3 – *CT SP*; 4 – *CT SE*; 5 – *CT Comm SX*.

На следующем этапе оптимизации происходит оценка полученной зависимости и определение значения коэффициента  $C$ . При значениях  $C$ , меньших 1, М.А. Левиным обосновано применение методики выбора оптимального запаса мощности преобразователя по критерию суммарных годовых затрат. Установлено, что наибольшее влияние на запас мощности оказывает интенсивность аварийных ситуаций и ответственность электропривода по технологическому ущербу при отказе полупроводникового преобразователя. Автор учел дискретность шкалы мощностей преобразователя и разработал рекомендации по выбору запаса мощности. При величине относительного ущерба  $y < 2$  достаточно иметь запас в пределах выбранной ступени мощности; при  $2 < y < 8$  необходим запас на одну ступень; при  $y > 8$  – запас на две ступени, где  $y$  – ответственность по технологическому ущербу:

$$y = \frac{Y}{Z_p}$$

где  $Y$  – размер ущерба,  $Z_p$  – затраты на капитальный ремонт.

Таким образом, автор учитывал влияние запаса мощности на величину экономического ущерба, образующегося при отказе двигателя, что не совсем справедливо для установок, отказ в работе которых может причинить вред здоровью или даже гибели людей.

В случаях, если коэффициент  $C$  превышает 1, необходимо в первую очередь произвести анализ существующих схемных решений.

Произведем анализ силовых схем полупроводниковых преобразователей и дадим оценку количества силовых транзисторов в функции количества числа фаз преобразователя и его мощности.

Для анализа надежности любой схемы силовых цепей необходимо знать количество полупроводниковых элементов, в нее входящих. Эта величина зависит как от схемы исполнения силовой схемы, так и от величины мощности, на которую эта схема рассчитывается. Для сравнения были выбраны наиболее широко распространенные на сегодняшний день схемы: мостовая и полумостовая схемы (см. рис. 2.39, 2.40, 2.42, 2.43).

Для удобства анализа и дальнейшего сопоставления схем в программном продукте *MATLAB* были построены поверхности (см. рис. 2.41 и 2.44.), отражающие зависимость количества ключей от количества фаз схемы и мощности нагрузки.

Показанные зависимости помогают выбрать оптимальное число фаз преобразователя в зависимости от мощности по критерию надежности. Так, например, в диапазоне мощностей от 2 до 3 МВт, самыми надежными являются 2, 3 и 6 фазные схемы, при мощностях от 4,5 МВт наиболее предпочтительно иметь 3, 6 или 12 фазный преобразователь, а 1 и 9 фазные в этом случае рекомендовать нельзя.

Относительная установленная мощность силовых полупроводниковых приборов и в мостовой, и в полумостовой схеме одинаковы, так как сокращение в два раза количества транзисторов и диодов в полумостовой схеме, по сравнению с мостовым вариантом, приводит к соответствующему

уменьшению мощности нагрузки из-за уменьшения выходного напряжения. Для использования данной схемы с нагрузкой такой же мощности, что и у мостовой схемы, необходимо иметь транзисторы на токи, в два раза превышающие токи в мостовой схеме. Уменьшение количества полупроводниковых элементов приводит к увеличению надежности этого типа схемы, однако, увеличение амплитудных значений токов снижает вероятность безотказной работы.

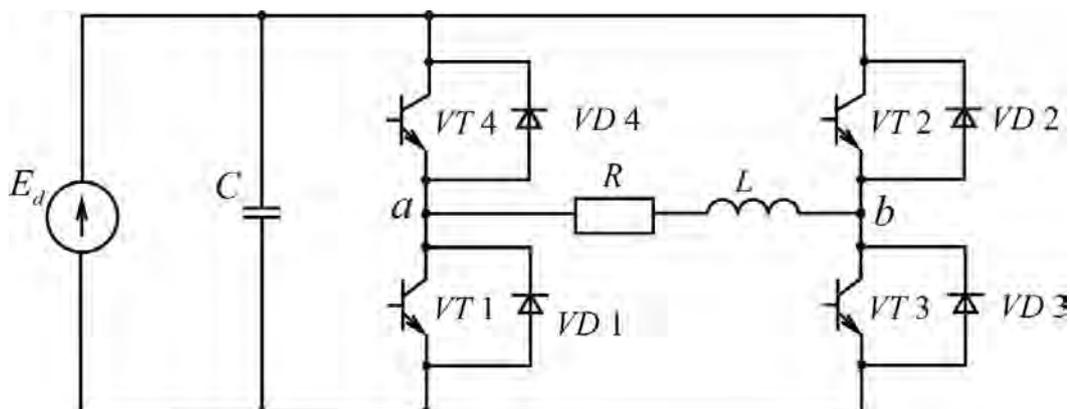


Рис. 2.39. Упрощённая схема однофазного мостового транзисторного инвертора

Еще одним немаловажным фактором, снижающим надежность данной схемы, является емкостной фильтр. Поскольку частота первой гармоники пульсаций входного тока в полумостовой схеме в два раза ниже, чем в мостовой, требуемые величины емкости фильтра и в том, и в другом случае практически одинаковы, но в полумостовой схеме таких конденсаторов надо два. Таким образом, с точки зрения установленной мощности входного фильтра, полумостовой вариант схемы инвертора менее надежен и менее экономичен.

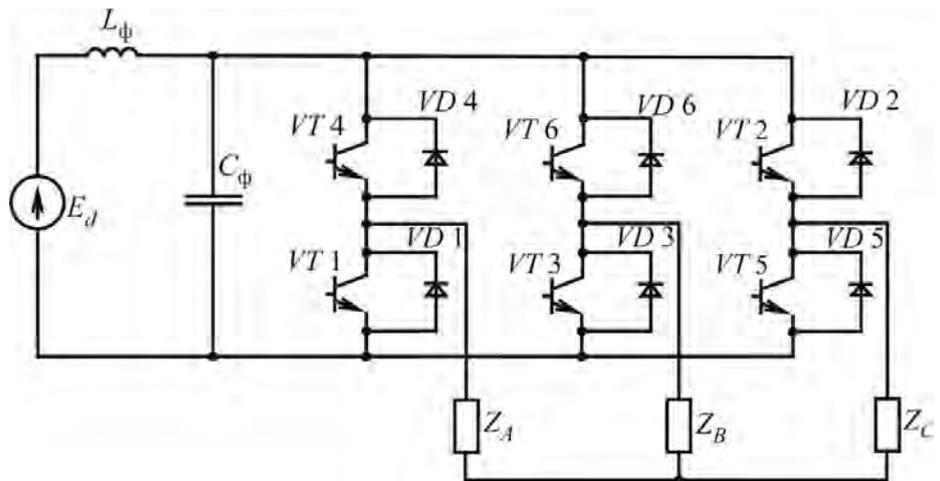


Рис. 2.40 Упрощённая схема трехфазного мостового транзисторного автономного инвертора

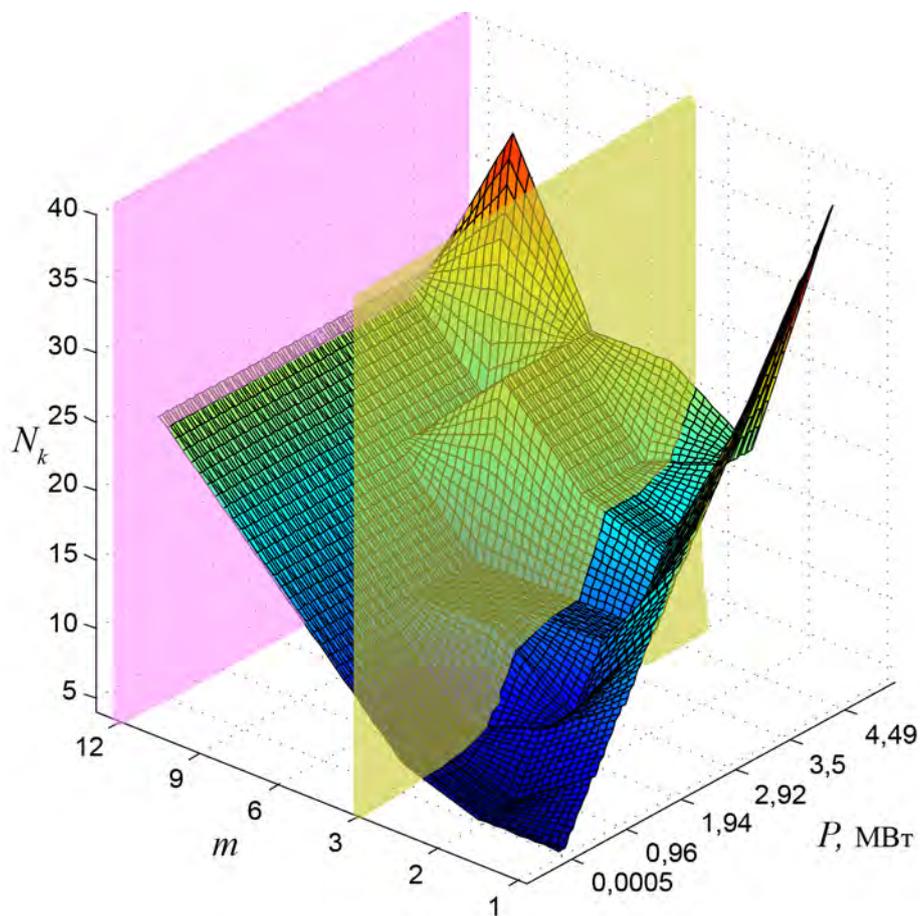


Рис. 2.41. Зависимость количества управляемых силовых ключей в мостовой схеме преобразователя от числа фаз и установленной мощности преобразователя

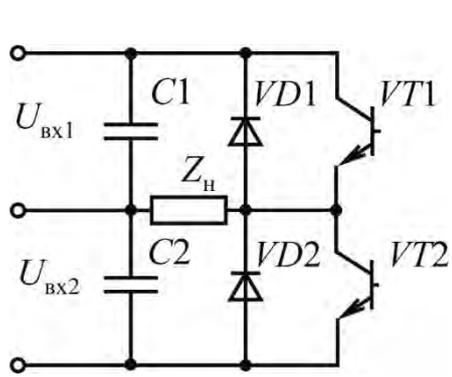


Рис. 2.42 Упрощенная схема инвертора с выводом нулевой точки источника питания

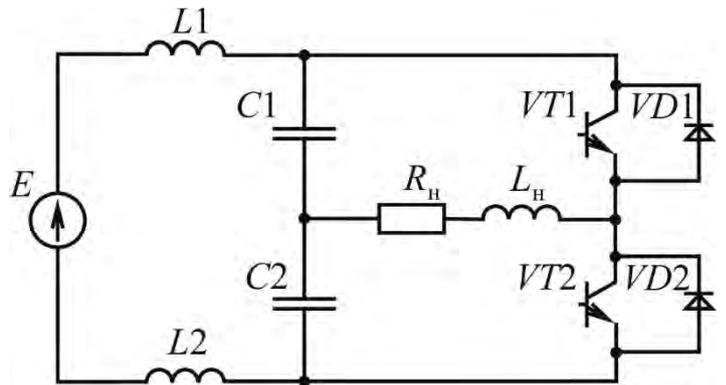


Рис. 2.43. Упрощенная схема однофазного полумостового транзисторного инвертора напряжения

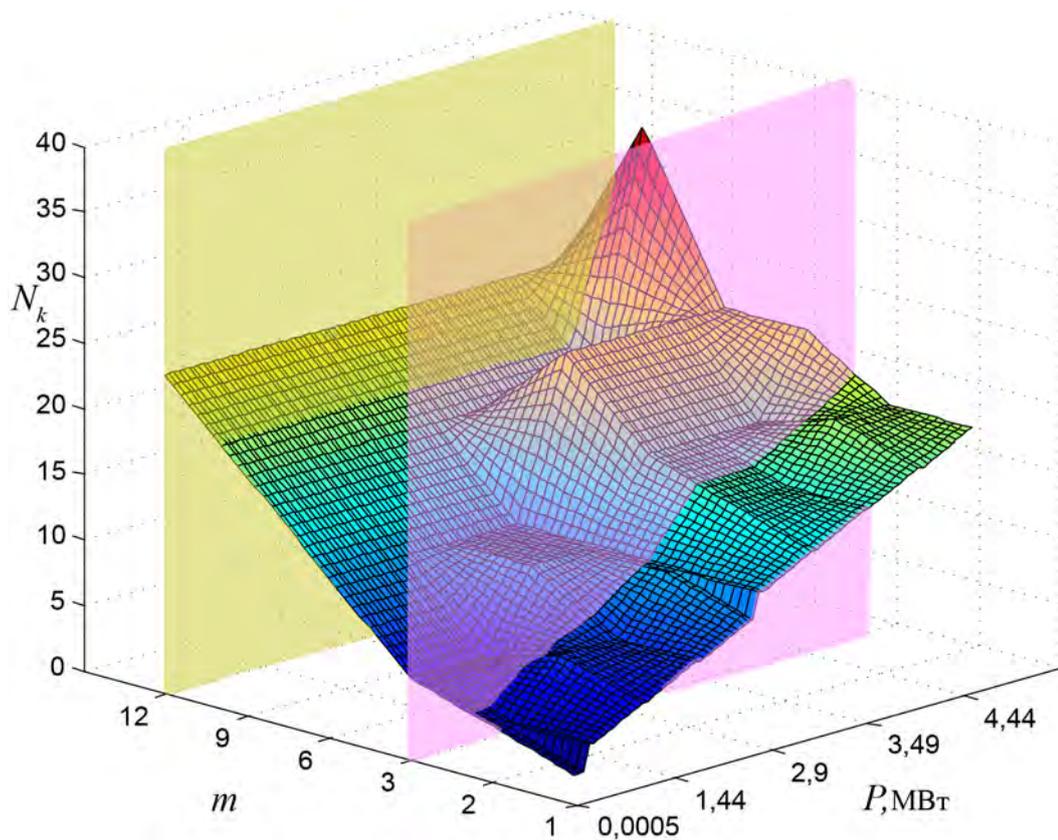


Рис. 2.44. Зависимость количества управляемых силовых ключей в полумостовой схеме инвертора и схеме инвертора с выводом нулевой точки источника питания от числа фаз и установленной мощности преобразователя

На следующем этапе оптимизации строится график целевой функции, в нашем случае это зависимость вероятности безотказной работы преобразователя  $P$  от количества фаз  $m$  и рабочего тока  $I$ :  $P=f(m, I)$ . При построении поверхности в первую очередь строится зависимость  $P$  от количества фаз  $m$  для выбранной конфигурации схемы, а затем, на третьей пространственной оси откладываются величины рабочих токов (мощностей) полупроводниковых преобразователей.

Далее параметр надежности корректируется в зависимости от кратности резервирования  $k$  – отношения числа резервных элементов к числу основных элементов устройства. Как уже отмечалось выше, в нашем случае резервированию будет подлежать часть мощности преобразователя (количество фаз), а точнее, определенное количество IGBT модулей, приходящихся на одну фазу. Таким образом, резервированию будет подлежать  $k=1/m$  фаз преобразователя. Для трехфазной мостовой схемы  $k=1/3$  установленной мощности, что соответствует холодному резервированию одной фазы трехфазного моста.

Уточнение критерия оптимизации происходит по общеизвестной формуле:

$$P(t)_{\text{рез}} = 1 - (1 - P(t))^{k+1},$$

где  $P(t)_{\text{рез}}$  – вероятность безотказной работы резервированной системы,  $P(t)$  – вероятность безотказной работы системы.

После уточнения зависимости  $P=f(m, I)$  с вводом резерва в систему необходимо произвести корректировку параметра  $P$  для конкретного температурного режима работы преобразователя. В этой связи, естественным является применение коэффициентного метода расчета надежности полупроводникового преобразователя, подробно описанного ранее. Привлекательной особенностью данного метода является отсутствие необходимости иметь сведения о коэффициентах надежности всех элементов, достаточно знать абсолютное значение интенсивности отказов

лишь одного базового.

Отличительной чертой применения данного метода к оценке вероятности безотказной работы лежит учет температурного режима преобразователя. В зависимости от рабочих температур преобразователя значения поправочных коэффициентов  $a_{\text{преобр}}$  будут изменяться, а соответственно подвергнется корректировке исследуемый параметр  $P$ .

Описанная методика представлена для удобства в виде алгоритма и изображена на рис. 2.45.



Рис. 2.45. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей

## 2.4. Результаты оптимизации

Полученную методику применим для параметрической оптимизации традиционного преобразователя частоты выполненного по  $m$ -фазной мостовой схеме в качестве примера обобщенной многофазной схемы, и для ДКИН в качестве частного случая полупроводникового преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме. Построим зависимости  $P=f(m, I)$ , и скорректировав их с учетом ввода резерва и температурного

режима проанализируем получившиеся результаты.

Применим методику параметрической оптимизации полупроводникового преобразователя по критерию надежности для  $m$ -фазного ПЧ выполненного по мостовой схеме. В первую очередь необходимо рассчитать коэффициент  $C$  отношения относительной цены к относительному току. Данный расчет был произведен выше при описании методики оптимизации. Для построения данной зависимости необходима каталожная информация фирм производителей полупроводниковых преобразователей. Из полученной зависимости необходимо вычислить величину коэффициента  $C$  и сравнить с единицей. Стоит отметить что при номинальных рабочих токах преобразователя больших 500...600 А, там где коэффициент  $C$  больше 1, наиболее рационально применение предлагаемой методики оптимизации, так как при расчете традиционным методом по наибольшему вероятному ущербу, увеличение надежности путем выбора преобразователя с избыточным запасом мощности будет экономически не эффективно.

Далее, используя коэффициентный метод расчета и учитывая тепловой режим, строим зависимость вероятности безотказной работы преобразователя от количества числа фаз для различных величин токов (рис. 2.46). Стоит отметить, что с ростом мощности полупроводниковых модулей, увеличивается площадь поверхности, от которой отводится тепло в окружающую среду от греющихся элементов. В свою очередь, на мощностях свыше 1 МВт, достаточно часто прибегают к системам жидкостного охлаждения полупроводниковых преобразователей. Перечисленные факторы несколько увеличивают надежность систем большой мощности относительно систем выполненных по той же схеме и с тем же количеством фаз. В этой связи происходит корректировка величин вероятности безотказной работы.

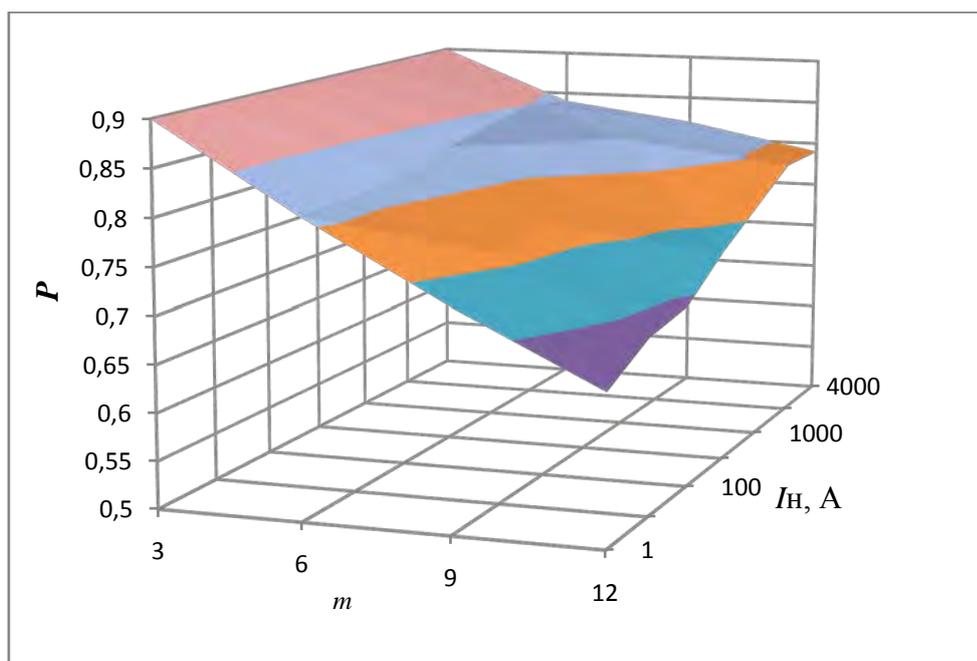


Рис. 2.46. Зависимость  $P=f(m, I, T)$  с учетом температурного режима работы преобразователя

При увеличении количество фаз, оставляя при этом неизменной мощность полупроводникового преобразователя, токи в фазах будут меняться не линейно, а в соответствии с поправочным коэффициентом  $k_{\phi}$ . Другими словами при переходе от трехфазного преобразователя к шестифазному, при сохранении мощности, действующие значения токов будут не в 2 раза меньше, а меньше в  $k_{\phi}$  раз.

На следующем этапе произведем коррекцию, используя формулу расчета надежности с вводом холодного резерва. Результаты скорректированной зависимости приведены на рис. 2.47. В зависимости от количества фаз, кратность резервирования может отличаться. Так, например, для трехфазной системы  $k=1/3$  означает, что резервированию подлежит одна фаза преобразователя, а для 12-и фазного преобразователя  $k=1/3=4/12$  говорит о резервировании 4 фаз проектируемого преобразователя.

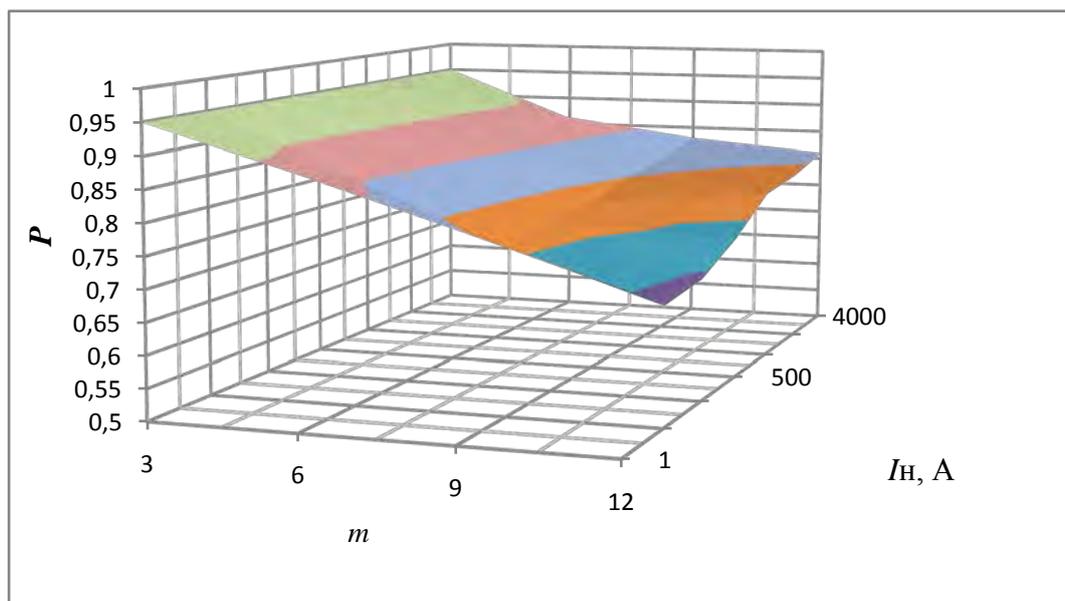


Рис. 2.47. Зависимость  $P=f(m, I, T)$  с учетом ввода резерва

Можно отметить значительное (для 3-х фазных преобразователей при кратности резервирования  $k=1/3$  от базовых 0,9 до 0,95) повышение надежности системы с использованием холодного резерва.

Принимая во внимания требуемую, из условий технического задания, величину вероятности безотказной работы системы, можно сделать вывод о том, удовлетворяет ли заданным требованиям проектируемый преобразователь и каким из способов стоит увеличивать его надежность.

Применим методику параметрической оптимизации полупроводникового преобразователя по критерию надежности для трехфазного ДКИН выполненного по мостовой схеме. Функциональная схема трехфазного ДКИН приведена на рис. 2.48.

ДКИН производятся с относительно большой дискретой по мощности – иными словами мощность двух рядом стоящих в линейке мощностей ДКИНов может отличаться более чем на 30% как это традиционно принято у серийных преобразователей. Соответственно и коэффициент  $C$  – значительно превышает единицу. По этой причине применение предлагаемой методики оптимизации ДКИН по критерию надежности оправдано.

