

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Р.Е. Алексеева

На правах рукописи



Кудряшов Дмитрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ  
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Смирнов А.Ю.

Нижний Новгород  
2023 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 НАЗНАЧЕНИЕ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.....	10
1.1 Общие положения.....	10
1.2 Состояние вопроса.....	14
1.3 Анализ существующих электромеханических преобразователей в шаговом приводе регулирующих органов.....	23
1.3.1 Четырехстаторный шаговый двигатель с реактивным ротором.	23
1.3.2 Электромеханический преобразователь для устройства контроля движения.....	24
1.3.3 Шаговый двигатель с постоянными магнитами на роторе.....	25
1.3.4 Индукторная машина с подразделенной обмоткой.....	26
1.3.5 Индукторная машина с магнитной асимметрией на роторе	32
1.4 Методики проектирования электромеханических преобразователей.	35
1.5 Основные цели и задачи исследования.....	38
2. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ИМ СУЗ.....	40
2.1 Постановка задачи по модернизации привода .....	40
2.2 Подход к определению базовых размеров электромеханического преобразователя привода РО.....	45
2.3 Проектирование двигателя.....	48
2.4 Разработка генератора для ограничения скорости опускания РО.....	59
2.5 Модель движения привода в режиме опускания РО под действием собственного веса.....	70
2.6 Краткие результаты к главе 2.....	75
3 РАСЧЁТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	77
3.1 Объект и методы исследований.....	77

3.2 Поверочный расчёт и математическое моделирование двигателя .....	80
3.3 Характеристики системы управления электромеханическим преобразователем в приводе с источником тока .....	86
3.4 Исследование влияния формы импульсов на работу шагового привода с индукторным двигателем.....	90
3.5 Исследования генератора.....	98
3.6 Выводы по результатам исследований.....	106
<b>4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ</b>	
<b>КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ .....</b>	<b>108</b>
4.1 Расширение области применения электромеханического преобразователя.....	108
4.2 Разработка линейного двигателя непосредственного привода РО .....	109
4.3 Разработка концептуального генератора для регулирования скорости сброса АЗ .....	113
4.4 Вывод к главе 4.....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>129</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>131</b>
Перечень сокращений.....	142
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> Проектировочный расчёт электродвигателя привода СУЗ.....	<b>143</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b> APDL-программы расчёта характеристик двигателя и генератора.....	<b>150</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3</b> Копии патентов на изобретения, полученных при выполнении работы.....	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4</b> Сведения об использовании результатов диссертации ..	<b>159</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В связи со стремительным увеличением производства и потребления электроэнергии в мире, обусловленным появлением новых производств, климатическими изменениями на планете, растущими бытовыми потребностями населения, и другими факторами особую значимость приобретает ядерная энергетика, как один из наиболее востребованных путей замены ископаемого топлива. Количество стран в мире, строящих и эксплуатирующих атомные электростанции, неуклонно возрастает [1].

Современные ядерные энергетические установки (ЯЭУ), составляющие материальную базу производства электрической и тепловой энергии на атомных электростанциях, включают в себя комплекс различных автоматических систем, которые выполняют функции регулирования, управления, защиты и обеспечения эксплуатационного цикла. К важнейшим из таких систем относятся системы управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов, представляющие собой исполнительные механизмы вертикального перемещения и позиционирования регулирующих органов, управляющих скоростью цепной реакции деления ядерного топлива [2].

Многообразие конструктивной реализации механизмов указанной системы обусловило разработку электротехнических комплексов, основное назначение которых – силовое воздействие на регулирующие органы (РО). Эти комплексы содержат следующие компоненты:

- регулирующие органы, перемещение которых обеспечивает выполнение системой автоматики заданных функций;
- преобразователи движения, которые преобразуют параметры движения привода – траекторию и характер движения, скорость, направление, ускорение, и т.д., в требуемые параметры движения регулирующего органа;
- электроприводы с одним или несколькими электромеханическими преобразователями, преобразующими подводимую электрическую энергию в

энергию механического перемещения подвижных частей привода, характеризуемую заданным уровнем механической мощности и момента (силы);

- преобразователи электрической энергии, преобразующие энергию источника постоянного или переменного напряжения в электрическую энергию на зажимах электромеханического преобразователя с заданными параметрами: напряжением, частотой (частотным диапазоном), числом фаз;

- устройства контроля движения и обратной связи: первичные и вторичные датчики положения, скорости, тока, вспомогательные электромеханические преобразователи (ограничители скорости, электромагнитные и обгонные муфты).

При возникновении чрезвычайных ситуаций большинство моделей эксплуатации ядерных энергетических установок предусматривают ускоренное введение стержней-поглотителей внутрь активной зоны реактора с тем, чтобы остановить или замедлить реакцию деления ядер ядерного топлива [3, 4]. Для этих целей в приводах СУЗ ядерных реакторов используется аварийное опускание регулирующих органов под действием собственного веса. Таким способом реализуется концепция пассивной безопасности.