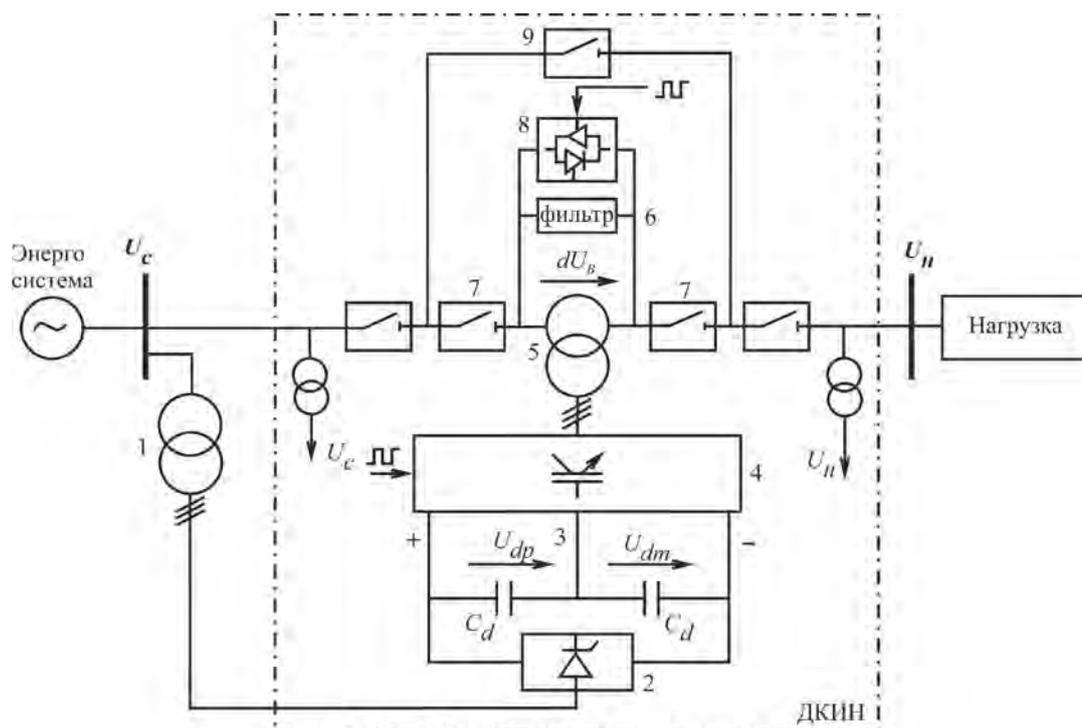


Рис. 2.48. Функциональная схема ДКИН:

1 – вводной трансформатор; 2 – тиристорный управляемый выпрямитель; 3 – аккумулирующие конденсаторы; 4 – управляемый инвертор; 5 – вольтодобавочный трансформатор; 6 – фильтр высших гармоник; 7 – выключатели; 8 – защитное устройство ДКИН; 9 – байпасный выключатель;  $U_c$  – напряжение сети;  $U_n$  – напряжение на нагрузке;  $U_{dp}$  – положительное напряжение постоянного тока;  $U_{dm}$  – отрицательное напряжение постоянного тока;  $dU_B$  – напряжение компенсации провала

Поскольку количество фаз уже заранее определено (исходя из принципа работы, в подавляющем большинстве случаев ДКИН производятся 3-х фазными), кривая зависимости  $P$  от величины токов и температурного режима будет располагаться на плоскости. Любопытными являются зависимости  $P=f(I, T)$  при варьировании кратности резервирования (см. рис. 2.49). Просадка надежности на токах 1000А объясняется предельной величиной токов для включенных не в параллель ключей, что приводит к ухудшению тепловых режимов работы преобразователя. При токах свыше 1000А наблюдается относительный рост надежности в связи с улучшением условий теплоотдачи и работой двух (и более) установленных транзисторных модулей.

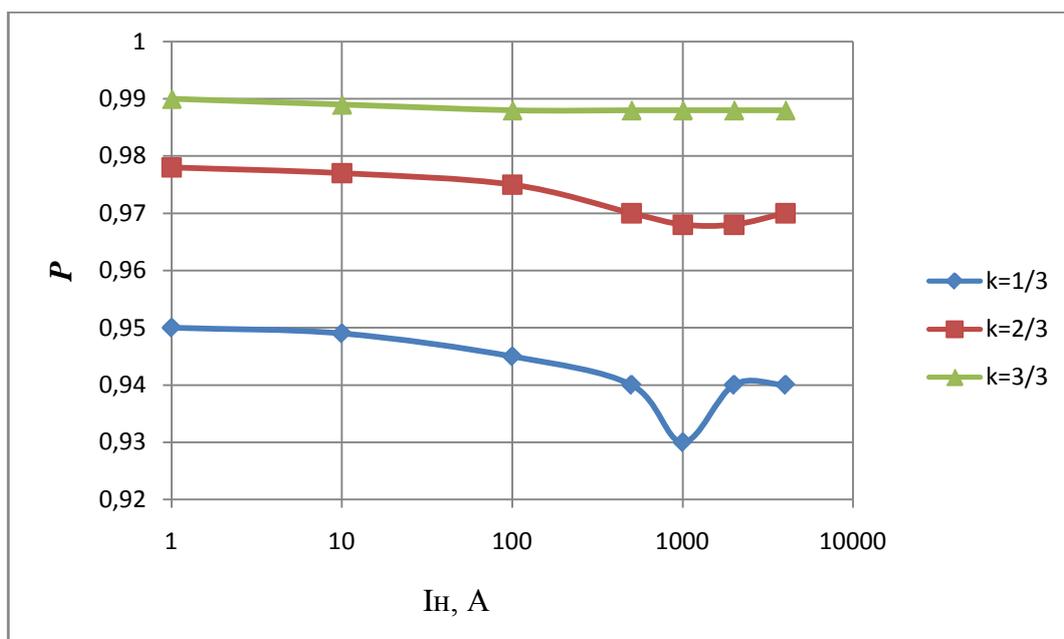


Рис. 2.49. Рис. 2.14. Зависимость  $P=f(I, T)$  с учетом ввода резерва для ДКИН

Кратность резервирования  $k=3/3$  не тождественно  $k=1$ . Дробное значение коэффициента  $k$  означает наличие отдельных резервов на каждую фазу, а целое значение  $k=1$  означает резервирование в случае отказа всего преобразователя, при этом показатели надежности при  $k=1$  окажутся меньшими чем у  $k=3/3$ .

## 2.5. Выводы по главе 2

1. Анализ путей повышения надежности электроприводов эксгаустеров кислородно-конверторного производства, позволил получить зависимости надежностных показателей комплекса “Полупроводниковый преобразователь – двигатель” от запаса мощности основных элементов. При этом повышение надежности достигается не только за счет увеличения габаритной мощности и количества фаз электрического двигателя, но и за счет изменения конфигурации схемы силового преобразователя. Предложен и обоснован критерий сопоставления схемных решений электропривода, учитывающий величину затрат на установленное электрооборудование.

2. Предложена методика оптимизации схем силовых цепей

полупроводниковых преобразователей, содержащая этапы выбора конфигурации схем силовых цепей по критерию минимума полупроводниковых ключей, выбора оптимальных количества фаз и резервных узлов, и отличающаяся принятым критерием – вероятностью безотказной работы. По сравнению с известной методикой синтеза по критерию суммарных годовых затрат разработанная методика позволяет снизить затраты на установленную мощность полупроводникового преобразователя.

## **ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РАБОТАЮЩЕГО В ПУСКО- ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ**

В настоящей работе осуществлялась попытка максимально раскрыть возможности различных вариантов систем электропривода. Для достижения поставленной задачи необходимо реализовать математические модели, векторной системы управления асинхронной машины, синхронного двигателя и импульсно-векторной системы управления СРМНВ и оценить их адекватность. На основе полученных моделей произвести анализ параметров работы системы. Выявить особенности управления, сравнить с уже существующими системами СРМНВ. Решив эту задачу, можно выяснить «сильные» и «слабые» стороны предлагаемых систем электропривода, а также рекомендовать их для определенных режимов работы и конкретных механизмов.

### **3.1. Постановка задачи математического моделирования электроприводов, работающих в пускотормозных режимах**

Процессы пусков и торможений с большой величиной момента на валу – перегрузками, являются тяжелыми режимами работы для полупроводниковых преобразователей. Оценить тяжесть воспринимаемой нагрузки можно по осциллограммам действующих значений токов электропривода. В механизмах, работающих в зонах значительных перегрузок (объекты металлургического производства) во время переходных процессов значительно увеличивается потребляемая электроприводом мощность. Соответственно, при проектировании приходится выбирать двигатели и питающие их преобразователи с существенным запасом по мощности, что в свою очередь приводит к повышению стоимости системы. По этой причине задача точного определения осциллограмм токов в

пускотормозных режимах является актуальной задачей. При анализе надежности системы электропривода необходимо иметь представления об осциллограммах токов в существующих и предлагаемых решениях. Для решения этой задачи воспользуемся обширным математическим аппаратом программного обеспечения и построим математические модели различных типов полупроводниковых преобразователей и электрических двигателей.

### **3.2. Обзор существующих математических моделей**

Большинство функциональных и структурных схем современных общепромышленных электроприводов на сегодняшний день. По этой причине, проектирование систем управления электроприводом сводится к настройке и подбору параметров регуляторов, требуемых для достижения наилучших динамических показателей работы электропривода. Однако, все большую популярность получают новые нетрадиционные типы электроприводов и систем управления, например векторно-импульсные системы управления асинхронных и синхронных электроприводов, рассмотренные в работах Баскова С.Н., Лицина К.В., а также системы электроприводов на базе СРМНВ, подробно описанные Усыниным Ю.С., Григорьевым М.А., Горожанкиным А.Н. Для описания структур подобных систем требуется совершенствование расчетных методик динамических процессов, протекающих в них. Большую работу по математическому описанию типовых и нетрадиционных систем электроприводов провели Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Козярук А.Е., Сарваров А.С., Григорьев М.А., Белоусов Е.В.

В работах [27, 55, 56, 87,88] показано, что для математического описания различных типов электрических машин, работающих в режимах перегрузки, требуется учитывать распределения магнитных полей вдоль всего магнитопровода электромеханического преобразователя. Учет характера распределения линий магнитной индукции в электродвигателях

является обязательным не только в зоне критических моментов, но и в номинальных режимах работы. В связи с этим, необходимо вести учет распределенного характера параметров электродвигателя. Для этого на первом этапе моделирования, весь магнитопровод электромеханического преобразователя разбивают на множество отдельных участков (количество элементарных участков зависит от требуемой точности исследования). На следующем этапе для каждого участка составляют систему дифференциальных уравнений электромагнитного поля в машине, основываясь на уравнениях Максвелла.

Полученную систему дифференциальных уравнений с распределенными параметрами можно решить с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и с помощью метода конечных разностей (МКР)[89,92]. Используя метод конечных разностей, можно столкнуться со сложностями учета граничных условий при пересечении магнитным потоком зоны с различной магнитной проводимостью, а именно, в зоне перехода от зубцов магнитопровода к воздушному зазору и обратно [55,89]. Используя программы с МКЭ, появляется возможность обойти эти трудности. Необходимо разбить этот участок магнитопровода на более мелкие элементы (соответственно, их число возрастет относительно количества элементов на участках с одинаковой магнитной проводимостью). По этой причине выбор программных пакетов для создания модели магнитной системы исследуемого электропривода производился из продуктов, использующих при расчете систем дифференциальных уравнений МКЭ.

Помимо наличия возможности рассчитывать дифференциальные уравнения модели электромеханического преобразователя методом конечных элементов, к программной среде предъявлялись следующие требования:

– наличие возможности расчета электромагнитного момента двигателя методом тензора напряжений Максвелла [55, 88, 89,92]. Привлекательной особенностью этого метода является отсутствие необходимости в

перестроении сетки конечных элементов всей модели при повороте вала двигателя. Перед началом расчета необходимо вручную разбить воздушный зазор на три участка таким образом, чтобы крайние прилегали к статору и ротору машины, а третий участок включал в себя только воздух. При использовании метода тензора напряжения Максвелла, после поворота ротора на определенный угол, конечно-элементная сетка будет заново сгенерирована только для среднего участка воздушного зазора, что значительно ускоряет расчет и упрощает процесс моделирования;

– наличие программных модулей, обеспечивающих оптимизацию расчетов на этапе создания конечно-элементной сетки. Критерием оптимизации расчетов электромагнитного момента является отклонение электромагнитного момента, вычисляемого в 2-D моделях методом тензора напряжения Максвелла относительно оси  $z$ :

$$M = \{z\} \cdot \frac{1}{\mu_0} \int_s \{r\} \times [(\dot{n} \cdot \{B\})\{B\} - \frac{1}{2}(\{B\} \cdot \{B\})\dot{n}] ds,$$

где  $\{B\}$  – магнитная индукция;

$\{z\}$  – единичный вектор вдоль оси  $z$ ;

$\{r\}$  – радиус-вектор в декартовой системе координат;

$\dot{n}$  – нормаль к поверхности.

Этот интеграл берется по поверхности ротора исследуемой машины. Таким образом, для повышения точности расчетов необходимо максимально точное разбиение воздушного зазора. Для представленной модели точность разбиения воздушного зазора десятикратно превышала точность разбиения остальных элементов модели двигателя. На рис. 3.1 показана конечно-элементная сетка для расчета двумерной модели СРМНВ. На рисунке отчетливо видно, что количество конечных элементов внутри воздушного зазора значительно превышает количество конечных элементов на таком же по площади участке ротора. Используя метод тензора напряжения Максвелла для расчета, необходимо отметить ряд принимаемых допущений:

– считаем, что статорные обмотки машины идеально укладываются в пазы с учетом коэффициента заполнения;

– рассчитывая 2-D модель электромеханического преобразователя не учитываются краевые эффекты, поля рассеивания могут быть учтены только в радиусе 0,5 м от внешней границы статора;

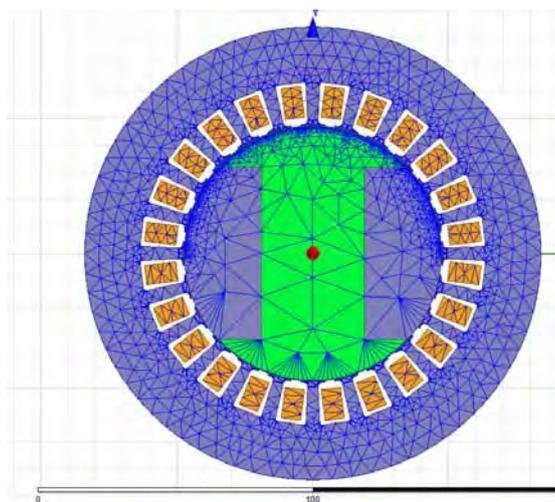


Рис. 3.1. 2-D модель СРМНВ с нанесенной конечно-элементной сеткой

– не учитываются изменения электромагнитных свойств материалов при нагреве электрической машины в процессе работы.

В настоящее время существует несколько программных пакетов, позволяющих вести расчет модели электромагнитной системы методом конечных

элементов (*MATLAB*, *FEMLAB*, *ANSYS*, *ELCUT*, и др.). Эти программные продукты уже имеют в своей структуре алгоритмы расчета модели. Пользователю необходимо задать геометрию исследуемого объекта (в нашем случае электрической машины), выбрать граничные условия, задать свойства используемых материалов, создать сетку конечных элементов [55, 88, 89, 92, 84]. Как уже отмечалось выше, при создании сетки необходимо определить требуемую точность расчетов. Исходя из этого, следует выбрать вид и количество конечных элементов. При этом стоит помнить, что с ростом точности расчетов (увеличением количества элементов сетки), будет увеличиваться и время расчетов. Предельная точность может ограничиваться как заданным пределом количества элементов сетки в программе, так и производительностью используемого компьютера. Повысить скорость расчета можно либо уменьшив количество конечных элементов (до

приемлемого по требованиям точности), либо распараллелив расчет на несколько вычислительных машин, либо рассчитывать половину симметричной электрической машины (см. рис. 3.2), если такая возможность предусмотрена программным продуктом.

Решая задачу создания модели новой системы управления для нетрадиционного типа электрической машины, важно учитывать не только функции состояния самого электромеханического преобразователя, но и иметь возможность задавать управляющие воздействия (систему токов, напряжений, момента сопротивления, угла поворота и прочее).

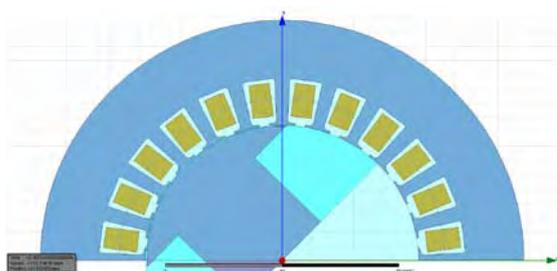


Рис. 3.2. Половина модели СРМНВ для плоскопараллельной постановки задачи в программном продукте *Maxwell*

напряжений, момента сопротивления, угла поворота и прочее). Опираясь на этот факт, для расчета всей системы электропривода нами были выбраны программные продукты компании ANSYS, а именно: программа *Maxwell*, позволяющая рассчитывать электромеханический

преобразователь, и программа *Simplorer*, служащая для создания модели ИВСУ. Связка программ *Maxwell-Simplorer* отвечает все приведенным выше критериям отбора программных продуктов для создания модели электропривода.

Исследуемая в работе модель СРМНВ, реализованная в программе *Maxwell*, представлена на рис. 3.3.

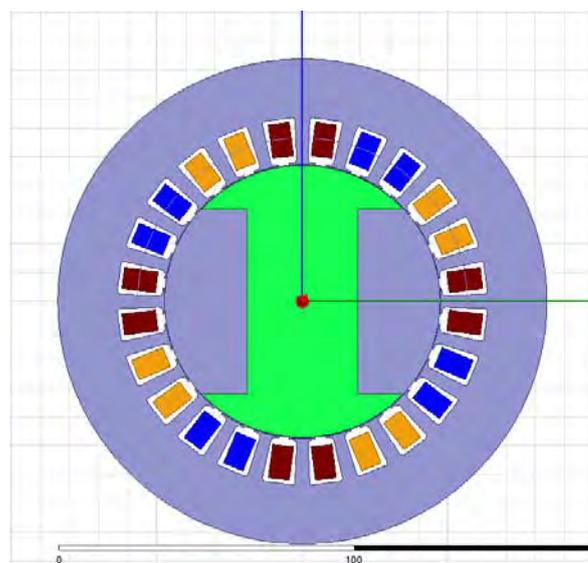


Рис. 3.3. Внешний вид модели СРМНВ на плоскости в программном продукте *Maxwell*

### 3.3. Принятые допущения

Как правило, при математическом описании систем электропривода принимают ряд допущений.

1) Электромеханический преобразователь представляют в виде системы с сосредоточенными параметрами, а при разработке математической модели большее внимание уделяют электрическому преобразователю и системе управления. В ситуации, когда осуществляется математическое описание нового нетрадиционного типа электрической машины (в нашем случае это синхронная реактивная машина с независимым возбуждением), появляется необходимость учета характера распределения линий магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Таким образом, существующие математические модели электропривода не позволяют в полной мере оценить предельные возможности электротехнического комплекса. При учете распределенного характера параметров системы происходит значительное увеличение математического аппарата расчета, что приводит к существенному усложнению математического описания объекта.

2) Полупроводниковый преобразователь представляет из себя идеальный электрический преобразователь в котором полностью скомпенсированы падения напряжений на полупроводниковых элементах, как в прямом, так и в обратном направлениях.

3) В работах Сарапулова Ф.Н. показано, что при вычислении электромагнитного момента модели двигателя с помощью метода конечных элементов учет влияния индукционных токов необязателен, и им можно пренебрегать.

4) Не учитывается изменение электрических и магнитных свойств материалов при нагреве машины в процессе работы.

5) При расчете модели электрической машины в плоскопараллельной постановке задачи не учитываются краевые эффекты.

### 3.4. Синтез математической модели

Разрабатываемая математическая модель в своем составе имеет следующие элементы: механический преобразователь многофазный полупроводниковый преобразователь, узел формирования фазных токов.

Система управления в модели синхронного электропривода была выполнена по подчиненной схеме. Электромеханический преобразователь – синхронная машина с возбуждением от источника постоянного напряжения Узел формирования фазных токов электромеханического преобразователя вместе с отрицательной обратной связью по току статора образуют контур регулирования электромагнитного момента. Система работает как многоконтурная структура управления с внешним контуром регулирования скорости, настраиваемым регулятором РС. Блоком ограничения (БО) производилось регулирование максимального значения статорных токов. Контур регулирования фазных токов включали полупроводниковый преобразователь и статорную цепь двигателя. Математические модели для узла формирования фазных токов, системы управления и модели электромеханического преобразователя более подробно описаны в следующей главе.

#### **Электрические машины с постоянными магнитами**

На первом этапе разработки модели производились исследования машин с постоянными магнитами. Необходимо было уточнить работу модулей программы *Maxwell*, научиться наносить конечноэлементную сетку на геометрию магнитопровода и токопроводящих элементов, правильно разбивать воздушный зазор. Ставилась задача выяснить принятые в программном продукте условно положительные направления токов в обмотках, направление магнитного потока, положительное направление электромагнитного момента, положительное направление скорости, соответствие начала и конца обмоток модели в *Maxwell* с началом и концом

обмоток интегрированной модели машины в программе *Simplorer* и прочее. Для простоты моделирования была создана модель электрической машины с постоянными магнитами у которой отсутствует необходимости в питании роторной обмотки, что в значительное мере упрощает процесс синтеза и отладки модели. На этом образце были опробованы программные средства, изучены статические и переходные режимы работы двигателя. Была создана простейшая система управления двигателем. Изменениям подвергалась конструкция самой машины: габаритные размеры машины, отношение диаметров статора и ротора, количество полюсов, количество пазов статора, количество фаз двигателя, момент инерции и т.д.

На рис. 3.4 представлена 2-D модель двигателя с установленными на роторе постоянными магнитами. Силовыми линиями показаны вектора магнитной индукции. Показано также направление магнитного потока вдоль всего магнитопровода.

На рис. 3.5 показаны вектора тока, протекающего в одной из фаз обмоток машины. Плотность сосредоточения и длина этих векторов отражают величину плотности тока, а направление вектора – направление протекания тока в обмотке.

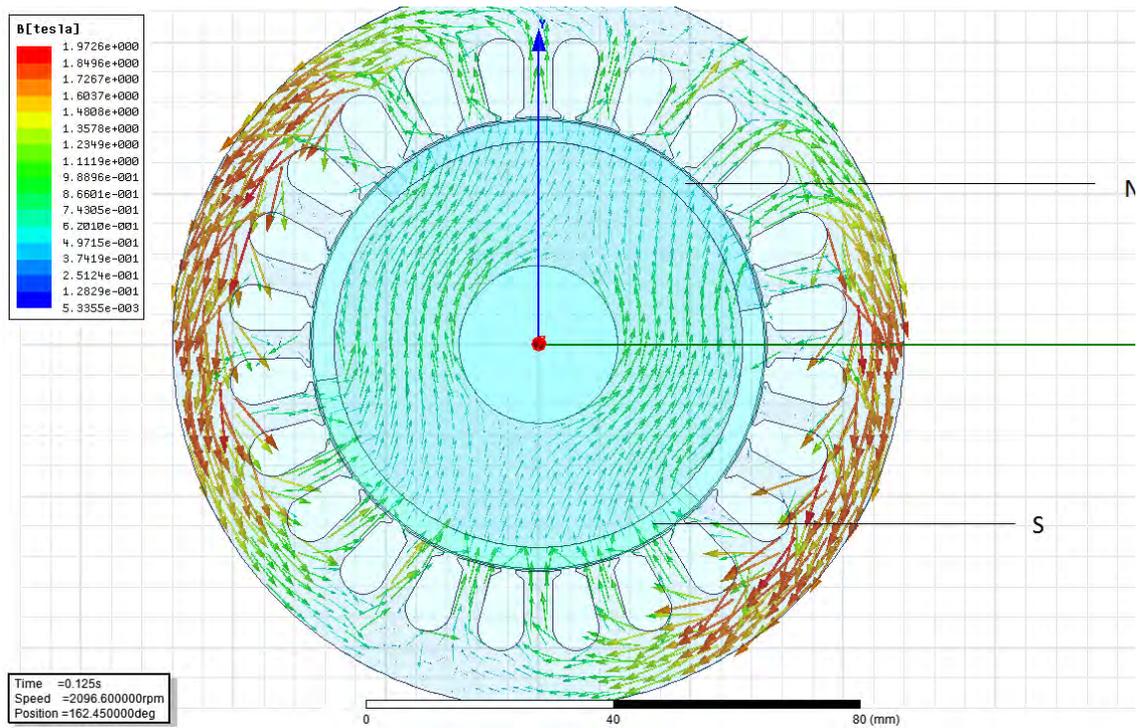


Рис. 3.4. Линии магнитной индукции в магнитопроводе электрической машины с постоянными магнитами.

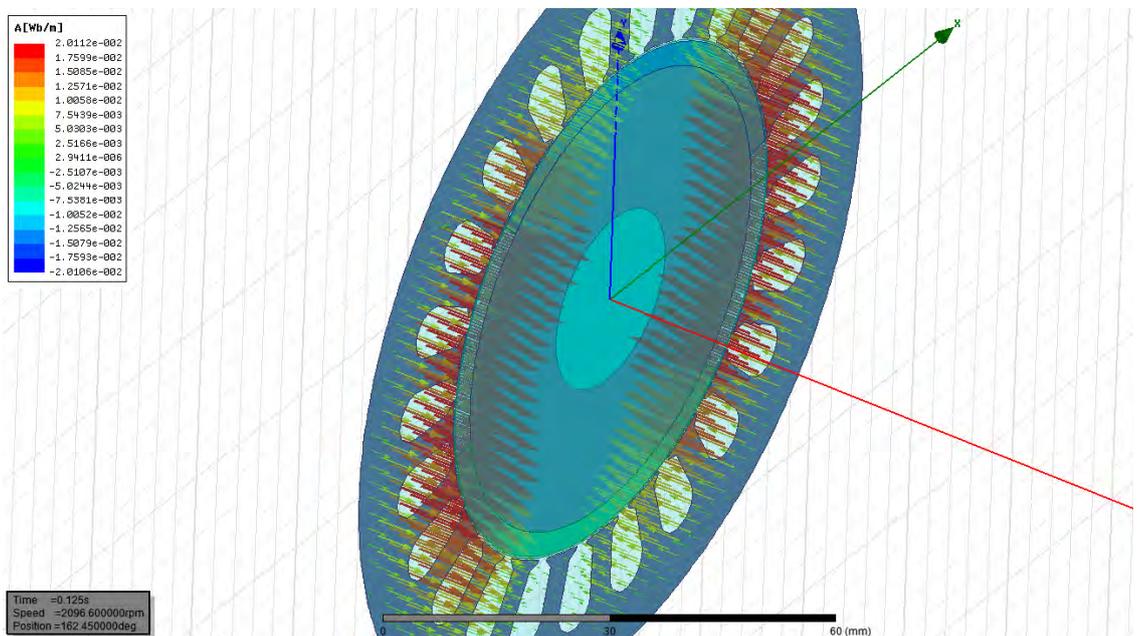


Рис. 3.5. Вектора плотности тока.

### 3.5. Оценка адекватности разработанной математической модели

Для оценки адекватности разработанной математической модели синхронного двигателя были сопоставлены зависимости токов статора реальной синхронной машины ДСПУ-140/84-4-УХЛ4 и зависимости полученные на модели. Натурный эксперимент производился на предприятии ОАО «Мечел» в кислородно-конверторном цехе на электроприводе эксгаустера. Величина тока регулировалась при помощи задатчика интенсивности. Исследования проводились для различных значений величины момента нагрузки, а зависимости построены для различных значений скорости. По результатам экспериментов были построены поверхности, отражающие зависимости  $I=f(M, \omega)$  для реального и смоделированного двигателей (рис. 3.6).

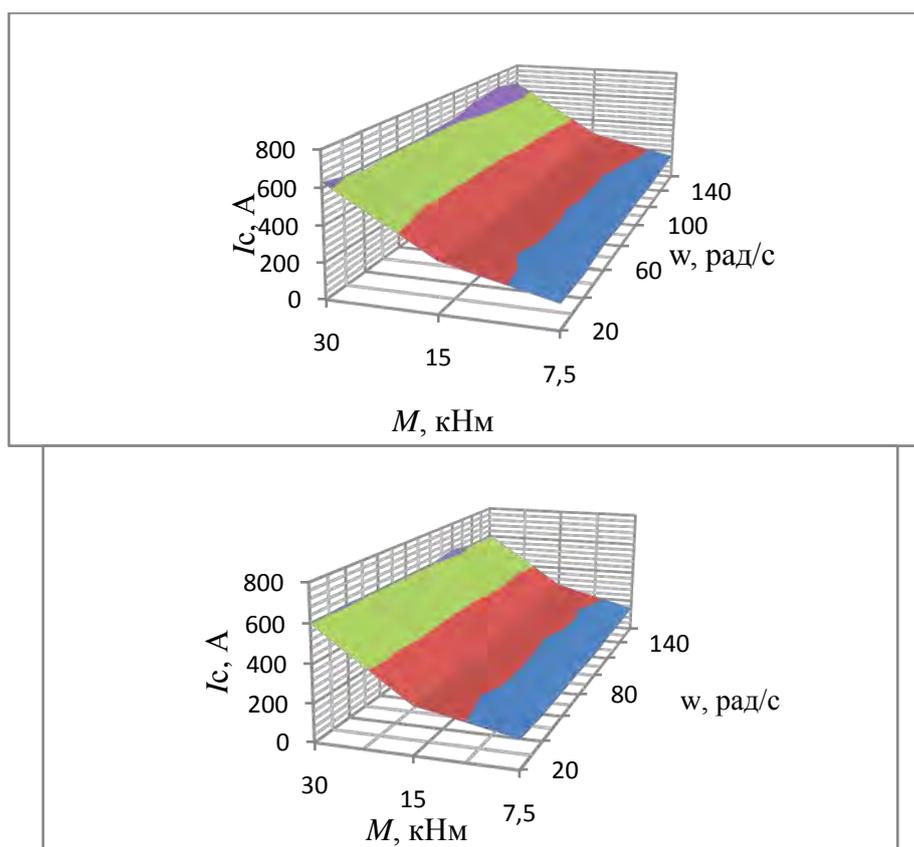


Рис. 3.6. Экспериментальные зависимости  $I=f(M, \omega)$  полученные:  
а) на реальном объекте; б) на математической модели

Результаты моделирования сопоставлялись с данными полученными в ходе эксперимента. Для исключения влияния случайных факторов, была произведена статистическая обработка результатов сопоставления предложенной математической модели и реальных осциллограмм токов. Для увеличения скорости оценки и экономии трудозатрат, объем выборки был ограничен 10 позициями. Так как этот объем не превышает 30 единиц, то для анализа было применено распределение Стьюдента.

Сопоставление проводилось для участков пуска электропривода эксгаустера кислородного конвертора, так как именно этот режим является наиболее тяжелым для привода. Для корректного сопоставления в разработанной модели электромеханический преобразователь был представлен трехфазной синхронной машиной с обмоткой возбуждения на роторе. Оценка проводилась в два этапа.

Сопоставление производилось в два этапа. Используя выборку из 10 экспериментальных осциллограмм тока электропривода эксгаустера, полученных на работающем объекте, была построена регрессионная зависимость, описывающая переходный процесс тока на участке торможения:

$$\bar{I} = -358,22 \cdot t^3 + 682,34 \cdot t^2 - 279,68 \cdot t + 34,95.$$

На втором этапе сопоставления результаты математического моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными на регрессионной зависимости. Результаты сопоставления приведены в табл. 3.1, где  $I_{\text{расч}}$  – расчетное значение тока, полученное в ходе моделирования;  $I_{\text{эксп}}$  – экспериментальное значение тока, полученное из регрессионной зависимости;  $\Delta I, \Delta I^2$  – разность и квадрат разности между экспериментальными и расчетными значениями токов соответственно;  $t$  – квантиль Стьюдента;  $s_{\Delta I}$  – стандартное отклонение расчетных значений;  $\mu_{\Delta I}$  – математическое ожидание значений  $\Delta I$ .

Как показали результаты расчета по предложенной математической

модели, коэффициент  $t$  распределения Стьюдента оказался равным 0,54 что значительно меньше критического 1,813.

Таблица 3.1

Результаты сопоставления и статистической обработки расчетных и экспериментальных данных

$t, c$	$I_{расч}$	$I_{эксп}$	$\Delta I$	$\Delta I^2$
0	0	0	0,0	0,0
1	280	282,5	2,5	6,25
2	281	282	1	1
...	...	...	...	...
5,1	275,5	281	5,5	30,25
$s_d = \sqrt{\frac{\sum \Delta I^2 - \frac{(\sum \Delta I)^2}{N}}{N - 1}}$	0,39			
$t = \frac{\bar{\Delta I} - \mu_{\Delta I}}{\frac{s_{\Delta I}}{\sqrt{N}}}$	0,54			
$t_{крит}$	1,813			

### 3.6 Выводы по главе 3

1. Предложена математическая модель электропривода с импульсно-векторной системой управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением. Рассмотрены результаты математического моделирования синхронного реактивного электропривода с импульсно-векторным управлением: установлена зависимость удельных показателей электропривода от количества фаз, геометрии магнитопровода.

2. Адекватность математической модели проверялась путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных для статического участка работы электропривода эксгаустера, а также производилась статистическая оценка расхождений данных, полученных из осциллограмм

переходных процессов пуска, снятых на моделях и при проведении натурального эксперимента.

3. Предложена математическая модель синхронных электроприводов, в которой параметры электрической машины представлены распределенными, полупроводниковый преобразователь – безынерционным звеном, и отличающаяся тем, что узел формирования фазных токов реализовывал пуско-тормозные режимы, что позволило уточнить осциллограмму тока при реализации интенсивных процессов пуска технологических объектов.

## ГЛАВА 4. ПРИМЕР ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

### 4.1. Анализ основных причин отказов электрических машин

Используя коэффициентный метод определения надежности, описанный выше, может быть построена статистическая зависимость поправочного коэффициента от коэффициента нагрузки двигателя (см. рис. 4.1.)

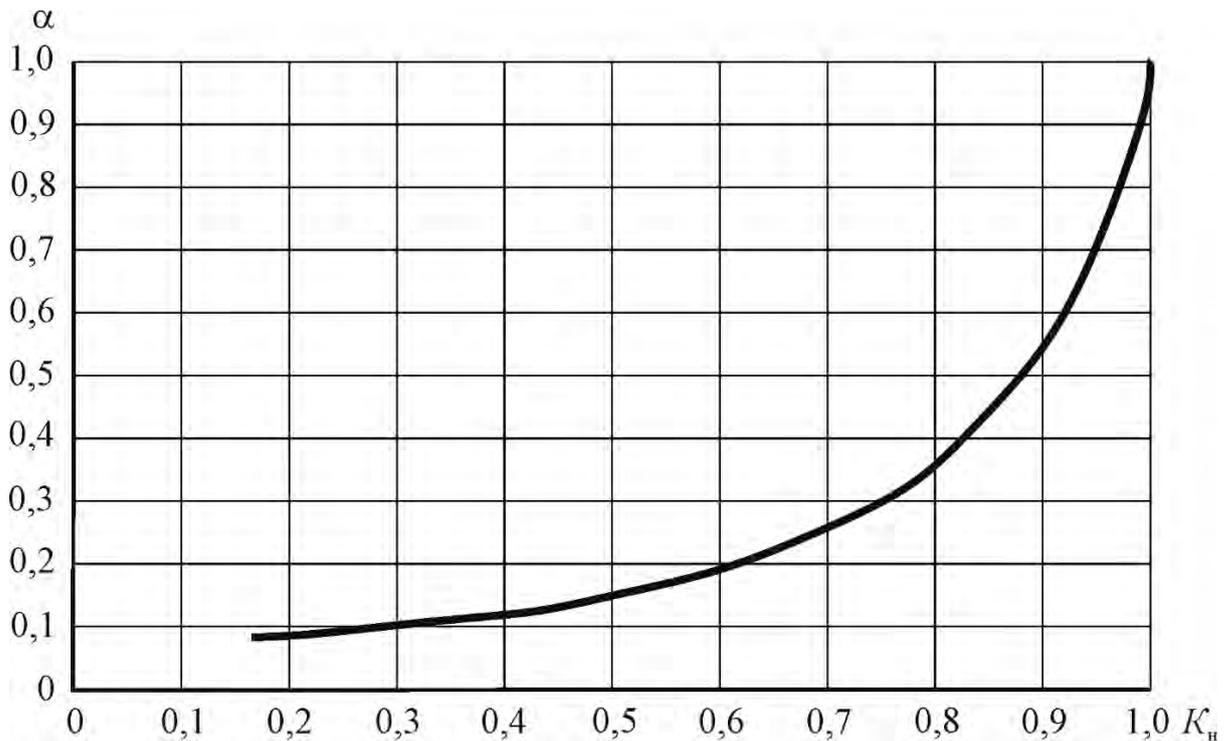


Рис. 4.1. Зависимость поправочного коэффициента  $\alpha$  от коэффициента нагрузки

Ниже приведен результат расчета (см. рис. 4.2.) вероятности безотказной работы от коэффициента нагрузки. Таким образом, фактически получена зависимость надежности электрической машины от запаса по мощности. Начальное значение вероятности безотказной работы на графике равно 0,9, что соответствует заявленной надежности асинхронных двигателей в [21, 20]. Расчет производился для двигателей серии АИР в диапазоне мощностей от 75 до 200 кВт.

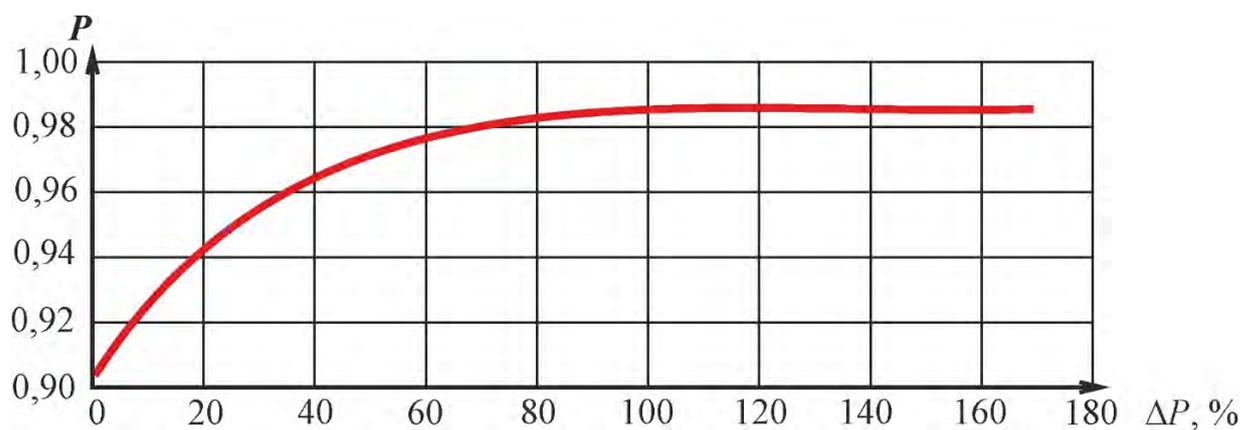


Рис.4.2. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  электрической машины от запаса по мощности  $\Delta P$  в процентах, в диапазоне мощностей от 75 кВт до 200 кВт

В работе М.А. Левина [50] рассматривается повышение эффективности использования сельскохозяйственных электроприводов за счет оптимизации запаса мощности асинхронных двигателей. Анализ проектирования систем электроприводов свидетельствует о том, что выбор мощности асинхронных двигателей обычно осуществляется по допустимому нагреву для стандартных режимов работ. При этом не учитывается интенсивность аварийных ситуаций, ответственность электропривода по размеру технологического ущерба при отказе АД и прочие факторы. М.А. Левиным предложена теория индивидуального согласования электропривода с конкретной рабочей машиной. Первостепенное значение в этой теории имеет выбор запаса мощности АД.

М.А. Левин разработал методику выбора оптимального запаса мощности АД по критерию суммарных годовых затрат. Установлено, что наибольшее влияние на запас мощности оказывает интенсивность аварийных ситуаций и ответственность электропривода по технологическому ущербу при отказе АД. Автор учел дискретность шкалы мощностей АД и разработал рекомендации по выбору запаса мощности. При величине относительного ущерба  $y < 2$  достаточно иметь запас в пределах выбранной ступени мощности; при  $2 < y < 8$  необходим запас на одну ступень; при  $y > 8$  – запас на две ступени, где  $y$  – ответственность по технологическому ущербу:

$$y = \frac{Y}{Z_p}$$

где  $Y$  – размер ущерба,  $Z_p$  – затраты на капитальный ремонт.

Таким образом, автор учитывал влияние запаса мощности на величину экономического ущерба, образующегося при отказе двигателя, что не совсем справедливо для установок, отказ в работе которых может причинить вред здоровью или даже гибели людей.

Основываясь на коэффициентном методе расчета вероятности безотказной работы и используя данные о мощности и стоимости двигателей различных серий и производителей из различных каталогов [59], был произведен расчет вероятности безотказной работы электрических машин и получены следующие зависимости (см. рис. 4.3 – рис. 4.5.).

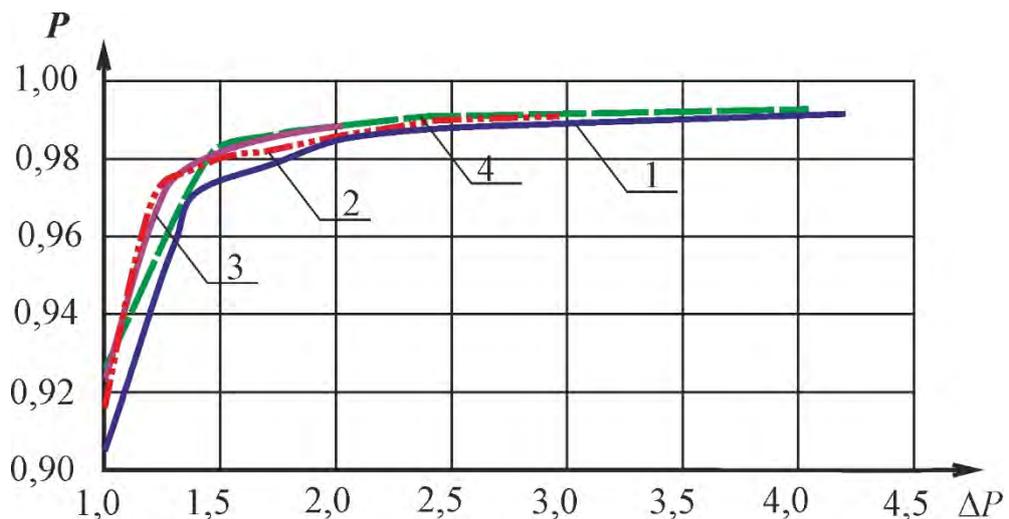


Рис. 4.3. Вероятность безотказной работы  $P$  двигателей от запаса мощности  $\Delta P$  с учетом диапазона мощности; 1 – 0,18-1,1кВт; 2 – 45-132кВт; 3 – 1000-2000кВт; 4 – 2000-8000кВт

На рис. 4.5. представлена зависимость относительной стоимости двигателей от надежности в разных диапазонах мощностей. Характер зависимости практически совпадает с рис 2.1, на котором приведены капитальные затраты в функции надежности системы металлургического производства. Из представленного рисунка видно, что для увеличения надежности двигателей малых мощностей требуется затратить меньшие

средства, чем средства для достижения такой же надежности у двигателей больших мощностей.

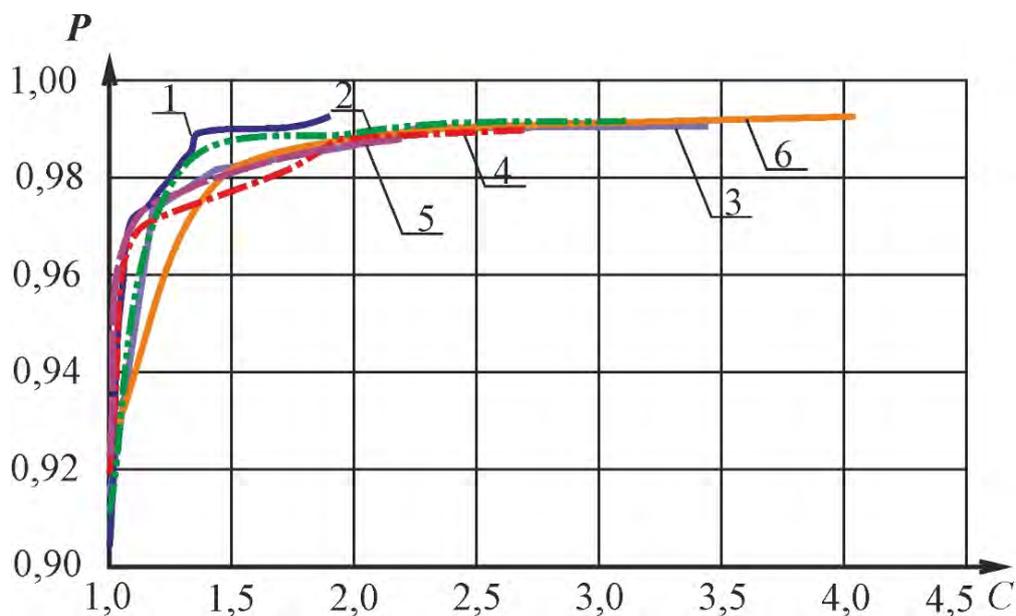


Рис. 4.4. Вероятность безотказной работы  $P$  двигателей от относительной стоимости  $C$  учитывая диапазон мощностей; 1 - 0,18-1,1кВт; 2 - 1,5-7,5кВт; 3 - 45-132кВт; 4 - 160-400кВт; 5 - 1000-2000кВт; 6 - 2000-8000кВт.

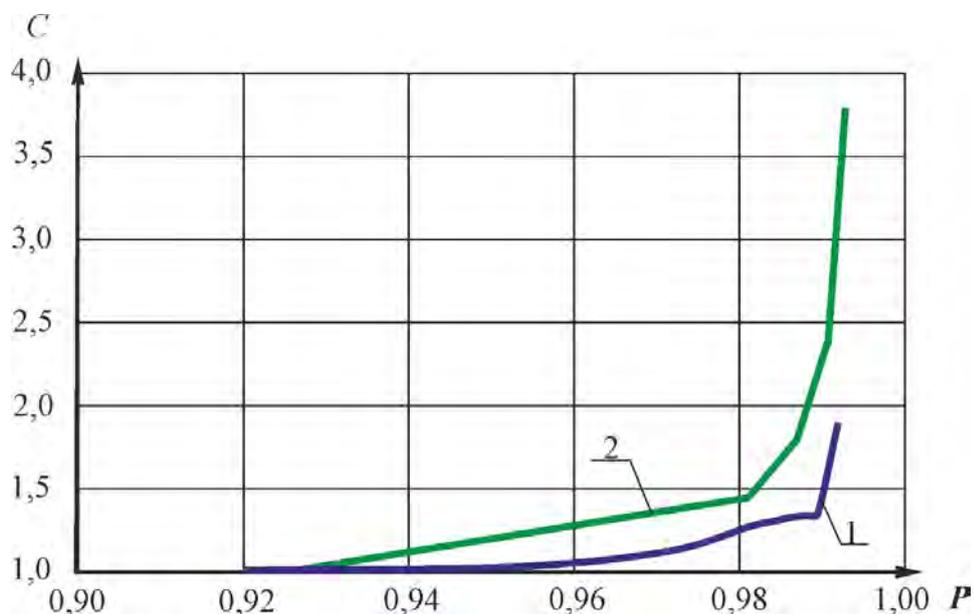


Рис. 4.5. Зависимость относительных затрат  $C$  на электромеханический преобразователь от вероятности его безотказной работы  $P$  для диапазона мощностей: 1 - (0,18- 1,1) кВт; 2 - (1 000 до 2 000) кВт

Кривая 1 (малые мощности) проходит ниже зависимости 2 (рис. 4.5). Это обусловлено тем, что в электрических машинах крупных мощностей

закладывается больше активных материалов. Рассмотренные кривые (1 и 2) построены для случая  $m = 3$ . При числе фаз  $m > 3$  характер новых зависимостей будет совпадать с соответствующими кривыми 1 и 2 (рис. 4.5), однако значения вероятности безотказной работы будут другими, так как с увеличением количества фаз надежность электрической машины повышается.

За базовое значение цены принималась стоимость электродвигателя номинальной мощности, рассчитанной по условию допустимого нагрева, при этом вероятность безотказной работы электрической машины по условиям проектирования равна 0,9.

Для того чтобы лучше понять причину различий в затрачиваемых на создание двигателей средствах, необходимо уяснить основные отличия в конструкции и технологии изготовления машин малой, средней и большой мощности.

**КПД и нагрев двигателей.** Машины большой мощности (от 1 МВт и более) зачастую «именные», т.е. не являются общепромышленными, а делаются на заказ специально под конкретный механизм заказчика. В связи с этим надежность таких машин несколько выше. Нами были собраны и обработаны данные по двухполюсным асинхронным двигателям, и построены зависимости КПД этих машин от величины мощности.

На рис. 4.6 и 4.7 приведена зависимость КПД двухполюсных асинхронных двигателей от мощности [90]. Из представленных зависимостей видно, что КПД машин возрастает с увеличением мощности, однако на больших мощностях (единицы МВт), увеличения КПД с ростом мощности не наблюдается.

Понятие КПД двигателя неразрывно связано с потерями энергии, образующимися в процессе работы. Потери электрической энергии при увеличении токов, протекающих по обмоткам машины, также возрастают.

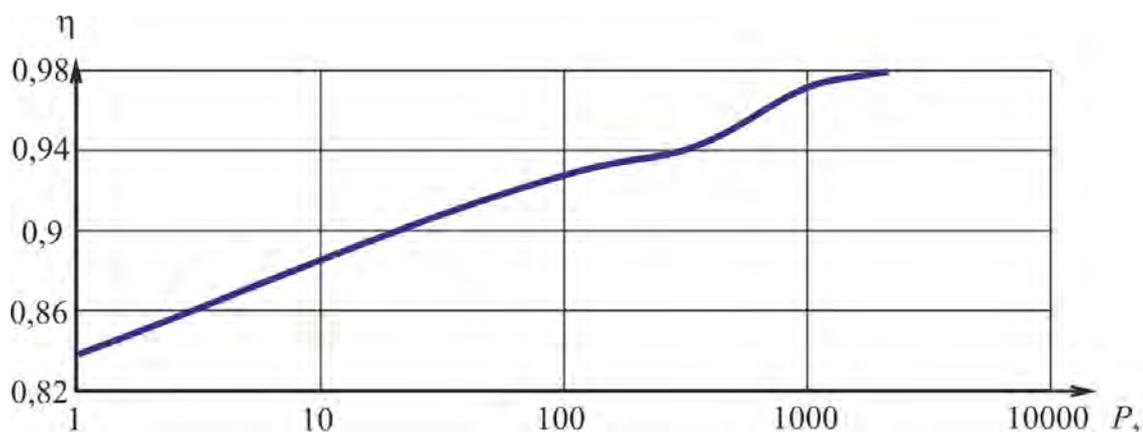


Рис. 4.6. Зависимость КПД двухполюсных асинхронных двигателей от мощности в логарифмическом масштабе

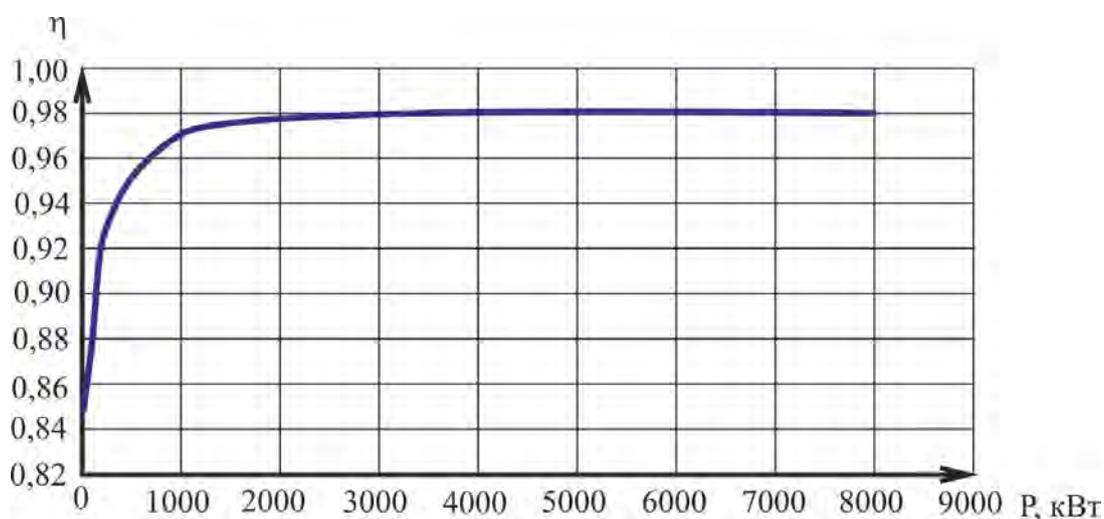


Рис. 4.7. Зависимость КПД двухполюсных асинхронных двигателей от мощности

Машины больших мощностей проектируют и изготавливают на меньшие температуры перегрева и, соответственно, меньше потери. По этой причине, а также потому, что обмотку мощных машин укладывают более тщательно, мощные машины являются более надежными. Стоит отметить, что тепловые потери находятся в квадратичной зависимости от протекающего тока, и выделяются по всему объему, а условия охлаждения (отвода тепла) пропорциональны второй степени линейных размеров машины (зависят от площади охлаждающей поверхности).