Повышение безотказности этих устройств, надёжности работы во всех режимах эксплуатации ядерных энергетических установок, продление их ресурса представляют собой приоритетную и весьма важную задачу, безусловно, необходимую для дальнейшего развития атомного энергетического машиностроения.

**Объект исследования** – электротехнические комплексы, предназначенные для перемещения регулирующих органов в составе систем автоматики ядерных энергетических установок.

**Предмет исследования** – электромеханические преобразователи в составе электропривода для перемещения регулирующих органов внутри активной зоны реактора в нормальных и аварийных режимах эксплуатации.

**Цель работы** состоит в совершенствовании характеристик и расширении области применения электромеханических преобразователей энергии,

предназначенных для силового воздействия на регулирующие органы, которые обеспечивают защиту и сопровождение эксплуатационного цикла ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

**Задачи исследования**, решение которых предполагает достижение поставленной цели:

- Провести анализ и выявить перспективные конструкции существующих электромеханических преобразователей в составе электропривода для перемещения регулирующих органов ядерных реакторов с целью определения возможных путей их совершенствования, а также обеспечения более широких возможностей по отработке заданного закона движения РО при обесточивании привода СУЗ в режиме аварийной защиты;

- Разработать методики проектирования перспективных электромеханических преобразователей, а также предложить математическое описание и специальное ПО, позволяющее выполнять проектирование, моделирование и численный анализ с использованием расширенных возможностей современной вычислительной техники и пакетов прикладных программ;

- Спроектировать, изготовить, провести численные и натурные исследования компонентов перспективной конструкции электромеханического преобразователя. На основании численных и натурных исследований подтвердить достоверность разработанных методик проектирования, а также численного анализа двигателя и генератора;

- Предложить технические решения, которые позволяют расширить область применения электромеханических преобразователей в приводах компенсирующей группы (КГ) и аварийной защиты (АЗ).

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- 1) предложено для движения регулирующих органов по заданному закону в режиме аварийной защиты, использовать отдельный электромеханический преобразователь с постоянными магнитами на роторе, работающий на третьей гармонике поля якоря. На данный электромеханический преобразователь получен патент на изобретение;

2) разработаны усовершенствованные методики проектирования и компьютерного моделирования электромеханических преобразователей индукторного типа и с постоянными магнитами на роторе, работающих на третьей гармонике поля якоря;

3) в программной среде ANSYS (APDL) создана компьютерная программа генерации сеточных моделей электромеханических преобразователей методом конечных элементов, расчёты по которой позволили проверить и подтвердить правильность разработанных методов проектирования и математического моделирования;

4) предложены и проанализированы дополнительные конструкции электромеханических преобразователей, использование которых обеспечивает расширенные возможности по достижению заданного закона движения РО.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в обосновании и разработке:

- устройств, позволяющих повысить быстродействие электропривода вертикального перемещения регулирующего органа при переходе в режим аварийной защиты путём отсоединения от источника электрической энергии;

- математических моделей для проведения численных исследований при проектировании устройств, применение которых повышает быстродействие работы привода вертикального перемещения РО в режиме аварийной защиты;

- математических моделей, позволяющих выполнять поверочные расчёты спроектированных двигателей методом конечных элементов;

- материала для опытно-конструкторских работ по исследованию перспективных типов электрических машин, обеспечивающих достижение заданного закона движения РО при обесточенном двигателе.

**Методы исследования.** Использование фундаментальных методов математической физики (метод конечных элементов и специальное программное обеспечение, реализующее этот метод) а также теории поля, теории электрических и магнитных цепей, теории электромеханического преобразования

энергии, уравнения связи между электромагнитными нагрузками и главными размерами машины, результаты натурных исследований и экспериментов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Электромеханический преобразователь в составе электропривода вертикального перемещения РО, состоящий из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, работающего на третьей гармонике поля якоря, которые установлены на общем валу;

2. Программы проектирования и математического моделирования индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора;

3. Результаты экспериментальных исследований опытного образца электропривода;

4. Конструкции электромеханических преобразователей, обеспечивающие движение РО отключенного привода по заданному закону.

**Личный вклад автора.**

1. Разработка конструкции узлов электромеханического преобразователя, включающей двигатель и генератор;

2. Детализация методик и расчёты электромеханических преобразователей, включая определение размеров и электромагнитных параметров;

3. Исследование сеточных моделей для углублённого анализа работы двигателя и устройства контроля движения из состава электропривода для перемещения регулирующего органа;

4. Расчёты параметров электропривода;

5. Участие в проведении натурных исследований и вычислительных экспериментов;

6. Компьютерное моделирование.