Кривая перегрева (рис. 4.8) показывает, как с ростом нагрузки машины (увеличение  $K_H$ ) возрастает температура двигателя. Эта зависимость имеет

квадратичный характер. Нагрузки выше номинальной приводят к значительным перегревам машины. Зависимость вероятности безотказной работы от температуры воздуха внутри двигателя мощностью 15 кВт представлена на рис. 4.9. Данная зависимость получена с применением методики расчета нагрева машин Копылова И.П. [77] и коэффициентного метода расчета надежности.

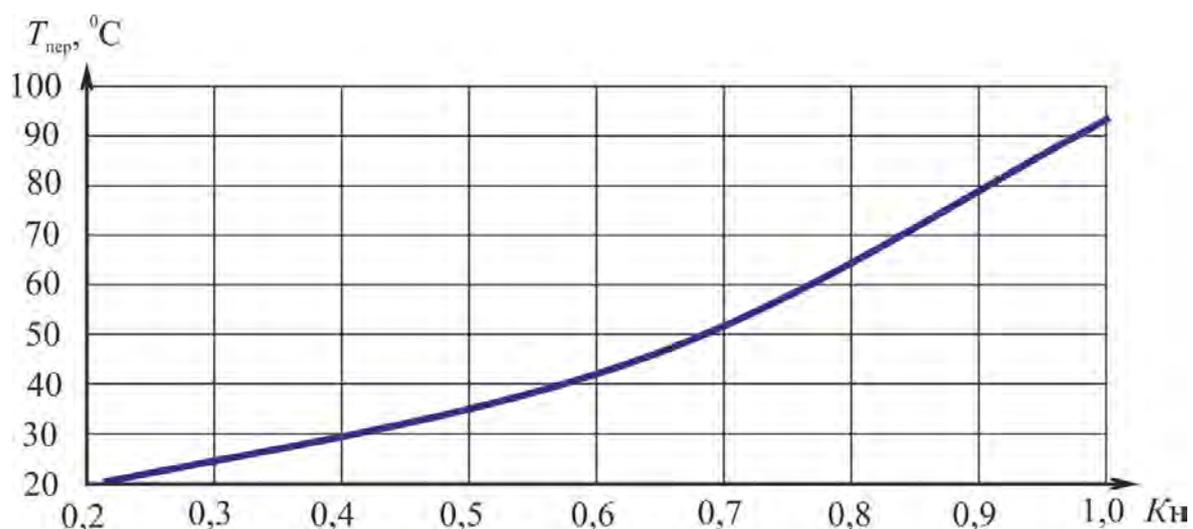


Рис. 4.8. Зависимость нагрева двигателя номинальной мощностью  $P_H=15$ кВт от коэффициента нагрузки  $K_H$

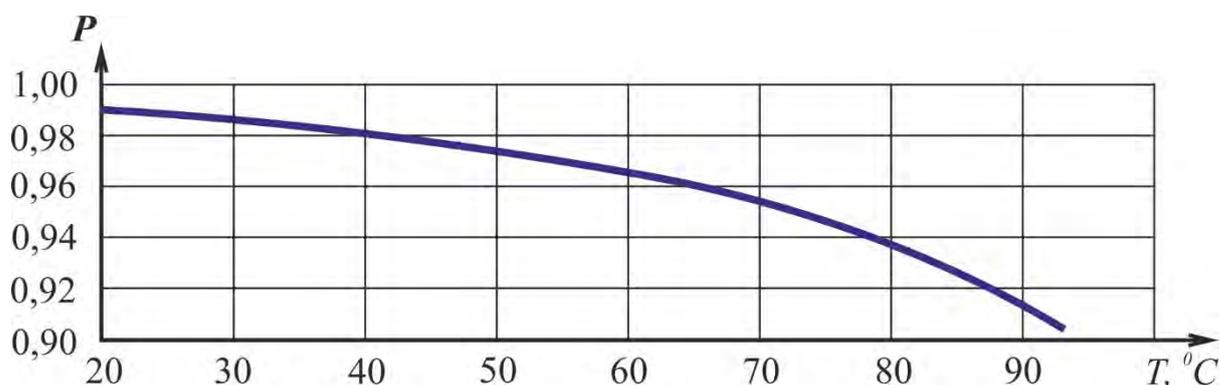


Рис. 4.9. Зависимость вероятности безотказной работы двигателя  $P$  от температуры воздуха внутри двигателя  $T$ .

Был произведен расчет асинхронных двигателей на перегрев в диапазоне мощностей от 15 кВт до 8 МВт (рис. 4.10).

**Особенности получения зависимости перегрева двигателя в**

номинальной точке от мощности в соответствии с методикой [53]. Для расчета перегрева АД были взяты усредненные коэффициенты теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции в пазовой и лобовой частях обмоток. Определено превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя (потери, отводимые в воздух внутри машины на единицу поверхности (площади)). Определен перепад температур в изоляции в пазовой части обмотки статора (потери на единице внутренней поверхности паза на количество пазов). Определен перепад температур наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины (потери, отводимые в лобовых частях, длина лобовых частей на количество пазов дважды). Определено среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины. Итогом расчета явилось превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды (рис. 4.10).

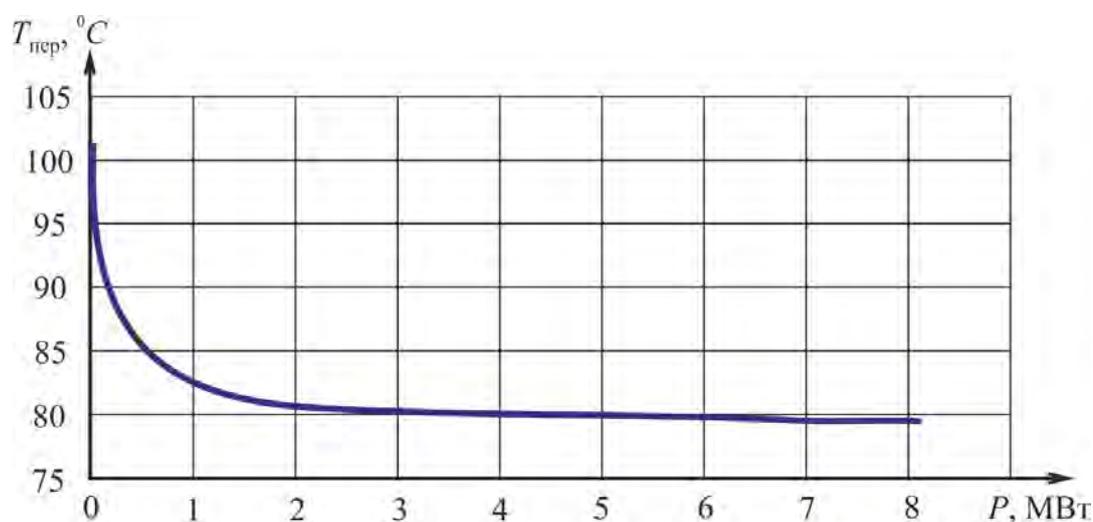


Рис. 4.10. Зависимость температуры перегрева двигателей  $T_{пер}$  в номинальной точке работы от мощности двигателя  $P$ .

## 4.2. Методика синтеза схем силовых цепей электроприводов

Для оценки удорожания двигателя при переходе к следующему габариту на одну ступень в диапазоне мощностей 1:110 кВт был произведен статистический анализ увеличения капитальных затрат  $\Delta C$  относительно начальной стоимости  $C_n$ . Оценка производилась следующим образом. Были рассмотрены «линейки» мощностей различных серий и типоразмеров асинхронных двигателей с различным количеством пар полюсов: *7AVERIE1*, *7AVERIE2*, АИР, АМН, 5АМХ. Была построена регрессионная зависимость относительного увеличения цены от мощности двигателя  $q_1 = f(P)$  (см. рис. 4.11). Оценка точности результатов статистического расчета проводилась по критерию Стьюдента [36,37]. При этом для степени свободы  $f = n - 1 = 17$  критический односторонний квантиль Стьюдента равен  $t_k = 2,1$  (вероятность 95%). В качестве ожидаемой величины выбиралось относительное увеличение цены  $q_1$ . Разность наблюдаемого и ожидаемого значений  $d$  и её квадрат  $d^2$  использовались при вычислении стандартного отклонения  $s_d$  и квантиля Стьюдента (табл. 4.1).

Из представленной зависимости видно, что повышение стоимости двигателя при переходе к следующему габариту во всем рассмотренном диапазоне мощностей для всех рассмотренных типов двигателей находится в пределах 20-25% и лишь на малых мощностях (1-10 кВт) превышает эти значения. На основе анализа статистических данных сделан вывод о том, что переход к следующему габариту двигателя приводит к увеличению стоимости на 20-25% (см. рис. 4.11).

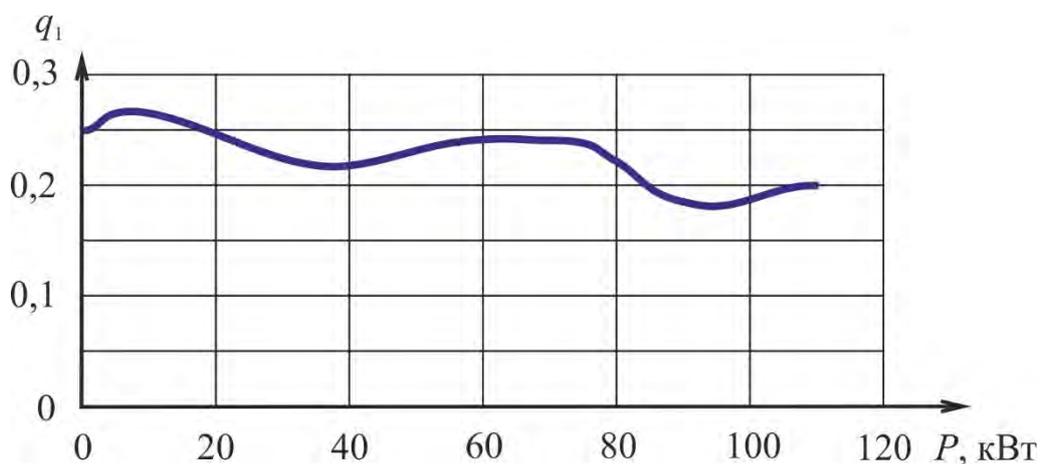


Рис. 4.11. Регрессионная зависимость относительного увеличения стоимости двигателя  $q_1$  при переходе к габариту на ступень выше

Повышение надежности электропривода эксгаустера, например, с 0,9 до 0,98, в диапазоне больших мощностей, стоит дороже (в 1,5...2 раза – см. рис. 2.1), чем в диапазоне малых мощностей.

Таблица 4.1.

Результаты статистической обработки относительного удорожания асинхронного двигателя при переходе к следующему габариту в «линейке» мощностей

Параметр	$P_{\text{н}}$ кВт	$\Delta C/C_{\text{н}}$	$q_1$	$d$	$d^2$
Номер выборки					
1	1,1	0,2 6	0,24	0,01	0,0001
2	1,5	0,1 2	0,25	0,13	0,0169
3	2,2	0,3 5	0,25	0,1	0,01
4	3	0,2 1	0,26	0,05	0,0025
...					
18	110	0,1 9	0,19	0,00	0,0000
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,21				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,12				
$t_{\text{КРИТ}}$	2,1				

**Увеличение количества фаз двигателя.** С одной стороны, увеличение числа элементов системы неизбежно приводит к усложнению, а следовательно, и к снижению её надежности. Но увеличение количества фаз двигателя повышает надежность машины, т.к. при отключении одной из фаз многофазная машина сможет продолжить работу, причем, чем большее количество фаз имеет машина, тем менее заметно будет отключение одной из них. Положительным моментом в многофазности машины является снижение пульсаций магнитного поля, а вместе с ним и электромагнитного момента, что, в свою очередь, улучшает условия работы производственного механизма. Таким образом, увеличение фазности двигателя положительно сказывается на надежности электромеханического преобразователя. Увеличение фаз двигателя не приводит к увеличению габаритов машины и усложнениям конструкции [97, 98, 99,23]. Увеличение количества фаз обходится дешевле, чем увеличение мощности машины на 20-25%, что соответствует одному габариту. Чтобы оценить благоприятное влияние увеличенного числа фаз на показатели надежности электропривода, был выполнен компьютерный эксперимент для синхронного реактивного электродвигателя с независимым возбуждением. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.2. Подробная модель электропривода, представленная в программном продукте *Maxwell*, описана в третьей главе диссертации. Моделирование показало, что увеличение количества фаз приводит к уменьшению величины фазного тока (см. рис. 4.12), и вследствие, к снижению электрических потерь (см. рис. 4.13), причем это снижение наиболее значительно при небольшом количестве фаз.

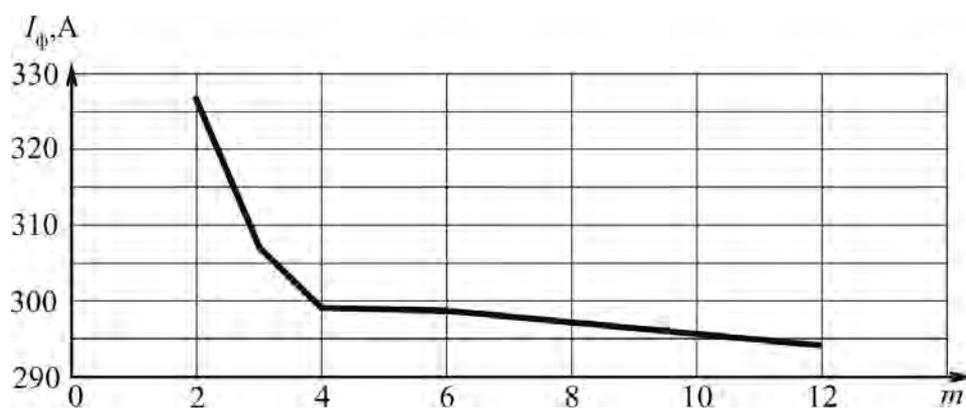


Рис. 4.12. Зависимость фазного тока двигателя  $I_{\phi}$  от количества фаз  $m$ .

### Расчет величин среднеквадратичных токов фазы

Установлена зависимость надежностных показателей многофазного электромеханического преобразователя в зависимости от типа механического преобразователя и степени насыщения магнитной системы.

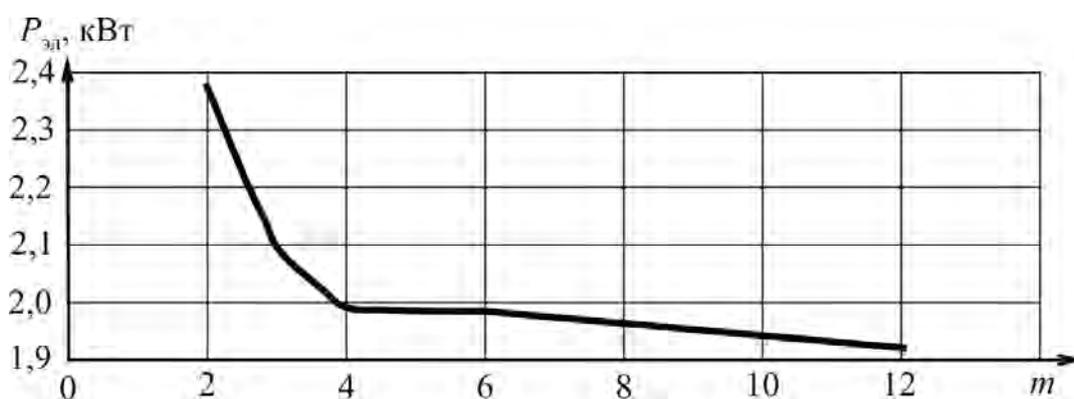


Рис. 4.13. Зависимость мощности электрических потерь в двигателе  $P_{эл}$  от количества фаз  $m$ .

Таблица 4.2.

Параметры моделируемого электромеханического преобразователя

№	Параметр	Величина
1	Номинальная мощность двигателя, кВт	315
2	Количество полюсов	6
3	Номинальное напряжение, В	220
4	Количество пазов статора	72
5	Активное сопротивление фазы статора, Ом	0,0074
6	Реактивное сопротивление фазы статора, Ом	0,0841

Ниже представлены зависимости среднеквадратичного тока от количества отказавших фаз двигателя при нагрузке, равной номинальной. Модель СРМНВ была создана в программном продукте *Maxwell*.

Ниже представлены зависимости среднеквадратичного тока от количества отказавших фаз двигателя при моменте нагрузки, равном трем номинальным моментам. Магнитная система СРДНВ в данном опыте насыщена, т.к. создан значительный магнитный поток из-за больших токов, протекающих по обмоткам.

Отметим, что отказ одной фазы в трехфазной машине приводит к увеличению среднеквадратичного тока почти на 100%, тогда как отказ одной фазы в 12-ти фазной машине приводит к увеличению тока лишь на 5-7%, что практически не влияет на нормальную работу двигателя (см рис. 4.14 и 4.15). Увеличение количества фаз двигателя не приводит к значительному его удорожанию. Конструкция статора остается той же самой. При достаточном количестве пазов в машине необходимо лишь перемотать обмотку, и на выходе можем получить значительно более надежную машину.

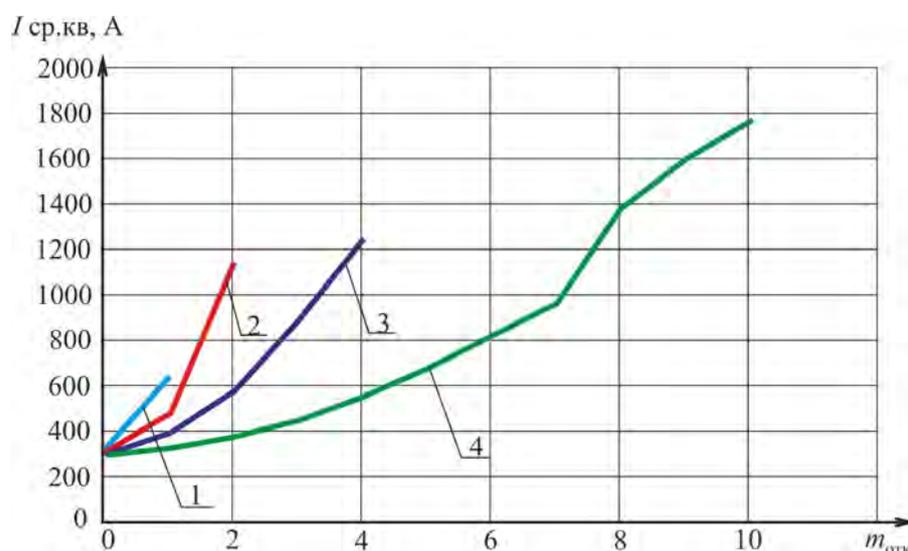


Рис. 4.14. Зависимости среднеквадратичного тока  $I_{ср.кв.}$  от количества отказавших фаз  $m_{отк}$  для 3, 4, 6 и 12 фазной машины при номинальной нагрузке; 1 – 3 фазная машина, 2 – 4 фазная машина, 3 – 6 фазная машина, 4 – 12 фазная машина

Была получена и построена зависимость относительного увеличения

электромагнитного момента от количества фаз в заданном диапазоне мощностей.

Установлено, что на надежность системы электропривода влияет запас выбранного двигателя по мощности, а также количество фаз выбранного двигателя. Можно дать рекомендации выбора запаса мощности двигателя, исходя из требуемых по условиям производства показателей надежности. На оборудование, для которого показатель вероятности безотказной работы не превышает 0,8-0,85, нет необходимости устанавливать электрический двигатель с запасом мощности более одного габарита.

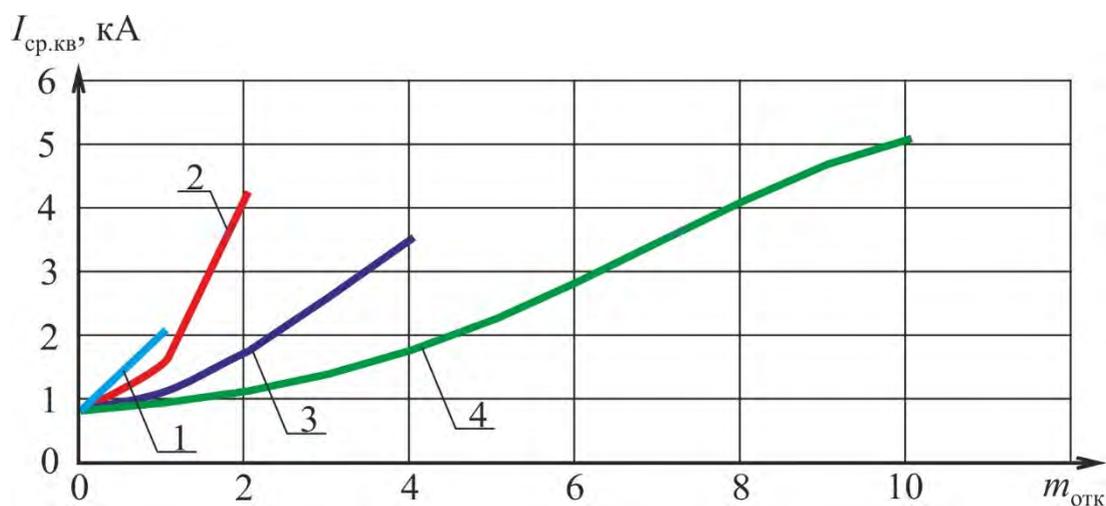


Рис. 4.15. Зависимости среднеквадратичного тока  $I_{\text{ср.кв}}$  от количества отказавших фаз  $m_{\text{отк}}$  для 3, 4, 6 и 12 фазной машины при трехкратном превышении номинальной нагрузки; 1 – 3 фазная машина, 2 – 4 фазная машина, 3 – 6 фазная машина, 4 – 12 фазная машина

Такое решение повлечет за собой лишь неоправданное завышение капитальных затрат. Для механизмов ответственного производства с показателем вероятности безотказной работы 0,9-0,95 существует необходимость выбора двигателя на габарит или два (одного и того же производителя) больше требуемого. Это приведет к увеличению мощности на 20-40%, и значительно (от 0,9 до 0,95) увеличит вероятность безотказной работы работающего двигателя. При требуемых показателях надежности

выше 0,95 увеличение запаса мощности двигателя не приводит к достаточно значимому увеличению показателей надежности. Причем, на установках с большими установленными мощностями ощутимый результат при завышении мощности получить становится всё труднее. На этом этапе появляется необходимость в увеличении количества фаз машины, или попытке прибегнуть к другим конструктивным решениям электрических двигателей.

#### **4.3. Пример реализации методики синтеза электропривода с импульсно векторной схемой управления**

Традиционно реактивные двигатели принято считать плохими [7, 8,9] развивают малые электромагнитные моменты, не поддаются регулированию, имеют низкие энергетические показатели. Такую точку зрения можно встретить в учебниках по электрическим машинам прошлого столетия [45]. Все дело в том, что авторы рассматривали электродвигатели, питающиеся от сетевого напряжения с синусоидальной картиной тока. В конце XX века положение принципиально изменилось. Появились новые эффективные быстродействующие средства управления: *IGBT* транзисторы, контроллеры и микропроцессоры. С их появлением специалисты получили возможность задавать любую форму кривой тока (прямоугольник, трапеция, и др.) и формировать любые схемы силовых цепей [137, 138,139, 123, 124, 125, 126, 86, 10, 12,11]. Так, например, даже введением относительно простой системы подчиненного управления можно добиться увеличения момента в 1,5...2 раза[130, 131,132,133, 134, 135, 137,138].

Следует обратить внимание на работы немца *Weh, H.* [139],американца *Lipo, T.A.*[123, 124, 125,126]и его школы, которые предложили новый тип электрической машины – синхронную реактивную машину с независимым возбуждением (СРМНВ), в английской терминологии – *FieldRegulatedReluctanceMachine (FRRM)*.

Принцип работы СРМНВ заключается в следующем. Возьмем обыкновенный реактивный двигатель (см. рис. 4,16) и поступим следующим образом: на первом этапе подадим ток на обмотки, которые в данный момент времени находятся напротив межполюсных промежутков. Так мы создаем продольный поток возбуждения в электрической машине. Электромагнитный момент машина пока не развивает.

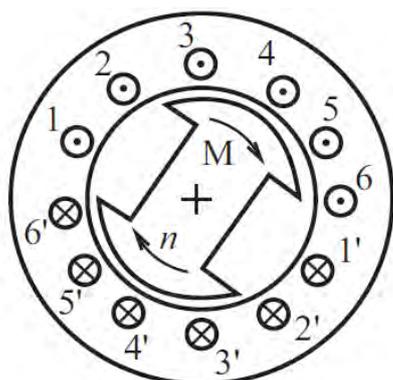


рис. 4,0. Поперечный разрез шестифазного реактивного двигателя

На втором этапе подадим ток в проводники, которые находятся напротив полюса. Поскольку они расположены в магнитном поле, то на них действует поперечная сила, на ротор будет действовать обратная сила. Ротор придет во вращение.

Здесь необходимо обратить внимание на особенность управления данным приводом. Когда ротор повернется, то те витки, которые играли роль обмотки возбуждения, перейдут в положение над полюсами и будут играть роль якорной обмотки, и наоборот, те витки, которые были якорной обмоткой, станут выполнять роль обмотки возбуждения. Таким образом, каждый виток выполняет попеременно то функцию и обмотки возбуждения, то обмотки якоря.

В результате идеальная осциллограмма тока в фазе будет иметь вид, как на рис. 4,17. Здесь умышленно показаны разные величины токов якоря и возбуждения для наглядности. Также представлен график ЭДС фазы. Когда витки находятся над полюсами, есть поток, следовательно, ЭДС есть, а когда витки находятся над межполюсной зоной, ЭДС равна нулю.

Описанный двигатель имеет ряд ценных эксплуатационных показателей:

отсутствие обмоток на роторе;  
двигатель бесконтактный.