**Апробация работы.** Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы были доложены на международных, всероссийских и отраслевых конференциях:

- НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики» Н.Новгород в 2016-2021 г.г.;



- XXIV Сессия молодых ученых, секция «Энергетика», 2019 г.
- 18-й международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, ОКБ «Гидропресс», 30-31 марта 2016 г.;
- Молодежная научно-техническая конференции «Взгляд в будущее-2018» АО «ЦКБ МТ «Рубин» г. Санкт-Петербург, 23-24.05.2018 г.;
- IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 Пермь, 3–7 октября 2016 г.
- IV-й международной конференции «Пром-Инжиниринг», 2018 г.;
- X-й международной конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2018», Новочеркасск, 3-6 окт. 2018 г.
- XX международной НТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 14-15 марта 2019 г..

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 4 в журналах, реферируемых ВАК, и получено 2 патента на изобретения.

**Реализация результатов работы.** Основные положения и рекомендации диссертационной работы использованы:

- в АО «ОКБМ «Африкантов», при выполнении проектных и конструкторских работ, результаты которых использованы в реально изготовленных изделиях;
- научным руководителем при разработке учебных пособий по дисциплине «Электропривод»;
- в преподавательской практике соискателя и руководителя при чтении лекций в образовательных учреждениях высшего образования НГТУ и МИСиС.

# 1 НАЗНАЧЕНИЕ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

## 1.1 Общие положения

Система управления и защиты (СУЗ) ядерного реактора представляет собой совокупность средств технического обеспечения, предназначенных для создания условий безопасного протекания цепной реакции на заданном уровне мощности и изменения её при пуске, останове, переходе ядерного реактора с режима на режим, для контроля интенсивности цепной реакции, для обеспечения быстрого прекращения реакции деления при наступлении аварийной ситуации и для воздействия на поля энерговыделения [5].

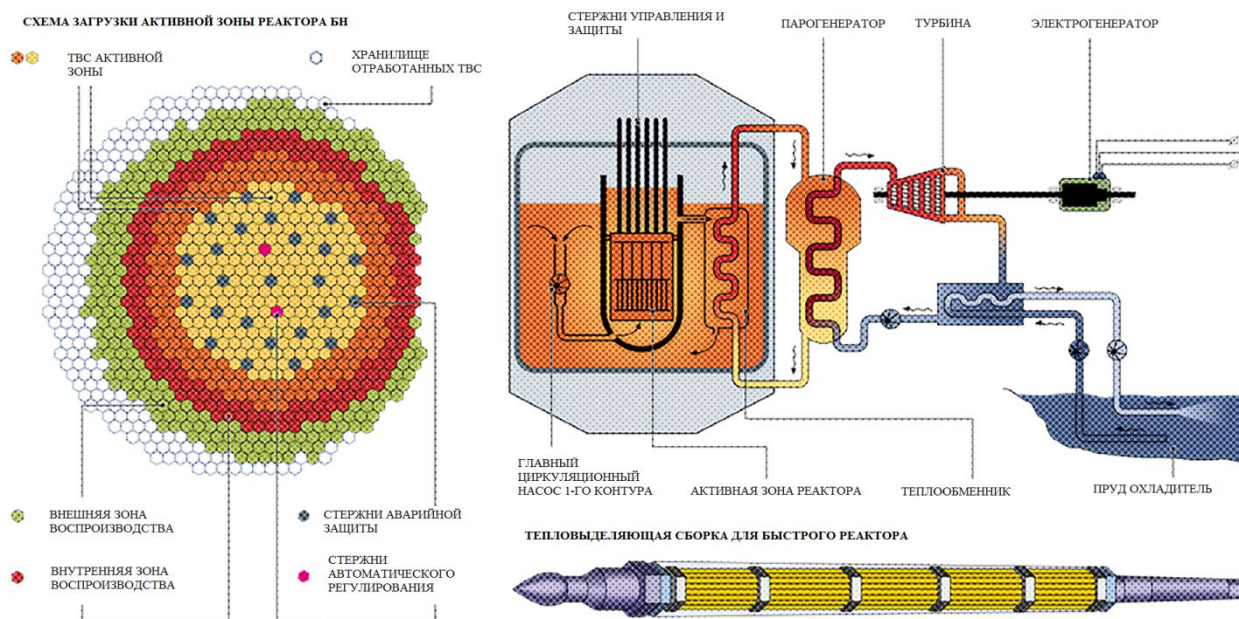
В этом же источнике также даны определения и другим терминам и понятиям, применяемым в системах управления и защиты ядерных реакторов. Для настоящего исследования важны следующие:

- исполнительный механизм (в настоящем исследовании: привод АЗ) – исполнительный механизм системы управления и защиты, предназначенный для аварийного останова ядерного реактора;
- универсальный исполнительный механизм ядерного реактора (в настоящем исследовании: привод (КГ) – исполнительный механизм системы управления и защиты ядерного реактора, предназначенный для выполнения функции аварийной защиты, автоматического и ручного регулирования мощности, а также компенсации изменений реактивности ядерного реактора.

Исполнительный механизм должен перемещать РО в направлении увеличения или уменьшения реактивности со скоростью  $10^{-4} \delta k/c$  в той части активной зоны реактора (рис. 1.1) , где РО наиболее эффективен. Скорость перемещения РО  $v$ , мм/с, определяется функцией

$$v = \frac{L}{F \cdot k} 10^{-4} , \quad (1.1)$$

где  $L$  – длина активной зоны, мм;  $k$  – полная эффективность РО,  $\delta k$ ,  $F$  – коэффициент отражающий эффективность в рабочей точке по сравнению со средней эффективностью.



**Рис. 1.1. Схема функционирования реактора на быстрых нейтронах**

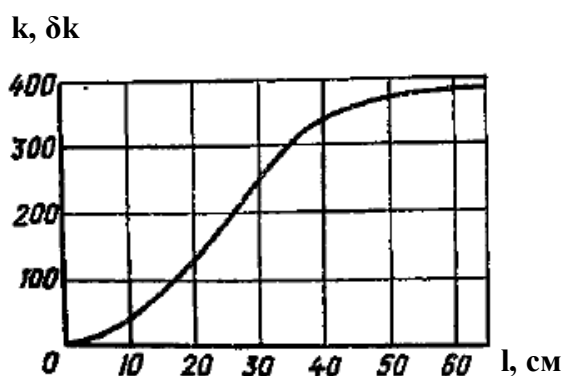
Диапазон регулирования скорости обычно не должен быть ниже 4:1. Перемещение РО может производиться как непрерывно, так и дискретно. Шаг, отработываемый ЭП, определяется вводимой при этом реактивностью. Реактивность характеризует состояние реактора [5]

$$\rho = 1 - 1/K_{эфф} , \quad (1.2)$$

где  $K_{эфф}$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

При  $\rho = 0$ , реактор находится в критическом состоянии, которое характеризуется протеканием цепной реакции с постоянным уровнем генерации нейтронов (постоянное энерговыделение). При  $\rho > 0$  интенсивность реакции увеличивается (положительная реактивность), а при сохранении этого неравенства мощность неограниченно возрастает. Реактор находится в надкритическом состоянии. При  $\rho < 0$  интенсивность реакции уменьшается (отрицательная реактивность), и при сохранении этого неравенства цепная реакция прекращается. Реактор находится в подкритическом состоянии.

Запас отрицательной реактивности (разность реактивностей в критическом состоянии и в положении минимальной реактивности в подкритическом состоянии) определяет эффективность РО (рису 1.2). Важно также знать необходимую отрицательную реактивность, по которой определяют эффективность РО при необходимости остановки реактора во время аварийной ситуации [10].



**Рис. 1.2.** Зависимость эффективности РО от его положения в активной зоне

Как правило, применяются ручной и автоматический режимы управления перемещением РО ядерного реактора (ЯР) (рис.1.3). Во всех режимах недопустима потеря управления, режим самохода РО, запредельные колебания, так как это может привести к запроектным авариям.

В зависимости от выполняемых функций существуют следующие исполнительные механизмы СУЗ автоматического управления ЯР:

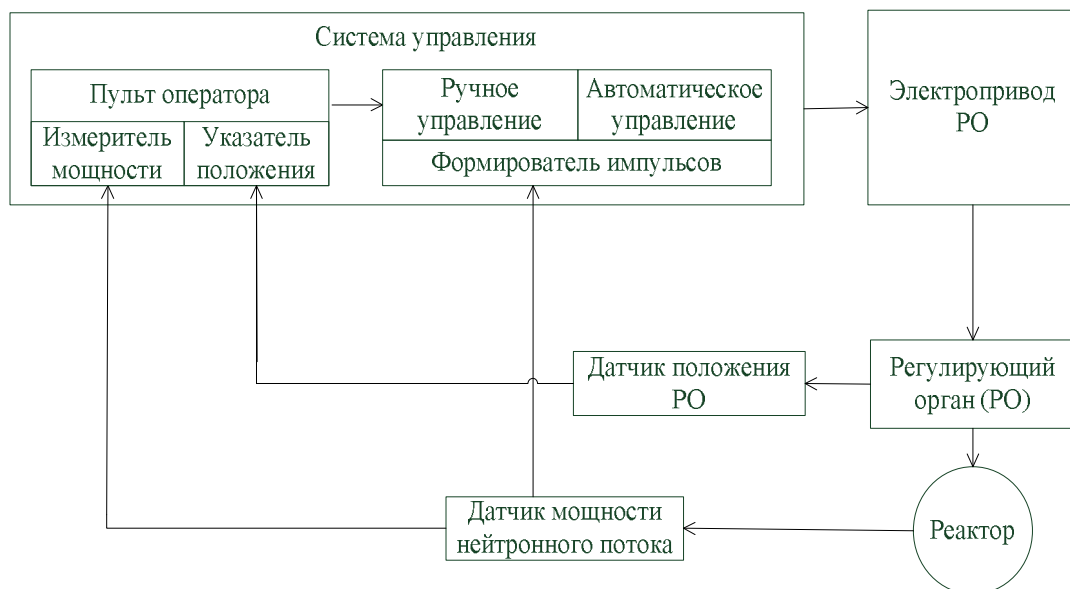
- для аварийного останова (protection system actuator);
- для обеспечения автоматического регулирования (automatic control actuator) параметров ЯР и автоматической стабилизации энергораспределения;
- для компенсации длительных, по отношению к процессу регулирования изменения реактивности (reactivity compensation actuator);
- для дистанционного (ручного) изменения реактивности ЯР оператором;
- универсальный исполнительный механизм, предназначенный для выполнения функции аварийной защиты, автоматического и ручного регулиро-