Ротор можно выполнить массивным, а это приводит к появлению дополнительных достоинств:

- а) технологичность изготовления;
- б) механическая прочность;
- в) радиальная жесткость;

Исходя из вышеозвученных особенностей, этот двигатель можно использовать в электроприводах с тяжелыми и особо тяжелыми условиями работы.

У некоторых авторов возникают опасения, что, поскольку двигатель реактивный, и традиционно его принято считать «плохим», то моменты, которые он развивает, будут недостаточными по сравнению с общими типовыми синхронными и асинхронными электроприводами.

Однако, как показали теоретические и экспериментальные исследования Григорьева М.А. [23,24] и Горожанкина А.Н. [19] в длительном режиме работы (если ограничить момент условиями нагрева обмоток), этот привод имеет номинальный момент на 15...20% больше, чем асинхронный частотно регулируемый привод того же габарита и той же линейной плотности тока. Эти данные хорошо согласуются с результатами западных авторов, в частности, итальянской школы *Vagati, A.* [137,138], немецкой школы *Weh, H.* [139], и особенно подробно американской *LipoT.* [123, 124, 125,126]. Интерес к данной теме проявляли Московский энергетический институт и компания РУСЭЛПРОМ.

Вторая экспериментально подтвержденная особенность – это высокая перегрузочная способность привода: дело в том, что эту теорию привода

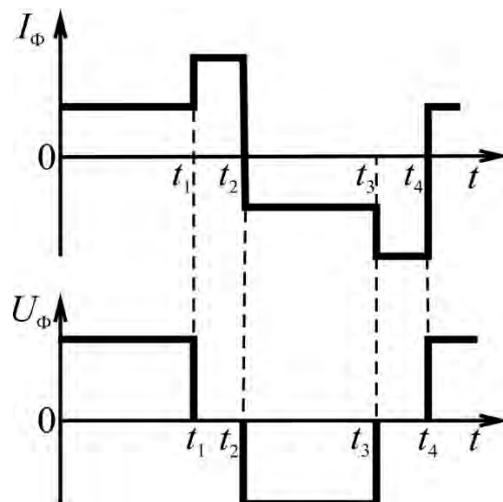


Рис. 4,17. Осциллограммы тока

можно рассматривать как теорию двигателей постоянного тока независимого возбуждения, у которых нет ограничений по условиям коммутации. Перегрузка у двигателей постоянного тока ограничивается коллектором, а здесь его нет. В лабораторных условиях были получены пятикратные перегрузки по моменту.

В работах [95, 96, 56, 63,94] проводились исследования электроприводов на базе СРМНВ, и были получены следующие результаты:

- выполнено сравнение конструктивных и функциональных признаков СРМНВ и других типов электрических машин. На основании полученных данных СРМНВ отнесена к отдельному классу электрических машин;

- предложены структурные схемы электропривода с СРМНВ;
- предложены системы управления электроприводом на базе СРМНВ;
- разработаны алгоритмы управления электроприводов с СРМНВ;
- разработаны математические модели СРМНВ;
- подтверждены экспериментально высокие удельные, регулировочные и энергетические показатели электропривода с СРМНВ.

Все работы указывают на принципиальную достижимость высоких регулировочных, массогабаритных и энергетических показателей в приводах, которые ранее казались плохими. Вместе с тем электропривод с синхронным реактивным двигателем имеет дополнительные ресурсы, на которые ни в отечественной, ни в зарубежной литературе серьезное внимание не обращалось.

В качестве объекта для изучения подобного типа электроприводов взята импульсно-векторная схема. Её приоритет закреплен Пат. 2510877 Российская Федерация, МПК *H02P27/04*. Электропривод с синхронной реактивной машиной / Усынин Ю.С., Горожанкин А.Н., Бычков А.Е., Белоусов Е.В., Журавлев А.М. – № 2012143554/07; заявл. 11.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

Применение *IGBT* транзисторов в мощных преобразователях ограничено рабочими токами этих элементов. В настоящее время эти величины приближаются к значению 1000А, что ограничивает применение этих транзисторов в традиционных схемных исполнениях в приводах мощностью от 500 кВт и выше. Одним из выходов в этой ситуации является создание схем выпрямления, в которых транзисторы подключают параллельно друг другу, что позволяет пропускать в два раза большие токи в цепи обмоток машин. Таким образом, с ростом мощности преобразователя растет и количество силовых полупроводниковых элементов в его составе. Имеет место так называемая «эквивалентная многофазность», т.е. какое количество фаз имел бы преобразователь, если бы все транзисторы располагались по одному в каждом плече моста, каждой фазы.

В отношении минимизации количества ключей особенной привлекательно выглядит импульсно-векторная схема управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением. Различия с мостовой и полумостовой схемами еще больше усиливаются с ростом мощности нагрузки. При удвоении числа транзисторов, т.е. при подключении их в параллель, что позволяет разделить ток фазы пополам, (это происходит при мощностях от 300 – 350 кВт, и рабочих токах 900-1200 А), разница в их количестве в приведенных схемах становится еще более ощутимой. Так, например, в составе мостовой схемы при мощности 4,5 МВт и 3 фазах имеется 24 транзистора, в ИВСУ, рассчитанной на ту же мощность и 3 фазы, транзисторов всего 10 (см. рис. 4.18). Таким образом, разница в количестве транзисторов более чем двукратная ( $24-10=14$ ). В связи с этим можно рекомендовать схему с ИВСУ СРМНВ как наиболее приемлемую с позиции надежности и экономичности.

На основании полученных результатов можем сделать вывод о том, что количество транзисторов в импульсно-векторной схеме минимально по сравнению с наиболее распространенными схемами. Из этого следует: во-

первых, ввиду наименьшего количества элементов эта система наиболее надежна, во-вторых, что стоимость преобразователя напряжения с импульсно-векторной относительно традиционных схем невысока. Можно отметить, что наибольший эффект от применения данной схемы достигается при её применении в электроприводах больших мощностей порядка 500...2000 кВт.

При использовании классических методик, для обеспечения повышенной надежности работы электропривода, например, с  $P=0,98$ , требуется неоправданное завышение затрат на полупроводниковую часть. Выходом из этой ситуации может послужить рассмотрение на этапе синтеза системы электропривода со специальными схемотехническими решениями силовых цепей полупроводникового преобразователя [26, 25] и электрической машины [128], при этом электромеханический преобразователь должен выбираться с заданным запасом по мощности (рис. 2.9,  $P=0,98$ ).

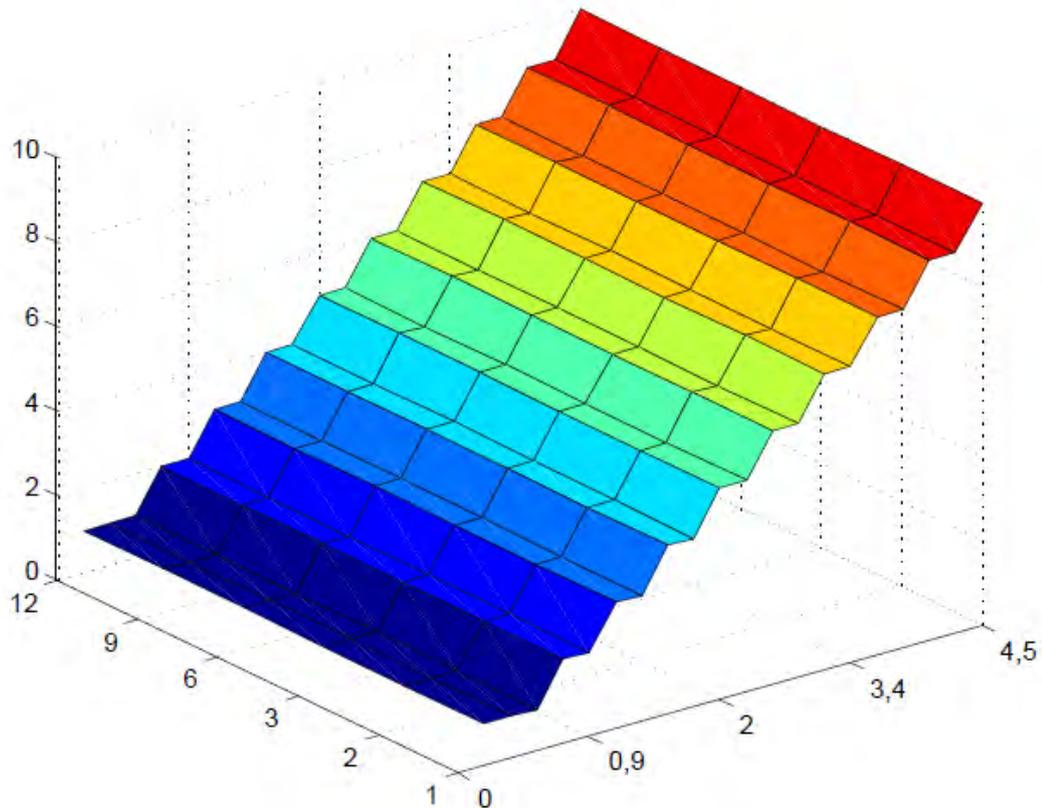


Рис. 4.18 Зависимость количества управляемых силовых ключей в импульсно векторной схеме управления от числа фаз и установленной мощности преобразователя

Можно отказаться от традиционной конфигурации схем силовых цепей преобразователя, и использовать  $m$ -фазные независимые источники питания на каждую фазу, и не увеличивать установленную мощность полупроводникового преобразователя выше номинальной, а надежность системы обеспечить за счет использования резервного преобразователя мощностью, равной  $p/m$ , где  $p$  – суммарная установленная мощность электропривода.

В наибольшей степени требованиям надежности отвечают электроприводы с новыми типами конструкций электрических машин, например, с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения [139], отличающейся простотой конструкции статора и высокой технологичностью изготовления ротора [99]. В исходном случае схема силовых цепей выполняется многофазной с индивидуальными источниками

питания [129]. Отказ от индивидуальных источников в пользу более простой схемы приводит к структуре с импульсно-векторным управлением [128]. В этом случае начала фазных обмоток двигателя М подключаются непосредственно к питающей сети (рис. 4.19, обмотки 2, 3, 4), а концы (рис. 4.19, обмотки 5, 6, 7) – непосредственно на неуправляемый выпрямитель. На схеме изображенной на рис. 4.19 количество фаз  $m = 3$ . В общем случае используется  $m$ -фазный выпрямитель. При отказе одного из плеч моста 9 (рис. 4.19) в работу вводится резерв, установленная мощность которого равна  $p/m$ , где  $p$  – номинальная мощность электропривода.

Идея работы схемы с импульсно-векторным управлением заключается в формировании управляющих импульсов на транзисторный блок 18 в функции положения ротора 26 и обобщающего вектора напряжения  $U_c$  так, чтобы он открывался и пропускал ток по обмоткам статора лишь в те отрезки времени, когда взаимное положение полюсов явнополюсного ротора и магнитного поля, создаваемого токами статора, соответствовало двигательному электромагнитному моменту электрической машины.

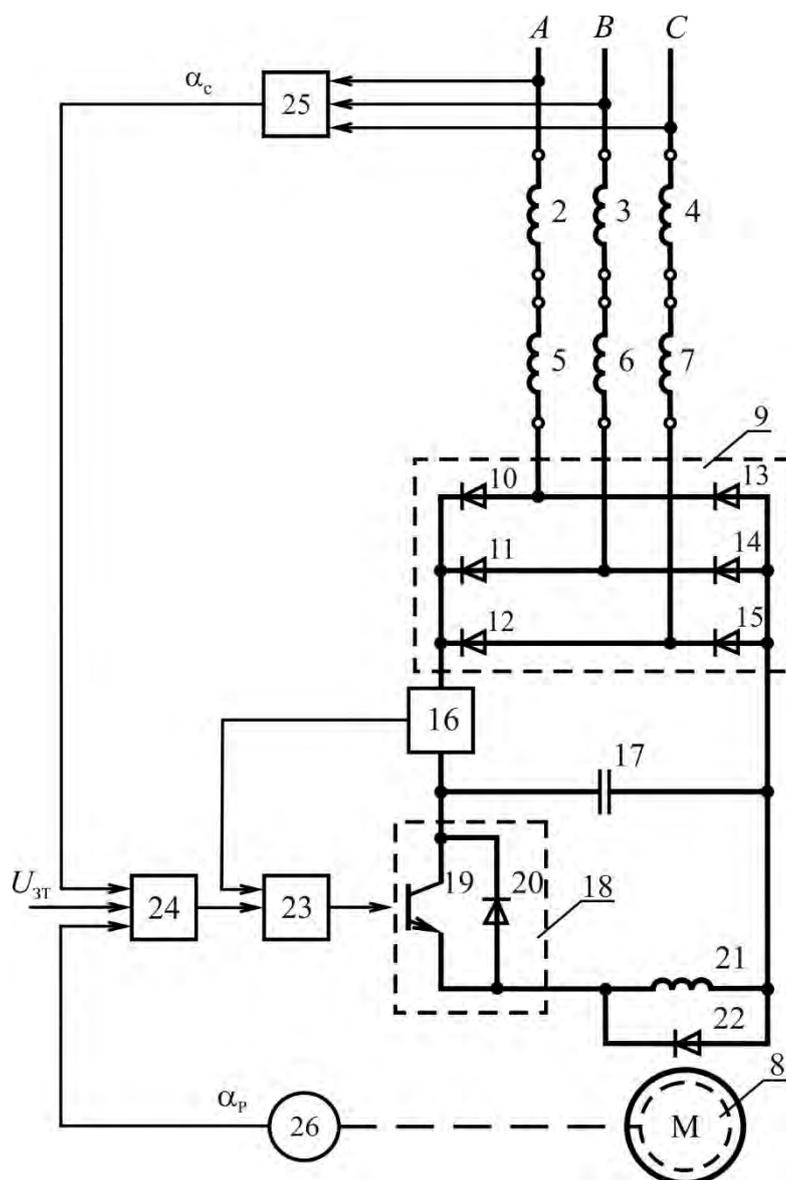


Рис. 2.19. Электропривод с импульсно-векторным управлением СРМНВ  
 2–7 статорные обмотки М (СРМНВ), 10–15 вентили m-фазного  
 полупроводникового выпрямителя 9; 16 – датчик тока; 17 – конденсатор фильтра; 18 –  
 транзисторный блок, содержащий транзистор 19 и обратный диод 20; 21 – дроссель с  
 обратным диодом 22; 23 – регулятор тока; 24 – коммутатор; 26 – датчик положения; 25  
 – датчик напряжения

Для анализа работы системы была создана математическая модель электропривода, состоящая из двух блоков. Первый блок, который был реализован в модуле *AnsysSimplorer* [33], представлен в форме дифференциальных уравнений в полных производных и учитывал уравнения баланса напряжений в статорных обмотках с активным сопротивлением  $r$ , а также уравнения Лагранжа для тел, совершающих вращательное движение

вокруг оси с угловой скоростью редаточная функция полупроводникового преобразователя каждой из фаз аппроксимировалась апериодическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания, учитывающим инерционные свойства микропроцессорного блока. Каждая из фаз статорных обмоток подключалась к питающей сети при условиях, что подан управляющий сигнал на транзистор 18, и выпрямитель 9 допускает протекание тока конкретных фаз электрической машины.

Второй блок “Модель магнитной системы” включал в себя уравнения в частных производных, учитывающих распределение магнитных полей в электрической машине, и для решения которых использовался метод конечных элементов в вариационной постановке [89]. Расчет дифференциальных уравнений этого блока выполнялся в модуле *AnsysMaxwell* [33]. Результирующий электромагнитный момент, создаваемый двигателем, использовался при расчетах в модуле *AnsysSimplorer*.

При моделировании электропривода варьировалось количество фаз  $m$ , на которое выполнялись двигатель и полупроводниковый преобразователь. При расчете момент сопротивления на валу двигателя принимался номинальным. Установлено, что действующее значение тока снижается с увеличением  $m$  (см. рис. 4.20), и обусловлено это уменьшением пульсаций электромагнитного момента, а также более полным использованием статорных обмоток по току [115]. Хотя увеличение количества фаз  $m$  ведет к увеличению количества вентиля и стоимости полупроводникового преобразователя [116], в абсолютных значениях стоимость диодного моста значительно дешевле мостов с *IGBT* транзисторами.

Переход к импульсной системе управления СРМНВ повлечет за собой неизбежное снижение среднего значения электромагнитного момента развиваемого машиной в номинальном продолжительном режиме работы. Как уже отмечалось, выходом из этой ситуации мы видим переход от машины с существующими параметрами к машине, идущей в каталоге

следующей, т.е. к машине с завышенными на один габарит параметрами.

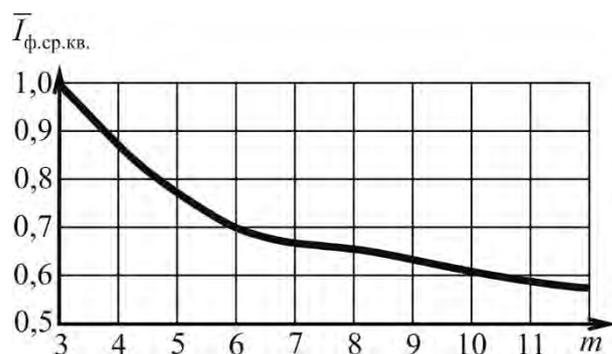


Рис. 4.20. Зависимость действующего значения среднеквадратичного фазного тока  $I_{\text{ф ср.кв.}}$  в о.е. от количества фаз  $m$  в СРМНВ с импульсно-векторным управлением

Вместе с тем стоит отметить, что из-за отсутствия технологических операций, связанных с литьём обмотки ротора и экономии активных материалов (проводники роторной обмотки), имеет место снижение стоимости СРМНВ относительно АД того же габарита на 20-25%.

Таким образом, завышение габарита СРМНВ при импульсно-векторном регулировании не повлечет за собой повышения стоимости системы.

Как уже отмечалось выше, привлекательной особенностью импульсно-векторной системы управления является наличие в силовой части всего одного управляемого полупроводникового элемента, что влечет за собой снижение стоимости преобразовательной установки за счет уменьшения количества управляемых вентилях, а также упрощения микропроцессорной системы управления этими вентилями. Различия в стоимости силовой части разных производителей объясняется множеством факторов, таких как: тип исполнения привода (модульное или «компактное»), новизна разработки той или иной модели преобразователя, совершенство технологии производства полупроводников.

К увеличению стоимости системы импульсно-векторного управления может привести обязательное наличие датчика положения ротора (энкодера). Однако в настоящее время достаточно широко распространены системы электроприводов, замкнутых по скорости, и наличие датчиков скорости или положения сейчас не является чем-то особенным.

Техническим результатом предлагаемой системы является регулируемый бесконтактный электропривод, который характеризуется

повышенной надежностью в условиях работы с большими перегрузками по моменту, с тяжелыми и весьма тяжёлыми условиями эксплуатации. При этом весь названный перечень привлекательных эксплуатационных характеристик электропривода достигается при относительно простом регулируемом устройстве, которое выполнено на одном транзисторном ключе.

Преимущества данной системы:

1. относительно низкая стоимость преобразователя, так как имеется всего один управляемый полупроводниковый элемент (IGBT транзистор);
2. простота управления;
3. отсутствие скольжения (в отличие от асинхронных двигателей), а следовательно повышение энергетических показателей.

Отмеченные недостатки системы:

1. из-за импульсного характера системы средний момент, развиваемый машиной на 15-20% ниже, чем у АД той же мощности. Из этой ситуации можно выйти следующим образом: выбирать СРМНВ на один габарит больше. Это приводит к увеличению капитальных затрат на машину, однако общие затраты на систему электропривода остаются ниже из-за дешевого преобразователя.

2. невозможность реверса в данной системе и отсутствие генераторного режима, из-за отсутствия контура протекания тока в обратном направлении (для получения возможности реверса необходимо менять местами фазы, либо использовать другие схемы).

3. обязательное наличие в системе датчика положения ротора. Эта необходимость обусловлена работой системы управления. Необходимо знать положение полюса ротора и межполюсного промежутка относительно обмоток, для формирования сигнала управления. Существуют системы бездатчикового определения положения ротора, например, работа доцента Козиной Т.А [44].

Предложенная схема требует изучения, потому как является

импульсной, имеет особенности в электрической части, отличается простотой, но в то же время интересны процессы, которые в ней протекают, ведь частота импульсов в этой системе меняется.

#### 4.3.1. Идея импульсно-векторного способа управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением.

Сущность системы электропривода с ИВСУ с СРМНВ поясняется рисунками, где изображены:

- на рис. 4.21 – схематический поперечный разрез синхронной реактивной машины;
- на рис. 4.22 – пример функциональной схемы;
- на рис. 4.23 – пространственная векторная диаграмма, поясняющая взаимодействие потокосцепления  $\psi_c$  статора с явнополюсным массивным ротором;
- на рис. 4.24 – характер изменения во времени  $t$  угла поворота вектора

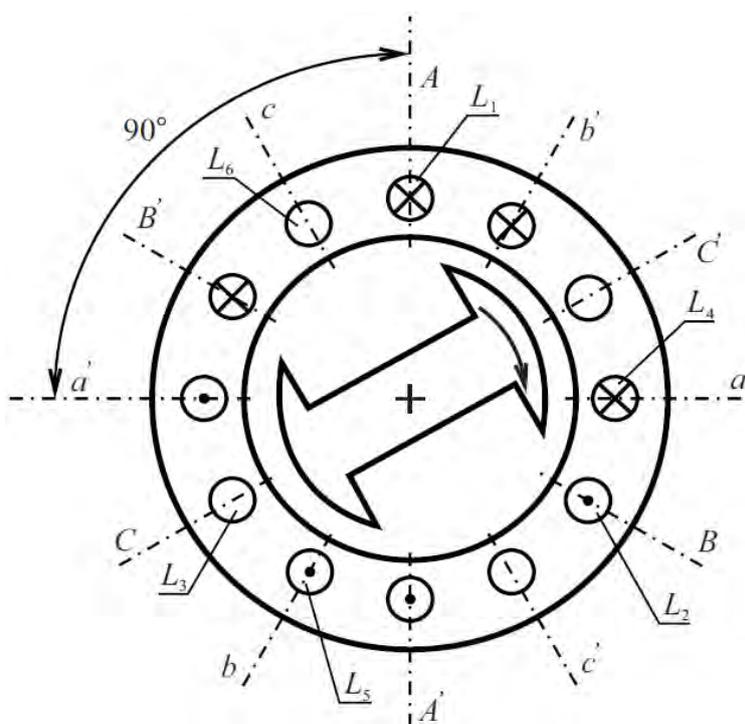


Рис. 4.21. Схематический поперечный разрез синхронной реактивной машины

потокосцепления  $\psi_c$  статора и вектора результирующего потокосцепления  $\psi_p$ , совпадающего с продольной магнитной осью статора.

На рис. 4.21 представлен в разрезе пример шестифазной синхронной реактивной машины, когда в пазах статора, расположенных в плоскостях  $A - A'$ ,  $B - B'$  и  $C - C'$ , сдвинутых

пространственно на 120 электрических градусов, размещены обмотки  $L_1, L_2, L_3$ . В пазах статора, расположенных в плоскостях  $a - a', b - b', c - c'$ , сдвинутых между собой также на 120 электрических градусов, размещены такие же обмотки  $L_4, L_5, L_6$ . Обмотки  $L_1$  и  $L_4, L_2$  и  $L_5, L_3$  и  $L_6$  соединены между собой согласно. Магнитные оси обмоток одноимённых фаз  $L_1$  и  $L_4, L_2$  и  $L_5, L_3$  и  $L_6$ , расположенных в плоскостях  $A - A', a - a', L_2$  и  $L_5$ , расположенных в плоскостях  $B - B', b - b', L_3$  и  $L_6$ , расположенных в плоскостях  $C - C'$  и  $c - c'$ , сдвинутых друг относительно друга пространственно на 90 электрических градусов. Обмотки  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  и  $L_6$  образуют одну многофазную электрическую схему.

Ротор синхронной реактивной машины выполнен явнополусным. В примере, изображённом на рис. 4.21, длина полюсной дуги ротора составляет  $90^\circ$ , длина межполюсного промежутка – также  $90^\circ$ .

Начала обмоток  $L_1, L_2$ , и  $L_3$  (рис. 4.22) подключены к фазным зажимам  $A, B$  и  $C$  источника трёхфазного напряжения питания. Концы обмоток  $L_4, L_5$ , и  $L_6$  подключены ко входу трёхфазного мостового неуправляемого выпрямителя НВ. Диоды  $VD1, VD2$  и  $VD3$  образуют катодную группу, а диоды  $VD4, VD5$  и  $VD6$  – анодную группу вентилей. Между анодной и катодной группами вентилей включен датчик тока ДТ. Между датчиком тока и анодной группой вентилей выпрямителя включены параллельно конденсатор  $C$  и цепочка из последовательно соединенных транзисторного ключа ТрК с транзистором  $VT$  и обратным диодом  $VD7$  и дроссель  $L_7$  с обратным диодом  $VD8$ . На управляющий вход транзисторного ключа подключен выход регулятора тока РТ. На первый вход регулятора тока подключен выход коммутатора  $K$ , а на второй вход – выход датчика тока. На первый вход коммутатора  $K$  подаётся сигнал  $U_{зт}$ , пропорциональный желаемой величине тока статора. На второй вход коммутатора подаётся сигнал с выхода датчика ДН, измеряющего по мгновенным значениям напряжений на фазных зажимах  $A, B$  и  $C$  пространственное (угловое)

положение  $\alpha_c$ , результирующего вектора напряжения источника питания. На третий вход коммутатора К подаётся сигнал  $\alpha_p$ , с выхода датчика Э угла поворота вала ротора двигателя. Состояние цепей коммутатора К зависит от величины разницы показаний датчиков ДН и  $\Delta\alpha = \alpha_c - \alpha_p$ , а именно: когда эта разница попадает в интервалы  $0 < \Delta\alpha < 90$  или  $180 < \Delta\alpha < 270$  электрических градусов, то коммутатор пропускает сигнал  $U_{зт}$  на вход регулятора РТ, задавая тем самым требуемое значение тока, протекающего по обмоткам  $L_1 \dots L_6$  статора двигателя. Когда  $\Delta\alpha$  находится вне указанных интервалов, то сигнал  $U_{зт}$  на вход регулятора тока через коммутатор К не проходит.