вания мощности, а также для компенсации изменений реактивности реактора.

Последний совмещает в одном приводе функции автоматического регулирования (АР), компенсации реактивности (КС) и ручного регулирования (РР).

В качестве датчика мощности нейтронного потока используются ионизационные камеры. Конструктивно они представляют собой электрический конденсатор, помещенный в заполненный газом объем. Под влиянием нейтронного потока в цепи ионизационной камеры появляется ток, который пропорционален скорости возникновения зарядов и обрабатывается вторичными преобразователями.

Функцию контроля положения РО на всей длине его хода, как при автоматическом, так и при ручном управлении приводом, обеспечивают датчики положения. Для обеспечения требований ядерной безопасности система сигнализации должна выдавать сигналы, фиксирующие положение РО СУЗ во всех рабочих и аварийных режимах работы РУ.



**Рис. 1.3. Схема автоматического регулирования реактора**

Одним из основных элементов СУЗ является электропривод (ЭП), предназначенный для позиционирования механического рабочего органа

СУЗ и его удержания в фиксированном положении, и быстрого перемещения вниз по сигналу АЗ.

В этом электроприводе функцию перемещения РО во всех режимах работы исполнительного механизма СУЗ выполняет электромеханический преобразователь, который позиционирует РО в направлении увеличения или уменьшения реактивности.

## **1.2 Состояние вопроса**

Наиболее ранние решения базировались на применении электропривода РО с механической фиксацией подвижной части при обесточивании тяговых электромагнитов [3, 6, 7]. Такие устройства обеспечивали единичные перемещения подвижного элемента при подаче на электромагнит импульсов напряжения, соответствующие заданному количеству импульсов и удержание подвижного элемента после отработки перемещения. Применены на реакторах «Янки» (США), Obrigheim (ФРГ) и др.

Несмотря на недостатки, свойственные описанному выше электроприводе с жесткой кинематической связью подвижного и неподвижного элементов, он выгодно отличался от применявшихся тогда механизмов автоматики «сухого» и «мокрого» исполнения, построенных на базе асинхронных двигателей [3, 7-9], и двигателей постоянного тока [9].

В настоящее время, в качестве электропривода РО ядерных реакторов в основном применяется шаговый электропривод, имеющий неоспоримые преимущества в части: отсутствия развитой кинематической цепи; высокой точности фиксации РО в заданном положении; отсутствия обратной связи; безопасности при заеданиях механизма; отсутствии выбега при остановке и простоте герметизации статора от ротора.

За счет данных преимуществ, дальнейшее развитие исполнительных механизмов СУЗ связано с совершенствованием шаговых электроприводов, в том числе на базе линейных шаговых двигателей [10, 11].

Герметизация статора необходима для отделения его от среды под давлением. Реализуется это за счет установки герметичной перегородки в расщелину статора. При герметичном «мокром» исполнении повышается надежность электропривода за счет исключения узлов уплотнений.

Шаговый двигатель (ШД) относится к синхронной электрической машине с управлением током или напряжением в фазах обмотки статора. Ротор шагового электродвигателя совершает дискретные перемещения (шаги) в строгом соответствии с количеством переключений ключей инвертора системы управления.

Угол поворота ШД определяется соотношением

$$\alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{mZ}, \quad (1.3)$$

где  $m$  – число фаз обмотки статора;  $Z$  – число зубцов ротора

Каждому электрическому импульсу от инвертора соответствует одно переключение обмотки ШД (такт коммутации) и соответственно шаг ротора ШД. Суммарный угол поворота ШД пропорционален количеству импульсов, а его скорость  $\omega$ , об/мин частоте коммутации обмоток  $f_k$

$$\omega = \alpha_{ш} f_k \quad (1.4)$$

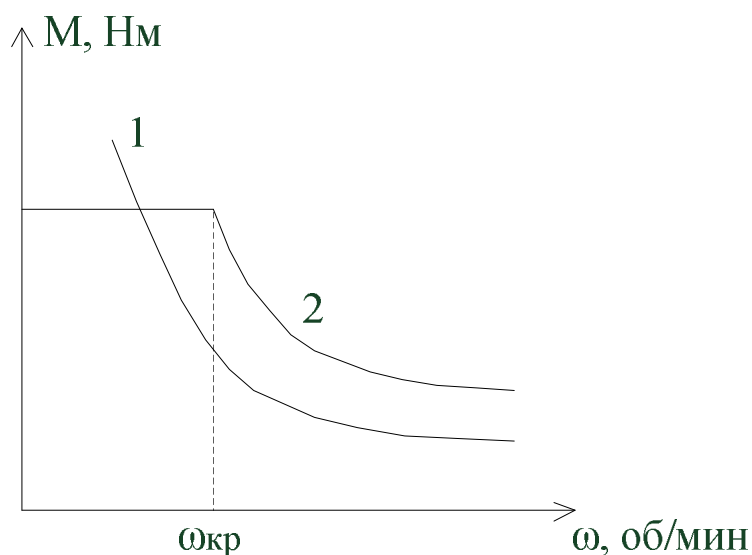
Основными характеристиками шаговых электродвигателей являются статическая, предельная механическая и предельная динамическая.

Статическая характеристика – это форма угловой характеристики синхронной машины. Статическая характеристика представляет собой зависимость электромагнитного момента от углового отклонения зубцов ротора от оси неподвижного поля статора. Оно создается обмоткой при определенном сочетании уровней тока в фазах обмотки якоря. Каждому сочетанию значений тока, неизменно поддерживаемого в фазах обмотки, соответствует своя статическая характеристика. Следовательно, статических характеристик у одного двигателя может быть много, но обычно статический режим работы,

реализуемый для удержания РО в заданном положении, осуществляется одновременным включением половины всех фаз обмотки, в разном их сочетании для двух смежных фаз. Такой режим переключения называется симметричным режимом, где каждой комбинации включённых фаз соответствует одна и та же по форме статическая характеристика, но сдвинутая от смежных характеристик на угол, равный шагу двигателя  $\alpha_{ш}$ .

Предельная механическая характеристика показывает, как изменяется электромагнитный момент шагового двигателя с увеличением частоты коммутации обмоток.

С ростом частоты переключений возрастает индуктивное сопротивление фаз обмоток якоря ШД. Под влиянием индуктивного сопротивления, ток в фазах с ростом частоты уменьшается. В связи с этим, при питании ШД от источника напряжения предельная механическая характеристика (амплитудно-частотная характеристика) представляет собой монотонно убывающую функцию (рис. 1.4, кривая 1).



**1 – привод с источником напряжения;  
2 – привод с источником тока**

**Рис. 1.4. Предельная механическая характеристика ШД**

При использовании преобразователя со стабилизацией тока в фазах характеристика представляет собой прямую линию параллельную оси абсцисс,



т.е. ШД работает с постоянным моментом до некоторой критической частоты.

Критическую частоту можно определить, зная следующие параметры ШД и преобразователя

$$\omega_{кр} = 2\pi \frac{R}{L} \frac{1}{\ln \frac{U - RI}{U}}, \quad (1.5)$$

где  $R$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $L$  – индуктивное сопротивление обмотки статора, Гн;  $U$  – амплитудное значение напряжения преобразователя, В;  $I$  – ток фазы ШД, А.

Предельная динамическая характеристика ШД (рис. 1.5) определяет зависимость предельного момента нагрузки, при котором возможен запуск, от соответствующей частоты вращения. Моменту нагрузки по данной характеристике ставится в соответствие частота приемистости  $\Omega_{пр}$ , об/мин, на которую ШД способен запуститься без пропуска шагов.