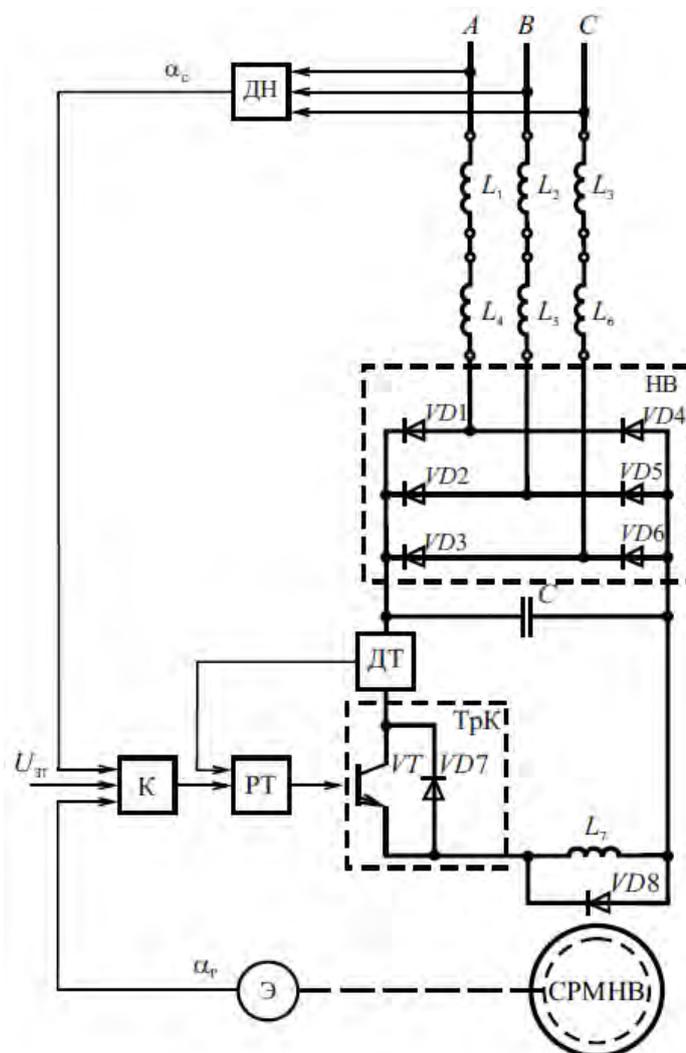


Рис. 4.22. Пример функциональной схемы ИВСУ с СРМНВ

На рис. 4.23 представлена векторная диаграмма, на которой изображены:  $\psi_c$  – пространственный вектор результирующего потокосцепления, создаваемого токами всех обмоток  $L_1 \dots L_6$  статора, подключенных к зажимам  $A, B, C$  питающей сети, при непрерывно открытом ключе ТрК;  $\psi_p$  – пространственный вектор, направленный по продольной оси магнитной системы ротора. В идеальном случае, когда не учитываются потоки рассеяния, а индуктивность по поперечной оси электрической машины пренебрежимо мала, направление этого вектора совпадает с направлением вектора результирующего (в зазоре) потокосцепления электрической машины.  $\alpha_c$  и  $\alpha_p$  – углы поворота векторов  $\psi_c$  и  $\psi_p$  относительно неподвижной оси  $N-N$ , принятой за начало отсчёта.

На рис. 4.24 изображён характер изменения во времени  $t$  угла поворота  $\alpha$  векторов  $\psi_c$  и  $\psi_p$  при вращении двигателя со скоростью ниже синхронной. Заштрихованные участки времени  $0 \dots t_1, t_2 \dots t_3$  соответствуют включенному состоянию транзисторного ключа ТрК, незаштрихованные – отключенному.

В исходном состоянии схемы с целью достижения наглядности совместим начальные значения углов поворота векторов  $\psi_c$  и  $\psi_p$  на рис. 3.6.

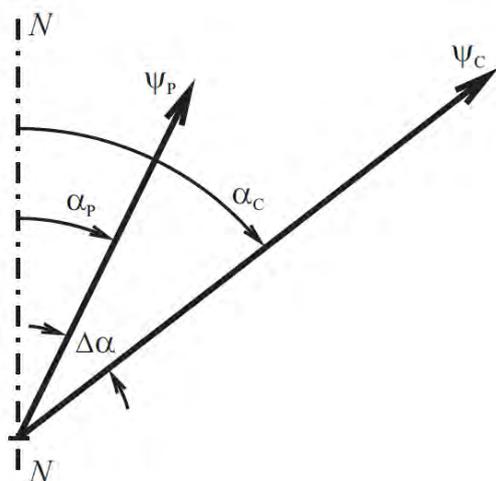


Рис. 4.23. Пространственная векторная диаграмма, поясняющая взаимодействие потокосцепления  $\psi_c$  статора с явнополюсным массивным ротором ( $N-N$  – линия начала отсчёта)

Этому состоянию соответствует следующее начальное мгновенное положение её элементов. Ток в фазе  $A$  статора, протекающий по обмоткам  $L_1$  и  $L_4$ , положительный и максимальный, а токи в фазах  $B$  и  $C$  отрицательные и равны половине тока в фазе  $A$ ; в этот момент времени угол поворота вектора  $\psi_c$  принят  $\alpha_c = 0$ . Угол поворота вектора  $\psi_p$  принят также  $\alpha_p = 0$ , а сам ротор занимает пространственное положение, как на

рис. 4.21. Там же указаны и направления токов в обмотках статора в начальный момент времени.

Электропривод работает следующим образом. Так как частота напряжения сети, питающей цепи статора, стабильна, то угол  $\alpha_c$  поворота вектора  $\psi_c$  изменяется по линейному закону от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , после чего начинается новый период, аналогичный предыдущему и т.д. (см. кривую  $\psi_c$  на рис. 4.24). Угол поворота вектора  $\psi_p$ , жёстко связанного с ротором двигателя, изменяется медленнее, если угловая скорость двигателя ниже синхронной (кривая  $\psi_p$  на рис. 4.24). Когда угол  $\alpha_p$  достигает  $360^\circ$ , также происходит сброс функции  $\psi_p$  до нуля. На отрезках времени  $0 \dots t_1, t_2 \dots t_3, t_4 \dots t_5$  и т.д., где выполняются условия  $0^\circ < \Delta\alpha < 90^\circ$  или  $180^\circ < \Delta\alpha < 270^\circ$ , и где, следовательно момент реактивного двигателя, создаваемый токами статора, двигательный, коммутатор К пропускает сигнал  $U_{зг}$  на вход регулятора РТ, а контур регулирования тока, образованный силовыми цепями двигателя, ключом ТрК, регулятором тока РТ и датчиком тока ДТ, обеспечивает протекание тока по цепям статора в соответствии с величиной  $U_{зг}$ .

На отрезках времени  $t_1 \dots t_2, t_3 \dots t_4$  и т.д., которые в случае протекания тока по цепям статора соответствовали бы тормозящему режиму, сигнал  $U_{зг}$  через коммутатор К не проходит, ключ ТрК заперт, двигатель момента не развивает. В итоге двигатель работает в импульсном режиме, развивая момент лишь на отрезках времени  $0 \dots t_1, t_2 \dots t_3$  и т.д.

Величина момента двигателя определяется величиной тока, протекающего по обмоткам статора двигателя и задаваемого напряжением  $U_{зг}$ .

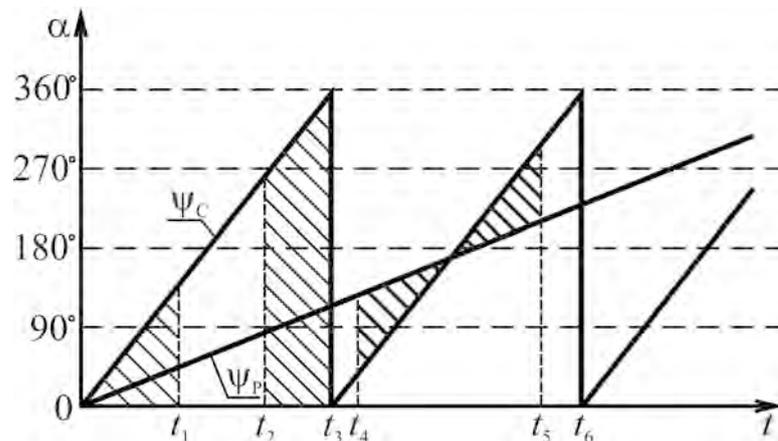


Рис. 4.24. Характер изменения во времени  $t$  угла поворота вектора потокосцепления  $\psi_s$  статора и вектора результирующего потокосцепления  $\psi_p$ , совпадающего с продольной магнитной осью статора

В основу предлагаемого решения положена задача, заключающаяся в возможности повышения качества процессов управления и упрощения схемы за счет сокращения числа каналов управления вентилями.

Особенностью предлагаемого решения является то, что, во-первых, благодаря взаимному ортогональному пространственному расположению обмоток статора каждой фазы, когда витки одной из последовательно включенных обмоток находятся напротив межполюсного промежутка и, тем самым, создают магнитный поток, направленный вдоль магнитной оси ротора, то витки второй обмотки этой фазы находятся над полюсом, взаимодействуют с потоком возбуждения первой обмотки, создавая электромагнитный момент электрической машины; во-вторых, благодаря наличию датчика положения ротора, транзисторный ключ открывается и пропускает ток по обмоткам статора лишь в те отрезки времени, когда взаимное положение полюсов явнополюсного ротора и магнитное поле, создаваемое токами статора, соответствует двигательному электромагнитному моменту электрической машины. При этом ротор имеет явнополюсную конструкцию и не несёт на себе обмоток.

## Исследование влияния количества фаз СРМНВ на величину среднеквадратичного момента и величину пульсаций момента

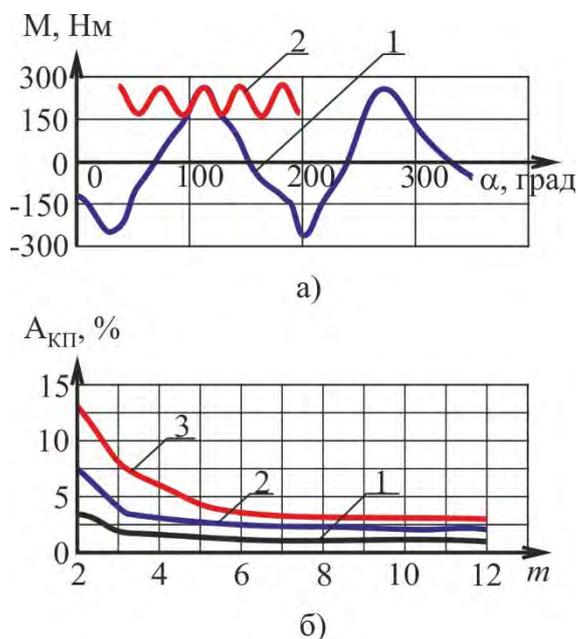


Рис. 4.25. Угловая характеристика СРМНВ  
 (а): 1 – электромагнитный момент, создаваемый одной фазой, 2 – результирующий момент; зависимость амплитуды коммутационных пульсаций  $A_{КП}$  электромагнитного момента от числа фаз  $m$  (б):  
 1 – при  $0,5 \cdot M_n$ , 2 – при  $M_n$ , 3 – при  $2 \cdot M_n$

За основу модели была взята СРМНВ мощностью 5,5 кВт и номинальным моментом 15 Н·м. В ходе эксперимента варьировались следующие величины: количество фаз двигателя (3, 6, 12), порядок чередования работающих фаз (различное взаимное положение работающих фаз), величина протекающего по обмоткам тока.

Наилучшие энергетические показатели удалось получить в

двенадцати фазном электроприводе. В этом случае при постоянстве момента статической нагрузки привод потребляет наименьший ток из сети. Также с увеличением количества фаз уменьшаются пульсации электромагнитного момента, что также положительно сказывается на надежности электропривода, т.к. в первую очередь улучшается тепловой режим работы машины (см. рис. 4.25). В идеальном случае двигатель с бесконечным числом фаз не имел бы коммутационных пульсаций момента и не переходил в аварийный режим работы из-за отказа фазы. Однако, увеличение числа фаз приводит к значительному удорожанию системы управления и к снижению ее надежности (см. главу 2). Наиболее выгодным, по нашим оценкам, с позиции надежной работы и стоимости привода, является количество фаз, равное шести.

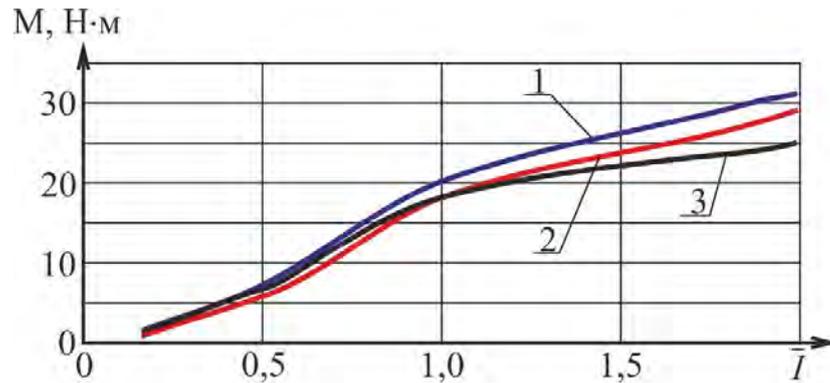


Рис. 4.26. Зависимость электромагнитного момента  $M$  от тока фаз  $I$  в трехфазной СРМНВ при различном расположении обмоток и количестве работающих фаз:

$$1 - I_1=I_2=I_3=I_H, 2 - I_1=I_3=1,22 \cdot I_H, I_2=0, \\ 3 - I_1=1,22 \cdot I_H, I_3=-1,22 \cdot I_H, I_2=0$$

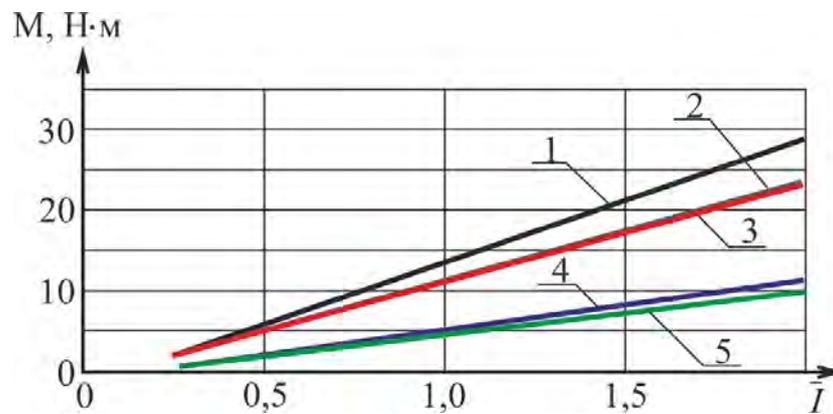


Рис. 4.27. Зависимость электромагнитного момента  $M$  от тока фаз  $I$  в шестифазной СРМНВ при различном расположении обмоток и количестве работающих фаз:

$$1 - I_1=I_2=I_4=I_5=0, I_3=I_6=1,73 \cdot I_H, 2 - I_1=I_3=I_4=I_5=0, I_2=I_6=1,73 \cdot I_H, \\ 3 - I_1=I_2=I_3=I_5=0, I_4=I_6=1,73 \cdot I_H, 4 - I_1=I_2=I_3=I_4=0, I_5=I_6=1,73 \cdot I_H, \\ 5 - I_2=I_3=I_4=I_5=0, I_1=I_6=1,73 \cdot I_H$$

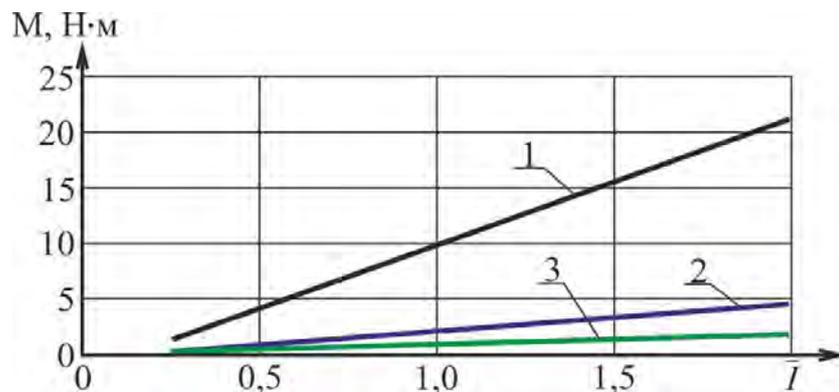


Рис. 4.28. Зависимость электромагнитного момента  $M$  от тока фаз  $I$  в двенадцати фазной СРМНВ при различном расположении обмотки и количестве работающих фаз: 1 -  $I_1=I_2=I_3=I_4=I_5=I_7=I_8=I_9=I_{10}=I_{11}=0,$

$$I_6=I_{12}=2,45 \cdot I_H,$$

$$2 - I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=I_7=I_8=I_9=I_{10}=I_{11}=0, I_1=I_{12}=2,45 \cdot I_H,$$

Для создания электромагнитного момента, равного номинальному, при неполнфазном режиме необходимо подавать в каждую из оставшихся фаз больший ток. Так, при работе только двух фаз из трех в трехфазной машине, для создания ей номинального момента, необходимо пропускать по обмоткам ток, равный  $1,22 \cdot I_n$ , а в шестифазной машине при работе двух фаз, необходимо уже подать ток  $1,73 \cdot I_n$ .

Как видим из рис. 4.26 – 4.28 при создании системы управления следует учитывать взаимно расположение обмоток фаз для правильного формирования сигналов управления и создания наибольшего момента.

#### **4.3.2. Математическая модель импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением**

Разрабатываемая математическая модель состоит из следующих основных элементов: электромеханический преобразователь энергии – СРМНВ, многофазный полупроводниковый преобразователь, импульсно-векторная система управления. Модель импульсно-векторной системы управления реализованная в программном продукте *Simplorer* представлена на рис. 4.29.

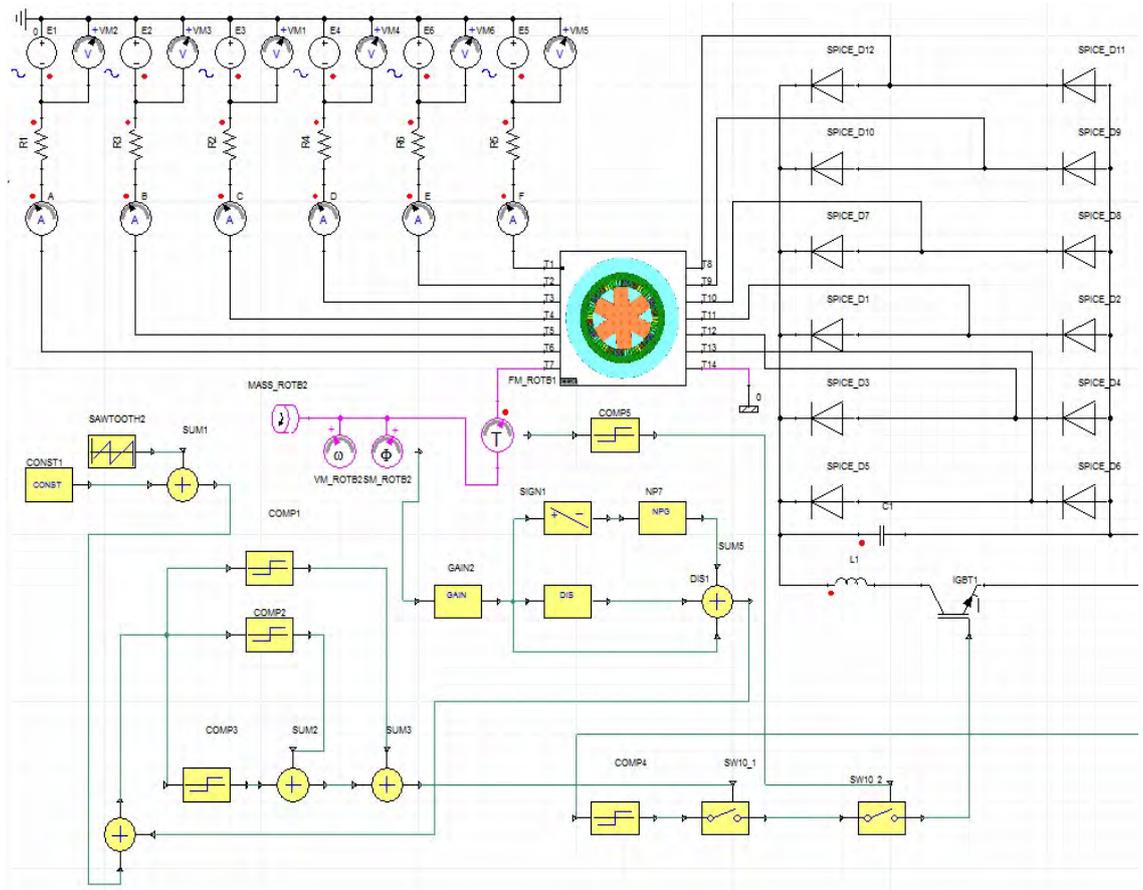


Рис. 4.29. Модель импульсно-векторной системы управления реализованная в программном продукте *Simplorer*.

Система электропривода выполнена по подчиненному принципу. Имеется обратная связь по току статора двигателя, а также по углу поворота вала двигателя. Система работает как многоконтурная структура управления с внешним контуром регулирования положения, настраиваемым регулятором РП. Блоком ограничения (БО) выставлялись максимальные значения статорных токов. Контур регулирования фазных токов включал в себя полупроводниковый преобразователь, состоящий из неуправляемого выпрямительного моста и одного коммутирующего транзистора, датчика тока и настраивался регулятором тока РТ.

Расчет промежуточных координат модели электропривода с импульсно-векторной системой управления выполнялся для

электромеханического преобразователя в среде *ANSYS Maxwell*, а для модулей системы управления – в среде *ANSYS Simplorer*.

Более подробно остановимся на каждом из выделенных узлов системы.

### **Модель силового полупроводникового преобразователя**

Модель силового полупроводникового преобразователя, используемая в модели электропривода с ИВСУ СРМНВ представлена на рис. 4.29. Состоит из шести диодов, включенных по трехфазной мостовой схеме, конденсатора, одного силового *IGBT*-транзистора и системы управления.

Структура силовой части модели подробно рассмотрена в предыдущих параграфах

Созданная ранее в программе *ANSYS Maxwell*, конечно-элементная модель электромеханического преобразователя интегрируется в модель системы управления, созданной в программе *ANSYS Simplorer*. Расчет производится для обеих моделей одновременно (рис. 3.7). Электрическая машина получает питание от сети с симметричной трехфазной системой напряжений. Сигнал задания скорости подаётся на вход системы управления. Величина электромагнитного момента, развиваемого машиной, зависит от сигнала с выхода регулятора скорости. Текущее положение ротора определяется с помощью датчика скорости – энкодера. В разработанной модели предусмотрена возможность имитации статической нагрузки на вал двигателя.

Для формирования отпирающего сигнала на управляемый силовой ключ необходима точная информация о текущем положении ротора машины. Измерение этого угла в модели осуществляет датчик положения *SM\_ROTВ*. В программе *Maxwell* углы поворота измеряются в радианах. Для удобства работы, в нашей системе управления, необходимо было преобразовать измеренный угол в градусы. Для решения задач управления не был важен абсолютный угол поворота вала, важно было знать значение угла, изменяющегося в диапазоне от 0 до 360 градусов. По этой причине было

осуществлено преобразование этого измеренного угла в удобную для расчетов форму (градусы), и после каждого полного оборота значение угла обнулялось. Таким образом, угол постоянно менялся в пределах от 0 до 360 градусов, а скорость этого изменения равнялась скорости вращения вала. Такая форма представления этого угла была необходима для его сравнения с углом поворота результирующего вектора напряжения сети (см. рис. 4.30.).

На рис. 4.30 показаны осциллограммы сигналов с выходов элементов системы управления, отвечающих за формирование управляющего сигнала на *IGBT* транзистор. Кривая 1 (*SUM1*) показывает угол поворота результирующего вектора напряжения трехфазной системы напряжений сети. Подробное описание получения величины этого угла приведено ниже. На выходе блока *GAIN1* (кривая 2) формируется сигнал, соответствующий величине угла поворота ротора. Блок *SUM4* (кривая 4) высчитывает разницу между этими двумя углами.

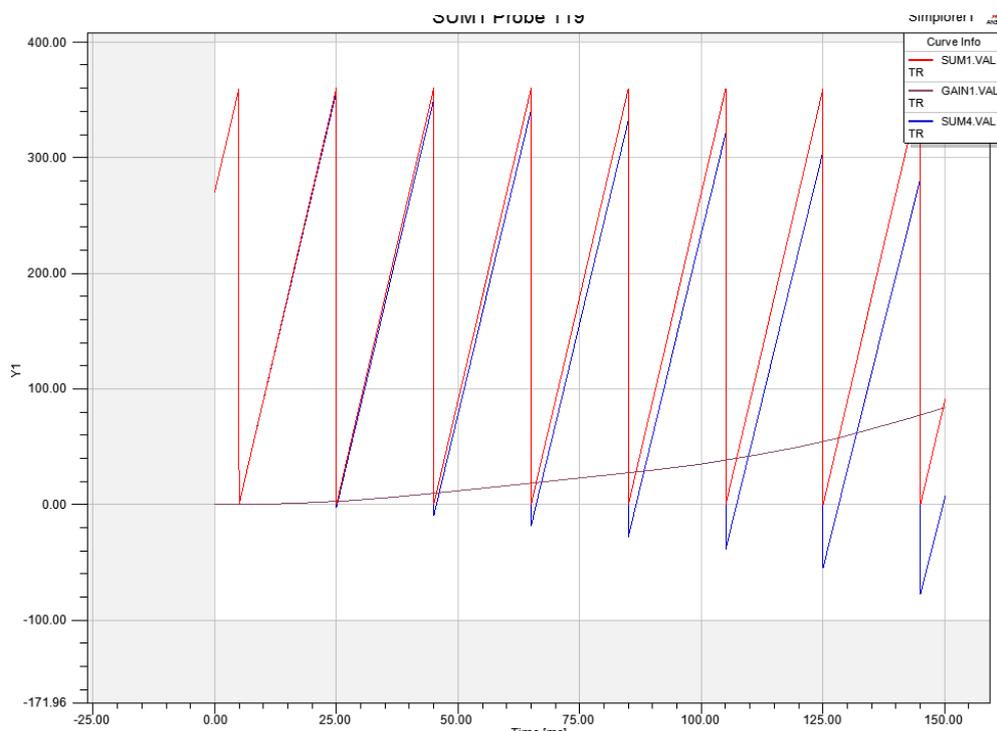


Рис.4.30. Принцип работы узла формирования разницы между углом поворота результирующего вектора напряжений и углом поворота вала двигателя

После прохождения узла формирования разницы углов сигнал подаётся на узел формирования отпирающего импульса *IGBT*. Условием открытия

этого ключа является совокупность следующих условий: 1) разница между углом поворота результирующего вектора напряжений и углом поворота вала двигателя должна лежать в заданных пределах ( $0^\circ < \Delta\alpha < 90^\circ$  или  $180^\circ < \Delta\alpha < 270^\circ$ ); 2) сигнал с датчика тока не превышает значения заданного в блоке ограничения. При выполнении всех условий транзисторный ключ открывается, и по силовой цепи начинает течь ток от источника питания через фазные обмотки машины. Осциллограмма тока, протекающего через транзистор показана на рис. 4.31.