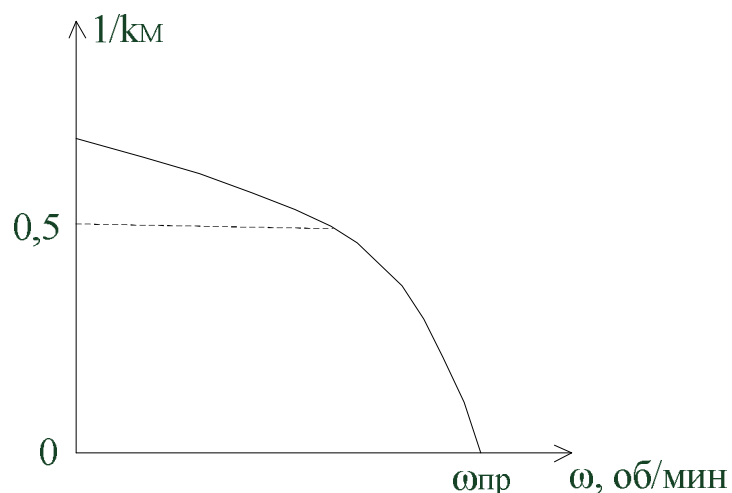
$$\Omega_{пр} \approx 2 \cos \frac{\pi}{2n_T} \sqrt{\frac{M_{max}}{pJ} \frac{30}{\pi}}, \quad (1.6)$$

где  $M_{max}$  – максимальный момент ШД, Нм;  $J$  – момент инерции ЭП, кг·м<sup>2</sup>;  $n_T$  – число тактов коммутации, представляющее число переключений, осуществляемое для поворота ротора на двойное полюсное деление (одно зубцовое деление).

С увеличением нагрузки частота приемистости линейно убывает пропорционально кратности момента

$$k_M = \frac{M_{max}}{M_{нагр}} \quad (1.7)$$

К преимуществам ШД относятся: увеличение надежности привода в результате значительного упрощения его кинематической схемы; высокая точность фиксации РО в заданном положении; возможность быстрого реверсирования движения и остановки РО без выбега, простота герметизации.



**Рис. 1.5. Предельная динамическая характеристика ШД**

Система управления ШД предназначена для формирования электрических импульсов заданной формы и частоты на обмотки статора двигателя. Шаговый двигатель отрабатывает перемещение в строгом соответствии с количеством сформированных импульсов.

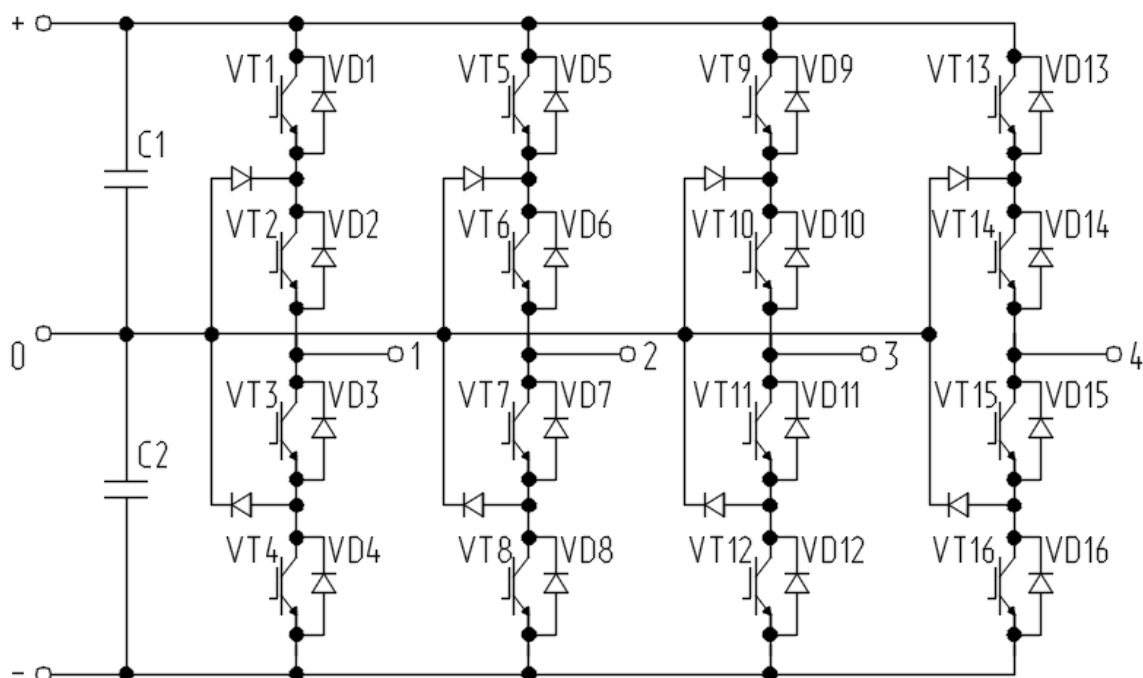
В настоящее время, большое практическое применение имеет схема управления на основе мостового инвертора на IGBT транзисторах, построенная по принципу регулируемого источника тока [16-20]. Преимуществами данной схемы является поддержания момента ШД в широком диапазоне скоростей, а также получение высоких динамических характеристик при реализации различных законов движения привода.