Осциллограмма тока в фазе А приведена на рис. 4.32.

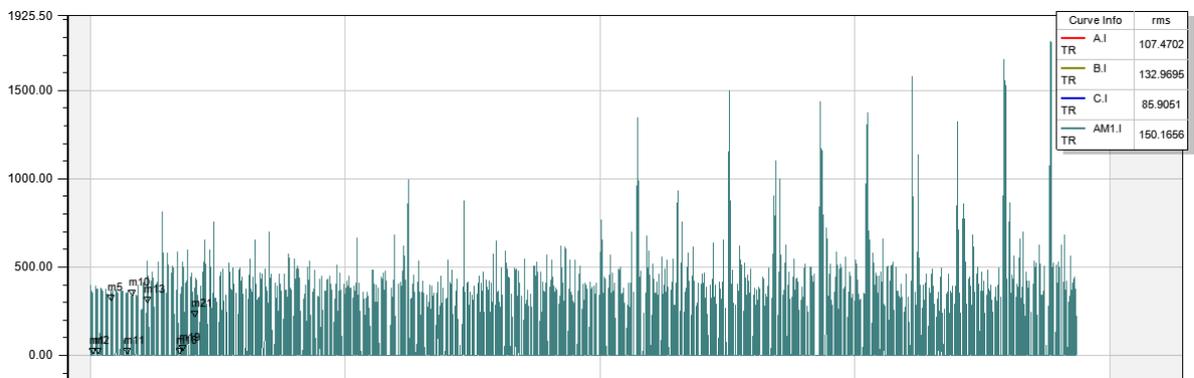


Рис. 4.31. Осциллограмма тока, протекающего через транзистор

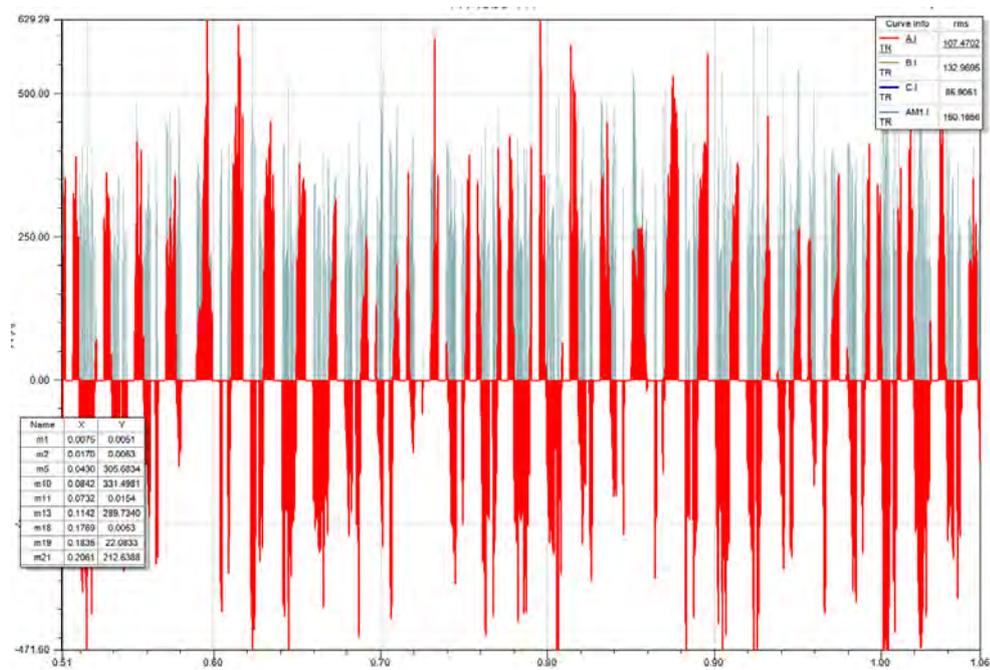


Рис. 4.32. Осциллограмма тока, протекающего в фазной обмотке машины

Нагрузочные диаграммы работающей модели ИВСУ с СРМНВ приведены на рис. 4.33. Можно отметить импульсных характер кривой момента, вследствие чего наблюдается «ступенчатый» набор скорости двигателем.

Исследования также проводились на модели многофазной ИВСУ с СРМНВ. На рис. 4.34 приведен пример двенадцати фазной модели.

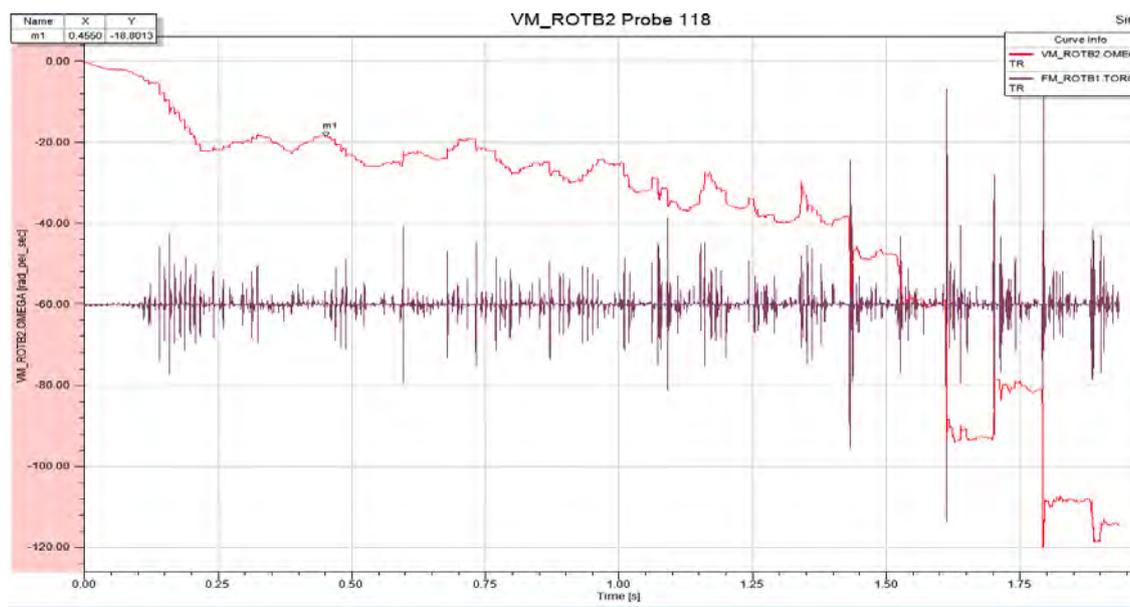


Рис. 3.4.33. Нагрузочные диаграммы работы ИВСУ СРМНВ

### 4.3.3. Преобразование Кларка

Исходя из принципа работы схемы, для правильного коммутирования транзисторного ключа, необходимо знать пространственное положение суммарного вектора напряжения питающей сети. Для нахождения этого положения (угла поворота вектора  $U_s$ ) в модели использовалось преобразование Кларка [40, 1, 15, 68,69].

Напряжения, токи, а также потоки в двигателях переменного тока могут быть представлены как векторы в некоторой системе координат. В зависимости от вида системы координат, графическое представление процессов, происходящих в двигателе, будет иметь различный вид.

Рассмотрим неподвижную трехфазную систему координат. Данная система позволяет изобразить процессы, происходящие в обмотках двигателя на плоскости. При переходе к такой системе токи, напряжения и потокосцепления будут представлены в виде вращающихся векторов (рис. 4.35)

Трехфазное напряжение в обмотках статора двигателя можно представить в виде вектора  $U_s$ , для которого справедливы свойства:

- Амплитуда вектора равна амплитуде напряжения в фазе ( $U_s$ );
- Начало вектора совпадает с началом координат;

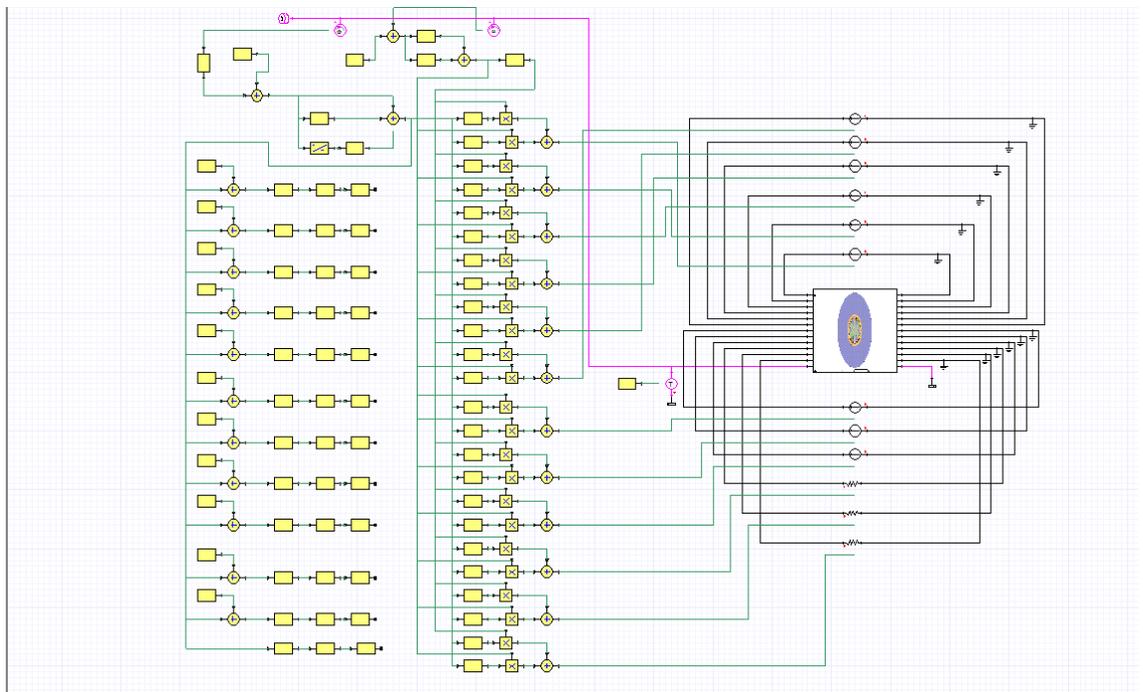


Рис. 4.34. Двенадцати фазная модель ИВСУ СРМНВ

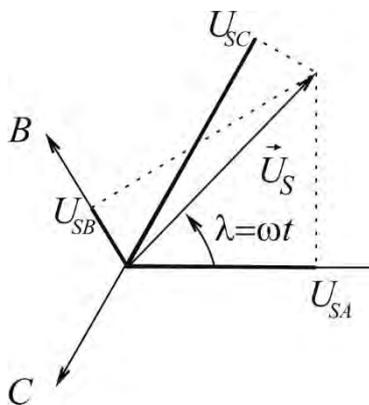


Рис. 4.35. Неподвижная трехфазная система координат

- Вектор вращается на плоскости вокруг начала координат с угловой скоростью, соответствующей частоте переменного тока ( $\omega=2\pi f$ ).

При вращении этого вектора с частотой  $\omega$  его проекции на соответствующие оси будут

меняться по синусоидальному закону, при этом между синусоидами в каждой фазе будет сохраняться угол в 120 градусов.

$$\begin{aligned}
 U_{SA} &= U_S \cos \lambda = U_S \cos \omega t \\
 U_{SB} &= U_S \cos(\lambda - 120^\circ) = U_S \cos(\omega t - 120^\circ) \\
 U_{SC} &= U_S \cos(\lambda - 240^\circ) = U_S \cos(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}$$

Так как система является трехфазной симметричной, то для проекций вектора  $U_S$  на оси координат будет всегда выполняться условие:

$$U_{SA} + U_{SB} + U_{SC} = 0$$

Неподвижная трехфазная система координат ориентирована по статору, а ее оси совпадают с электрическими осями соответствующих обмоток двигателя.

Для определения угла поворота  $\lambda$  вектора  $U_S$  удобно перейти от трёхфазной системы в декартову (двухфазную). Такой переход в литературе называется преобразованием Кларка (см. рис. 4.36). Воспользуемся соотношениями прямоугольных треугольников, а также формулой для косинуса разности углов, (см. рис. 3.17.) запишем:

$$\begin{cases}
 -U_{SC} = U_S \cos(60^\circ - \lambda) = U_S \left( \frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right) \\
 U_{SB} = U_S \cos(120^\circ - \lambda) = U_S \left( -\frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right)
 \end{cases}$$

Выразив из суммы этих уравнений  $U_S$ , получим

$$U_S = \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3} \sin \lambda}$$

Сдругой стороны, (рис.3.17.)

$$U_{S\beta} = U_S \sin \lambda$$

Следовательно, можно записать

$$U_{S\beta} = \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3}}$$

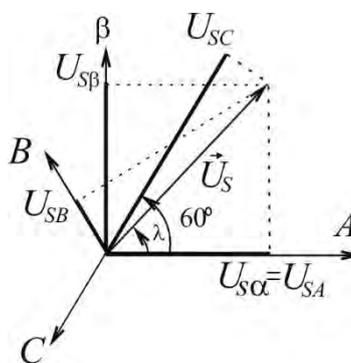
Таким образом, формулы координатных преобразований при переходе из трехфазной системы в двухфазную выглядят так:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = U_{SA} \\ U_{S\beta} = \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

Или (учитывая, что  $U_{SA} + U_{SB} + U_{SC} = 0$ ) так:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = U_{SA} \\ U_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{SA} + \frac{2}{\sqrt{3}}U_{SB} \end{cases}$$

Формула для определения искомого угла:



$$\lambda = \arctg \frac{U_{S\beta}}{U_{S\alpha}}$$

Формулы обратного преобразования координат из системы  $\alpha\beta$  в систему  $ABC$ , приведены ниже:

Рис. 4.36. Декартова система координат  $\alpha\beta$

$$\begin{cases} U_{SA} = U_{S\alpha} \\ U_{SB} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_{S\beta} - \frac{1}{2}U_{S\alpha} \\ U_{SC} = -\frac{1}{2}U_{S\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{S\beta} \end{cases}$$

Преобразование Кларка было смоделировано в системе, созданной в программном продукте *MATLAB* (рис. 4.37), а затем и в *Simplorer* (рис 4.38).

### 3.5. Оценка адекватности разработанной математической модели

Оценку адекватности математической модели принято производить сравнением результатов моделирования с результатами физических экспериментов. На первом этапе оценки адекватности были сопоставлены расчетные кривые магнитной индукции, полученные на математической модели с данными, полученными на физическом образце электропривода с

СРМНВ. Эти результаты сравнивались с результатами, отраженными в работах Горожанкина А.Н. и Копылова И.П. [19, 77]. В теории электрических машин принято, что индукция в магнитопроводе не должна превышать следующих значений: в зубцах не более 1,9 Тл, в спинке статора не более 1,6 Тл, в зазоре не выше 2,1 Тл и в роторе не более 1,4 Тл. Это экспериментальные данные, полученные Копыловым И.П. по условиям нагрева электрической машины. Математический расчет моделей СРМНВ и АД в номинальных режимах работы показал, что величина индукции лежит в допустимых пределах. Можно отметить соответствие картин магнитных полей и величин магнитной индукции, полученных на математических моделях, выполненных в программном продукте *Maxwell*, с реальными электрическими машинами. На основании этого можно говорить об адекватности предложенных моделей.

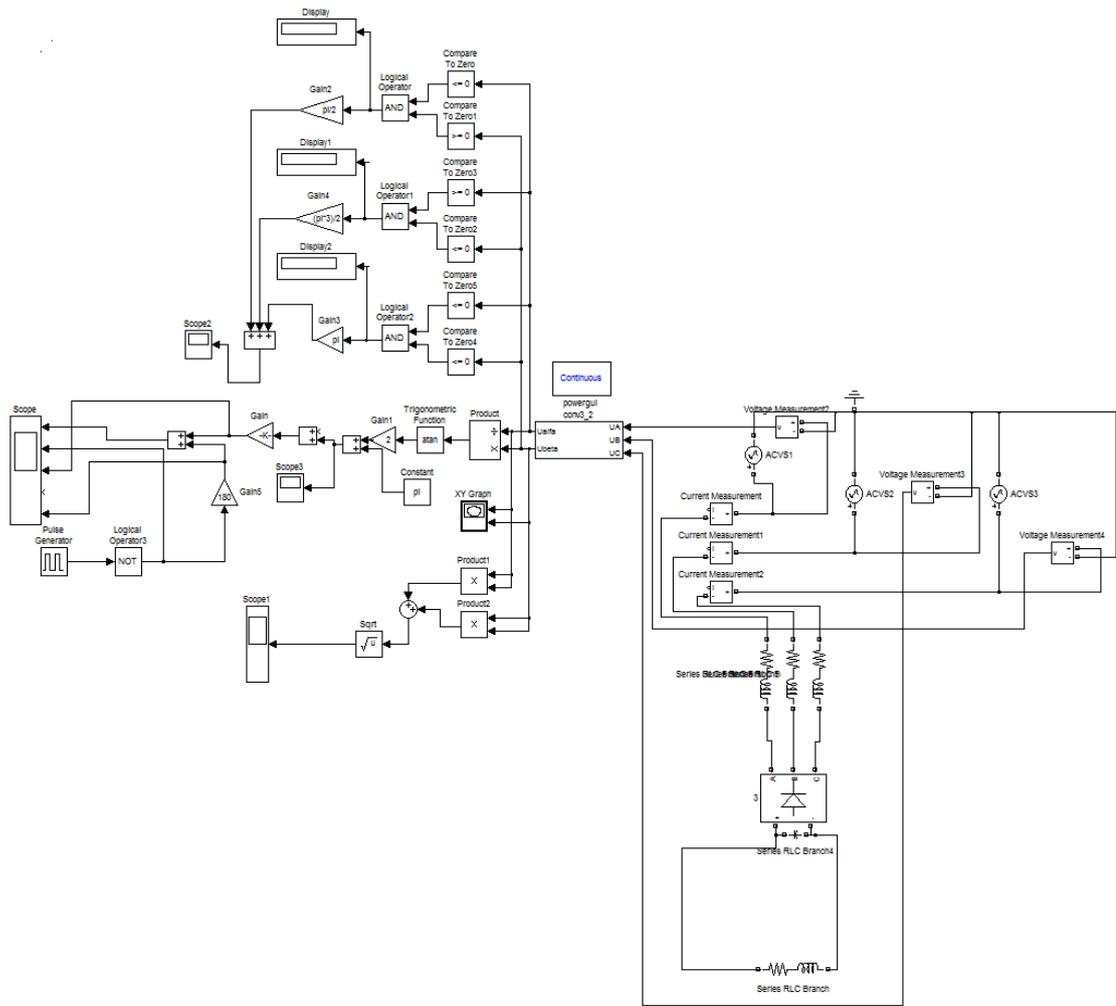


Рис.4.37 Модель в *Matlab* реализующая преобразование Кларка.

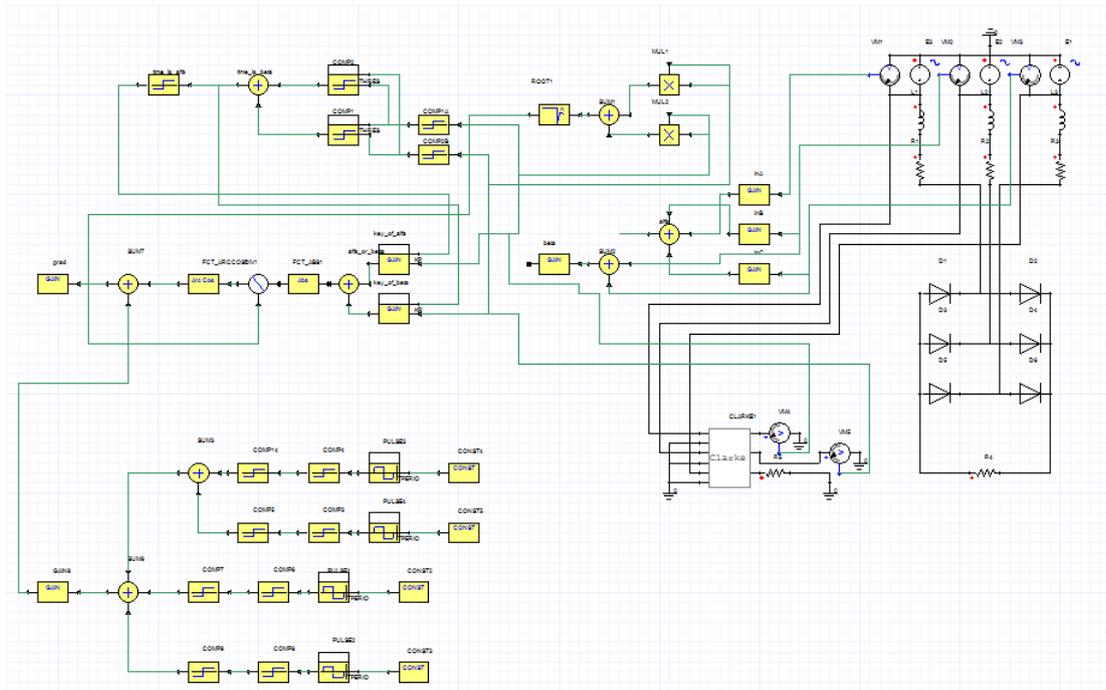


Рис. 4.38. Модель в *Simplorer*, реализующая преобразование Кларка.

На втором этапе оценка адекватности математической модели производилась сравнением угловых и моментных характеристик электрических машин в диапазоне мощностей от 2 до 100 кВт, полученных экспериментально и аналогичных зависимостей, полученных на модели. Под угловой характеристикой понимают зависимость электромагнитного момента на валу двигателя от угла поворота ротора при постоянном токе статорных обмоток. Под моментной характеристикой понимают зависимость среднего электромагнитного момента, создаваемого машиной, от тока.

На модели были сняты угловые характеристики для нескольких асинхронных машин серий 4А и АИР и для СРМНВ, выполненной в корпусе асинхронного двигателя 4А100L2УЗ. Для нескольких машин были произведены физические эксперименты. На статорные и роторные обмотки асинхронных двигателей подавался постоянный ток. Далее вал двигателя вращали с помощью закрепленного на нем рычага. Производилось измерение усилия, требуемого для поворота вала на заданный угол, с помощью динамометра. На основании полученных значений строились зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора – угловые характеристики. Сходимость экспериментальных данных с данными, полученными на математических моделях, составила 95%.

Для сравнения моментных характеристик поступали аналогичным образом. На математической модели получали зависимость развиваемого машиной электромагнитного момента от величины протекающего по обмоткам статора тока. На физических установках электроприводов производились измерения зависимости электромагнитного момента от тока для асинхронных двигателей и СРМНВ. Физический эксперимент заключался в следующем. Ротор машины устанавливался в фиксированное положение, соответствующее номинальному углу нагрузки. Далее, на статорную обмотку подавалось постоянное напряжение, и изменялось действующее значение постоянного тока. При этом к рычагу, закрепленному

на валу машины, был прикреплен динамометр, который измерял усилия, необходимые для удержания вала машины в исходном состоянии. На рис. 4.39 приведены моментные характеристики, полученные в результате моделирования и снятые экспериментально на лабораторных стендах. Несовпадение характеристик в зоне малых моментов (близких к нулю) объясняется тем, что при проведении физического эксперимента, используемые приборы не позволяли с большой точностью фиксировать небольшие усилия на валу двигателя. Напротив, в зонах больших моментов (перегрузок) расхождение полученных зависимостей обусловлено неучётом полей рассеивания в моделях электрических машин.

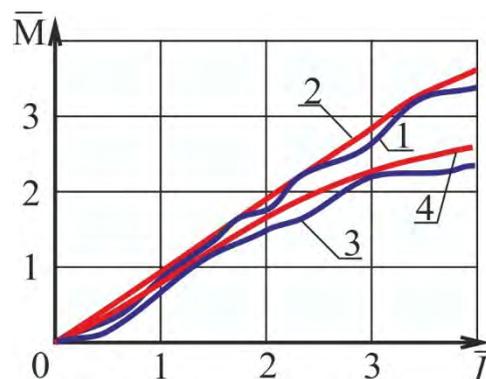


Рис. 4.39. Моментные характеристики

СРМНВ: 1 – экспериментальная, 2 – полученная на модели; и АД: 3 – экспериментальная, 4 – полученная на модели

#### 4.3.4. Описание особенностей ввода резерва в схеме импульсно-векторного управления

Высокая эффективность работы кислородно-конверторного цеха обеспечивается, прежде всего, обоснованным составом технических средств, материальных ресурсов и персонала. Оптимальное формирование электротехнического комплекса цеха обеспечивает поточность выполнения все технологических операций. На всем цикле работы цеха необходим минимальный разрыв между этапами производства.

Выбор рациональной системы электропривода состоит в сопоставлении двух схем по критерию минимума стоимости силового электрооборудования [23,49]. По методикам, представленным в предыдущих главах, произведен расчет стоимости электропривода (электродвигателя и преобразователя

частоты) из условия обеспечения заданной вероятности безотказной работы.

Для сопоставления может быть выбрана схема с импульсно-векторным управлением. При расчете определяется не только стоимость оборудования, но и находится оптимальное количество фаз  $m$  электрического преобразователя и двигателя. Стоимость электрического преобразователя включает в себя затраты на основной преобразователь, который выбирается по номинальной мощности и резервный модуль мощностью  $p/m$ , где  $p$  – номинальная мощность электропривода [60, 59, 31,16]. При расчете стоимости электрической машины необходимо учитывать не только заданную вероятность безотказной работы  $P$ , но и учесть снижение полезной мощности двигателя в зависимости от выбранного количества фаз  $m$ .

При использовании ИВСУ с СРМНВ появляется возможность простого и надежного резервирования ввиду особенностей конфигурации схемы. Вся система компактна и не занимает много места в шкафах управления. Есть возможность резервирования всей силовой части. Данное решение отличается низкими капитальными и эксплуатационными затратами, высокой практичностью и отсутствием необходимости прерывать технологический процесс.

Очевидно, что ввод резерва отказавшего элемента системы электропривода целесообразен в том случае, если время на устранение причины отказа  $t_{уп}$  будет больше времени, затрачиваемого на замену  $t_{зам}$ . Модуль полупроводникового преобразователя, включающий в себя шесть диодов, конденсатор и транзистор, может быть заменен в течение 5-10 минут, благодаря простоте схемы. Необходимо произвести, по сути, переключение трех концов кабеля. На время переключений, заслонку коллектора закрывают для устранения выхода образовавшихся газов обратно в кислородный конвертор или в пространство цеха. За такой короткий промежуток времени температура расплавленной стали не успевает сильно измениться (температурная постоянная времени конвертора достигает нескольких часов),

и отсутствует необходимость сливать металл. Таким образом, по одному из важных надежностных параметров – времени восстановления [46, 75], ИВСУ в силу своей простоты выходит на передовые позиции.

Технический результат резервирования электропривода эксгаустера по схеме импульсно-векторного управления заключается в повышении надежности работы эксгаустера, экономии материальных и энергетических ресурсов.

Для электроприводов крупных мощностей (от 1000 кВт и выше) с непрерывным графиком нагрузки и повышенными требованиями по надежности при выборе рациональной системы ряд традиционных структур электроприводов должен быть дополнен новыми техническими решениями на базе многофазных схем силовых цепей. В силу своей функциональной простоты эти решения будут отличаться повышенной надежностью.

#### **4.4. Выводы по главе 4**

1. Благодаря применению ИВСУ СРМНВ значительно с ( $P=0,9$  до  $P=0,98$ ) возрастает надежность электрического преобразователя. Происходит это по нескольким причинам. При применении СРМНВ нет необходимости в возбуждении обмоток ротора машины, и, следовательно, можно отказаться от возбудителя как элемента системы управления, от контактных колец и щеточно-коллекторного контакта. Повышенная механическая прочность ротора снижает вибрации, что положительно сказывается на работе подшипников двигателя. Наконец наличие всего одного IGBT транзистора в схеме силовых цепей преобразователя также повышает надежность электропривода.

2. Разработана математическая модель электропривода на базе синхронной реактивной машины с независимым возбуждением с импульсно-векторной системой управления, обеспечивающая надежную работу

электропривода, позволяющая выполнить расчёт различных режимов работы электропривода, отличающаяся тем, что для коммутации фазных токов цепи нагрузки используется всего один *IGBT* транзистор.

3. Выяснение и обоснование наиболее целесообразного объема резерва показало, что в условиях кислородно-конверторного цеха (близкое расположение однотипных агрегатов, простая схема полупроводникового преобразователя) наиболее эффективен выбор в качестве резерва на всю группу электроприводов эксгаустеров одного полупроводникового преобразователя с импульсно-векторным управлением.

4. Показано, что все переключения, связанные с вводом резерва полупроводникового агрегата, возможны без прерывания технологического процесса.

5. Для реализации повышенных показателей надежности и экономичности потребовались некоторые изменения в конструкции синхронной реактивной машины. Наиболее значимыми, на наш взгляд, явились возврат к обмоткам статора с полным шагом и многофазность цепей питания статора.

## Заключение

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – создание методика оптимизации схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей, содержащая этапы выбора конфигурации схем силовых цепей по критерию минимума полупроводниковых ключей, выбора оптимальных количества фаз и резервных узлов, и отличающаяся принятым критерием – вероятностью безотказной работы. В отличие от существующей методики минимизации относительного ущерба, предложенная методика позволяет сэкономить средства на установленное оборудование. Наибольший эффект от применения методики наблюдается при значениях коэффициента отношения относительной цены к относительному току преобразователя больших единицы.

Разработана математическая модель синхронных электроприводов, в которой параметры электрической машины представлены распределенными, полупроводниковый преобразователь – безынерционным звеном, и отличающаяся тем, что узел формирования фазных токов реализовывал пуско-тормозные режимы, что позволило уточнить осциллограмму тока при реализации интенсивных процессов пуска технологических объектов.

Предложена математическая модель системы электропривода на базе синхронной реактивной машины с независимым возбуждением с импульсно-векторной системой управления, обеспечивающая надежную работу электропривода, позволяющая выполнить расчёт различных режимов работы электропривода, отличающаяся тем, что для коммутации фазных токов цепи нагрузки используется всего один IGBT транзистор.

Результаты, полученные в ходе выполнения работ были приняты к внедрению в ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск) при разработке электроприводов компрессорных установок, а разработанные

математические модели применяются в учебном процессе на кафедре электропривода ФГАО ВО “Южно-Уральский государственный университет”.

## Литература

1. Алексеев, В.В. Выбор системы координат при реализации алгоритма векторного управления асинхронным электроприводом / Алексеев В.В., Козярук А.Е., Рудаков В.В., Язев В.И. // Электротехника. – 2010 – № 12. – С. 2 – 10.
2. Андриюшин, И.Ю. Опыт и перспективы внедрения частотно-регулируемых электроприводов в ОАО «ММК» / И.Ю. Андриюшин, В.В. Головин, А.В. Косенков. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011 - № 3. - С. 5-8.
3. Анучин, А.С. Система управления с прогнозированием для реализации контура тока предельного быстродействия / А.С. Анучин // Труды МЭИ. Электропривод и системы управления. Вып. 686. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 69 – 76.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенский. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
5. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание: Математический подход. / Ф. Байхельт, П. Франкен – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
6. Беспалов, В.Я. Основные направления совершенствования конструкций и технологии производства асинхронных двигателей / В.Я. Беспалов, Л.Н. Макаров // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. Санкт-Петербург. – 2007. – С. 32–36.
7. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: тр. IV Международной (XV Всероссийской) конф. по

автоматизированному электроприводу (АЭП–2004, Магнитогорск, 14–17 сент. 2004 г.). – Магнитогорск, 2004. – Ч. 1. – С. 24–31.

8. Беспалов, В.Я. Электрические двигатели в XXI веке / В.Я. Беспалов // Тр. III Международной (XIV Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “ЭАП–2001” / под. ред. С.В. Хватова. – Н. Новгород: Вектор–ТиС, 2001. – С. 17 – 19.

9. Беспалов, В.Я. Электрические машины. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр “Академия”, 2006. – 320 с.

10. Бычков, М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учётом локального насыщения магнитной системы /М.Г. Бычков// Электричество. – 1998 – №6. – С. 50 – 53.

11. Бычков, М.Г. Новые направления развития регулируемых электроприводов / М.Г. Бычков, В.Ф. Козаченко, Л.М. Миронов и др. // Приводная техника. – 1997 – №5. – С. 23 – 25.

12. Бычков, М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно- индукторного электропривода: дис. - докт. техн. наук / М.Г. Бычков. – М., 1999. – 372 с.

13. В.Р. Матвеевский. Надежность технических систем. Учебное пособие.

14. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1969. – 506 с.

15. Виноградов, А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками / А.Б. Виноградов // Электричество. – 2003 – №6. – С. 43 – 52.

16. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

17. Головин, В.В. Опыт внедрения современных электроприводов в

ОАО «ММК» / В.В. Головин, А.В.Косенков, В.П. Разворотнев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 149-156.

18. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – М.: «Академия», 2010. – 288с.

19. Горожанкин, А.Н. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук : Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. Горожанкин, А.Н. – Челябинск , 2010. – 138 с.

20. ГОСТ 19523-81 Машины электрические вращающиеся от 50 до 355 габарита. Двигатели асинхронные серии 4А трехфазные с короткозамкнутым ротором. Технические условия.

21. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике».

22. Гребенник, В.Н. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности): Справочник. / В.Н. Гребенник, В.К. Цапко – М.: Металлургия, 1980.

23. Григорьев М.А. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения с предельными характеристиками по быстродействию и перегрузочным способностям: дис.- докт. техн. наук: Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. / Григорьев М.А. – Челябинск , 2014. – 315 с.

24. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография / М.А. Григорьев; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 159 с.

25. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013 – № 4. – С. 32 – 36.

26. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной

независимого возбуждения: дис. - канд. техн. наук / М.А. Григорьев. – Челябинск, 2004. – 138 с.

27. Дементьев, Ю.Н. Математическое описание электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в установившемся режиме/ Дементьев Ю.Н./ Электричество, 2012. № 06. С. 36-42.

28. Дмитриевский В.А. Высокомоментная вентильно-индукторная реактивная электрическая машина с разделением ФАЗ, Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., патент на полезную модель RUS 106460 28.02.2011.

29. Дмитриевский В.А. Конечноэлементная модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы/ Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Климарев В.А., Электротехника, 2012. № 03. С. 7-13.

30. Дмитриевский, В.А. Математическая модель вентильно-индукторной реактивной электрической машины/ Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Климарев В.А. //Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011 - № 10. - С. 60.

31. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.

32. Жиркин, Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин / Жиркин Ю.В. – Магнитогорск, МГТУ, 2002.

33. Журавлев, А.М. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Журавлев А.М., Белоусов Е.В., Бычков А.Е., Кодкин В.Л., Гладышев С.П. //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012 – № 37 (296). – С. 34 – 37.

34. Залогин, О.А. Реконструкция электропривода эксгаустера агломашины аглофабрики №2 аглоцеха ГОП ОАО «ММК»/ О.А. Залогин, С.А. Линьков, А.А. Радионов// Наука и производство Урала. – 2009 - №5. -

С.4 – 8.

35. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие / Г.С. Зиновьев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.

36. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 1. Описательная статистика. Теоретико-вероятностные основания статистического вывода/ О.В. Иванов. - М. 2005. - 187 с.

37. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 2. Доверительные интервалы/ О.В. Иванов. – М. 2005. – 220 с.

38. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электромеханических машинах. В двух томах / А.В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 652 с.

39. Каганов, В.Ю. Автоматизация металлургических печей / Каганов В.Ю., Блинов О.М., Глинков Г.М. – М.: «Металлургия», 1975. – 376 с.

40. Калачев, Ю.Н. Векторное регулирование - заметки практика / Калачев Ю.Н.: Самиздат, 2012. – 52с.

41. Калявин, В.П, Надежность и диагностика / Калявин В.П. – СПб., «ЭЛМОР», 1998. – 230 с.

42. Карандаев, А.С. Частотно-регулируемый электропривод с электропитанием от двух независимых вводов / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, В.Р. Храмшин / Электротехника. – 2015 - № 4. - С. 41–48.

43. Козаченко, В.Ф. Перспективная микропроцессорная элементная база и опыт разработки современных систем управления электроприводами и силовыми преобразователями энергии / В.Ф. Козаченко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч.2. – С. 14 – 28.

44. Козина Т.А. Система импульсно-векторного управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором и косвенным

определением углового положения ротора: дис. – канд. тех. наук. / Т.А. Козина – Челябинск, 2012. - 192с.

45. Кононенко, Е. В. Синхронные реактивные машины / Е. В. Кононенко. – М. : Энергия , 1970. – 208 с.

46. Конюхова, Е.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева // Энергетик. – 2001 - №12 (36).

47. Коряков, Д.В. О повышении надежности работы асинхронных электродвигателей малой мощности / Д.В. Коряков, Л.В. Савицкий, Ю.Н. Зубков // Электробезопасность. – 2008 - №1. – С. 8 – 10.

48. Красовский, А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: дис.- д-ра техн. наук / А.Б. Красовский. – М, 2003. – 317 с.

49. Лапшин, Ю.А. Влияние временного резервирования на эксплуатационную надежность технологического комплекса/ Лапшин Ю.А.// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985 - №7. - С.17-19.

50. Левин, М.А. Повышение эффективности использования сельскохозяйственных электроприводов за счет оптимизации запаса мощности асинхронных двигателей: дис. – канд. тех наук. Специальность: Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве. / М.А.Левин. – Саратов, 2004. - 132с.

51. Лимонов, Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов: монография / Л.Г. Лимонов. – Харьков., 2009. – 266с.

52. Лозинский, О.Ю., Паранчук Я.С. Оптимизация режимов системы управления процессом электросталеплавления в дуговых сталеплавильных печах. / О.Ю. Лозинский, Я.С. Паранчук //Электротехника. - 2004. - №6. - С. 50 - 54.

53. Маурер, В.Г. Средства частотного анализа элементов, устройств и систем управления вентильных электроприводов: Учебное пособие/ В.Г. Маурер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – 120 с.

54. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: монография. / А.М. Бигеев., В.А. Бигеев. – Изд. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2000. – 544с.

55. Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя/ В.В. Купцов, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2010 - №14 (190). - С.57 - 60.

56. Методика расчета электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. Сборник №17. – С.43 – 47.

57. Многодвигательный электропривод тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок / Лукьянов, С.И., Фомин, Н.В., Хлыстов. А.И. // Труды XV международной научно-технической конференции: Электроприводы переменного тока. – Екатеринбург, 2012. – С. 305 – 308.

58. Монюшко, Н. Д. Добавочные потери на поверхности массивных полюсных наконечников явнополюсных синхронных машин / Автореф. дис. канд. техн. наук // Ленинград.политех. ин-т им. М. И. Калинина: – 1967. – 17 с.

59. Надежность в машиностроении: Справочник. Под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719.

60. Надежность технических систем: Справочник . Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

61. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники/ Л.Р. Нейман, К.С. Демерчан. – Изд. 2-е, стереотип. – Л.: Энергия, 1975. – Т1. – 522 с.

62. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин,

М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Известия ТулГУ. Технические науки – 2010. – Вып. 3. – Ч.4. – С.71 – 76.

63. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, КМ. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении: сб. науч. тр. междунар. конференц. -Магнитогорск, 2008. - С. 156-162.

64. Носов, А.Д. Производство анизотропной трансформаторной стали в кислородно-конвертерном цехе ММК /Носов А.Д.// Вестник МГТУ. 2005 – № 1 (5). – С.9–12.

65. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.С. Герасимов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2003. – Вып. 3. – № 11(27) – С. 80 – 83.

66. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев и др. // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 31 – 34.

67. Панкратов, В.В. Бездатчиковый асинхронизированный синхронный электропривод с векторным управлением / В.В. Панкратов В.В., Д.А. Котин // Электротехника. – 2009. – №12. – С. 13 – 19.

68. Панкратов, В.В. Метод многокритериальной оптимизации алгоритмов векторного управления асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002 – № 2. – С. 44 – 49.

69. Панкратов, В.В. Многокритериальная оптимизация систем векторного управления асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Электричество. – 2002 – № 4. – С. 40 – 46.

70. Пат. 2240640 Российская Федерация, МПК Н 02 G 1/02. Синхронный реактивный генератор автономной энергетической установки и способ управления им / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. – № 2003118611/09; заявл. 20.06.03; опубл. 20.11.04, Бюл. №32.

71. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685 заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.

72. Пат. 2408967 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009146993/07(066964) заявл. 17.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

73. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 25/08, Н 02 Р 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009148381/07(071468) заявл. 24.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

74. Пат. 2510877 Российская Федерация, МПК Н02Р27/04. Электропривод с синхронной реактивной машиной / Усынин Ю.С., Горожанкин А.Н., Бычков А.Е., Белоусов Е.В., Журавлев А.М. – № 2012143554/07; заявл. 11.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

75. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПУЭ. Издание седьмое.

76. Прахт В.А. Компьютерное моделирование электрической машины с постоянными маг-нитами на статоре /Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н., Климарев В.А. Дистанционное и виртуальное обучение. 2011. № 11. С. 63-78.

77. Проектирование электрических машин: учебн. для вузов. / И.П.

Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Изд. Юрайт, 2011. – 767 с.

78. Производство стали. Методика выплавки: учебн. пособие. / В.П. Расщупкин., М.С. Корытов. – Изд. СибАДИ, 2007. – 39с.

79. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / Проников А.С. – М.: МГТУ, 2003.

80. Путов В.В. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления линейными объектами / В.В. Путов, В.Н. Шелудько, К.Ч. Нгуен, Е.В. Белградская // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2011. № 7. С. 71-80.

81. Путов В.В. Прогнозные характеристики развития направления «мехатроника, автоматизация, управление / В.В. Путов, О.Ю. Белаш, О.Е. Веремьева, Е.Б. Кивит, Н.Г. Рыжов // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2013. № 6. С. 85-93.

82. Решетов, Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, С.А. Иванов, В.З. Фадеев – М.: Высшая школа, 1988.

83. Рипс, Я.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. / Я.А. Рипс, Б.А. Савельев. М.: Энергия, 1974. - 248 с.

84. Рымша, В.В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе ANSYS Workbench / Рымша В.В., Радимов И.Н., Баранцев М.В. // Научные журналы НТУ "ХПИ" : Электротехника и электромеханика. – 2006 - №6.

85. Рымша, В.В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе ANSYS Workbench / Рымша В.В., Радимов И.Н., Баранцев М.В. // Научные журналы НТУ "ХПИ": Электротехника и электромеханика №6 - НТУ "ХПИ", 2006.

86. Садовский, Л.А. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода / Л.А. Садовский, В.Л. Виноградов // Электротехника. – 2000. – № 2. – С. 54 – 59.
87. Сарапулов, Ф.Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 11 – 17.
88. Сарапулов, Ф.Н. Особенности моделирования линейных асинхронных двигателей с различными обмотками индуктора на основе детализированных схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.В. Иваницкий, В.В. Гоман // Изв. вузов “Электромеханика”. – 2009. – № 5. – С. 18 – 24.
89. Сидоров, О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. - М.: Энергоатомиздат, 2010 – 331 с.
90. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 492 с.
91. Тахаутдинов Р.С. Опыт реконструкции КУВС в кислородно-конвертерном цехе ОАО "ММК" / Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев, А.Д. Носов и др. // Сб. трудов ЦЖ. Магнитогорск. – 2003 - №7. - С. 20–23.
92. Терзян, А.А. Об углах треугольной сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов / А.А. Терзян, Г.С. Сукиасян, А.Е. Пароникян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2007. - Т. LX. - № 3. - С.523-532.
93. Токарев, А.О. Влияние механизмов на обеспечение надежности и продолжительность жизненного цикла техники / А.О. Токарев, И.Г. Мироненко // Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего востока. – 2015 - №1. – С. 98 – 101.
94. Усынин, Ю. С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, К. М. Виноградов // Электричество. - 2007. - №3 - С. 21-26

95. Усынин, Ю.С. Бесконтактные электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виногорадов, А.Н. Горожанкин, С. А. Чупин // Труды 5 международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2007), Санкт-Петербург, 18-21 сент., 2007. СПб: СПбГПУ, 2007. - С. 192-194.

96. Усынин, Ю.С. Возможности и перспективы электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виногорадов, А.Н. Горожанкин // Наука и технологии. Труды XXVIII Российской школы. - М.: РАН, 2008. - Том 2. - С. 113-122.

97. Усынин, Ю.С. Методика расчета электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виногорадов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. Сборник №17. – С.43 – 47.

98. Усынин, Ю.С. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виногорадов, А.С. Герасимов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2003 – Вып. 3. – № 11(27) – С. 80 – 83.

99. Усынин, Ю.С. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев и др. // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 31 – 34.

100. Усынин, Ю.С. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. –

2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 38-41.

101. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-068-05. "Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования". (утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 декабря 2005 г. N 25).

102. Хакимьянов М.И. Современные частотно-регулируемые электроприводы скважинных насосов / М.И. Хакимьянов, З.Х. Павлова // Нефтепромысловое дело. 2012. № 6. С. 29-34.

103. Хакимьянов М.И. Спектральный состав выходных напряжений высоковольтных преобразователей частоты / М.И. Хакимьяно, В.М. Сапельников // Нефтегазовое дело. 2012. № 10-2. С. 82-86.

104. Храмшин, В.Р. Регулируемый электропривод как средство энергосбережения в гидравлических системах насосных агрегатов / В.Р. Храмши, О.И. Карандаева, Ю.И. Мамалеева, О.И. Петухова // Электротехнические системы и комплексы. – 2012 - №12. С. 354-360.

105. Цытович, Л.И. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2 (34). – С. 35 – 41.

106. Цытович, Л.И. Элементы и устройства систем управления тиристорными преобразователями: Учебник для ВУЗов // Л.И. Цытович, В.Г. Маурер – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – 274 с.

107. Чебоксаров А.Н. Основы теории надежности и диагностика: курс лекций / А.Н. Чебоксаров. – Омск: СибАДИ, 2012.

108. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебн. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

109. Шенфельд, Р. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. /

Р. Шенфельд, Э. Хабигер; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

110. Шишко, В.Б. Надежность технологического оборудования / В.Б. Шишко, Н.А. Чиченев. – М.: Изд. дом МИСиС, 2012.

111. Ястребецкий, М.А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами / М.А. Ястребецкий, Г.М. Иванова – Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.

112. <http://lektsii.org/1-25606.html>

113. [http://revolution.allbest.ru/radio/00225055\\_0.html](http://revolution.allbest.ru/radio/00225055_0.html)

114. <http://vidoz.pp.ua/video/r17hcDX8P5p.html>

115. Grigorev, M. System of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine/ M. Grigorev // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Volume 84. Issue 10. P. 560 – 565.

116. Grigorev, M.A. The electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine / M. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №1. – С. 118 – 123.

117. <http://privod.szemo.ru/category/preobrazovateli-chastoty/company/>

118. <http://velta-c.ru/catalog/air/>

119. <http://www.compel.ru/catalog/transistors/igbt-modules/>

120. [http://www.kit-e.ru/articles/powerel/2003\\_8\\_48.php](http://www.kit-e.ru/articles/powerel/2003_8_48.php)

121. [https://library.e.abb.com/public/fd2074bf08933e70c12572b40039e763/5SNR%2010H2501\\_5SYA1580-03May%2007.pdf?filename=5SNR%2010H2501\\_5SYA1580-03May%2007.pdf](https://library.e.abb.com/public/fd2074bf08933e70c12572b40039e763/5SNR%2010H2501_5SYA1580-03May%2007.pdf?filename=5SNR%2010H2501_5SYA1580-03May%2007.pdf)

122. Keller, A.V. Development of Algorithms of Rapid Charging for Batteries of Hybrid and Electric Drives of City Freight and Passenger Automobile Transportation Vehicles / A.V. Keller, D.V. Korobotov, E.V. Solomin, D.V. Topolskiy, I.G. Topolskaya // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference (XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015). – Omsk. – 2015.

<http://ieeetpu.ru/files/sibcon2015.html>.

123. Law, D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine /D Law, A. Chertok, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications.– 1998. – Vol. 30. – № 5.– P. 1185 – 1192.

124. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion.– 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 49 – 56.

125. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion.– 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 56 – 62.

126. Lipo, T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines / T. Lipo // Transactions on energy conversion – 1998. – P. 204 – 222.

127. Martyanov, A.S. Development of control algorithms in Matlab/Simulink / A.S. Martyanov, E.V. Solomin, D.V. Korobotov // International Conference on Industrial Engineering. – 23.11.2015. – Chelyabinsk. – Procedia Engineering Journal. - Volume 129, 2015, Pages 922-926 (Journal reference: PROENG27157. PII: S1877-7058(15)03968-5 DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.135.<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815040199>).

128. Pulse Vector Control of Wound Rotor Induction Motor / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov and // SAE Paper 2010-01-0703, SAE 2010 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 13 April 2010 through 13 April 2010; Code 87929.

129. Switching Losses in the Rotor of the Field Regulated Reluctance Machine / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov// SAE Paper 2010-01-0485, SAE 2010 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 13 April 2010 through 13 April 2010; Code 87929.

130. Toliat H. Sensorless Operation of Permanent Magnet AC (PMA) motors with Modified Stator Windings/ Toliat H., Rahman K., Shet D. // IEEE

Transaction on Energy Conversion.– Dec. 1999. – Vol. 14. – P.1004 – 1010.

131. Toliyat H. A Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque / Toliyat H., Xu L., Lipo T.A. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28. – №3. – P. 559 – 667.

132. Toliyat H. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – №4.– P. 748 – 756.

133. Toliyat, H. A DSP-Based Vector Control of Five-Phase Synchronous Reluctance Motor/ H.Toliyat, R. Shi, H. Xu // 0-7803-6404-X/00/\$10.00 (C) 2000. P. 1- 7.

134. Toliyat, H. Analysis and Simulation of Five-Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Airgap MMF / H. Toliyat // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998. P. 332-339.

135. Toliyat, H. Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines / H. Toliyat, N. Al-Nuaim // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. – Vol. 35. – №1. – P. 86 – 93.

136. Usinin, Yu.S. Electric drive with a field-regulated reluctance machine / Yu. S. Usinin, M. Grigorev, A. Shishkov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Volume 84. Issue 3. P. 149 – 154.

137. Vagati A., Franceschini G., Marongiu I., Troglia G.P. Design Criteria of Performance Synchronous Reluctance Motors.// IEEE-IAS Annual Meeting Houston (USA), October 1992.

138. Vagati, A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives / A. Vagati // IEEE Transactions on Energy Conversion – 1998. – P. 223 – 227.

139. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // ETZ Archiv, Bd. 6, 1984. – P. 135 – 144.