Преобразователи, выполненные на IGBT-транзисторах, позволяют создавать на нагрузке не один, а несколько уровней выходного напряжения разной полярности, обеспечивая более широкие возможности формирования импульсов напряжения на нагрузке – фазах двигателя.

Преимущество трехуровневого инвертора заключается в возможности использования полупроводников с максимальной эффективностью, практически с полной загрузкой по напряжению. Таким образом, возможно применение полупроводников, рассчитанных на меньшее номинальное напряжение. Полупроводники с меньшим рабочим напряжением имеют преимуще-

ства по всем остальным параметрам, важнейшие из которых - время переключения и падение напряжения в открытом состоянии. Трёхуровневые инверторы имеют большой КПД, а в выходном синусоидальном сигнале содержится меньше неосновных гармоник. Применение данных инверторов позволяет обеспечить устойчивый пуск электромеханических преобразователей.

Представленный на рис.1.6 многоуровневый инвертор позволяет формировать на четырех фазах обмотки электромеханического преобразователя мгновенное напряжение трёх уровней,  $U_{ист}$ ,  $\frac{1}{2}U_{ист}$  и 0, как прямого, так и обратного направления, с усреднением напряжения на каждой фазе в соответствии с принципом импульсной модуляции ( $U_{ист}$  – напряжение источника).



**Рис. 1.6. Схема разнополярного инвертора напряжения (трёхуровневого с фиксированной нейтральной точкой)**

Инвертор содержит по четыре IGBT транзистора в цепи каждой фазы электромеханического преобразователя  $VT1-VT4$  а также параллельно присоединённые к ним обратные диоды  $VD1-VD4$  (для первой фазы) и блокирующие диоды, обеспечивающие протекание тока фазы в линию 0, и делитель напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ .

Кроме того, актуальным является применение интеллектуальных силовых модулей, объединяющих на одном кристалле силовую и управляющую часть.



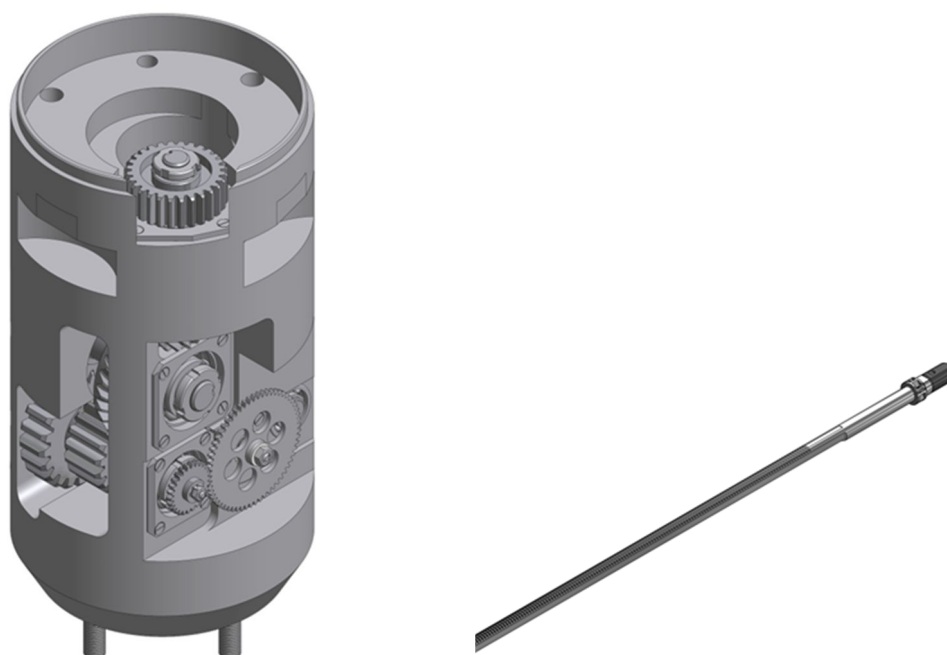
**Рис. 1.7 – Внешний вид силового интеллектуального модуля**

Преимуществами интеллектуальных силовых модулей рис.1.7 (IPM) над схемами из отдельно компонуемых элементов является: повышение надежности, снижение массогабаритных характеристик (исключение промежуточных драйверов управления), удобство монтажа.

Механический редуктор входит в состав преобразователя, предназначенного для передачи вращательного движения ротора ШД в возвратно-поступательное перемещение РО ЯР. В настоящее время на действующих РУ применяются следующие схемы механических преобразователей:

- барабан – трос (или цепь);
- рейка – шестерня;
- винт – гайка.

На рис. 1.8 показан редуктор, состоящий из корпуса, зубчатых колес, блока шестерен [21]. Он преобразует вращающий момент на валу двигателя в поступательное движение рейки и закреплённого на её конце РО.



**Рис. 1.8. Механический редуктор (рейка – шестерня)**

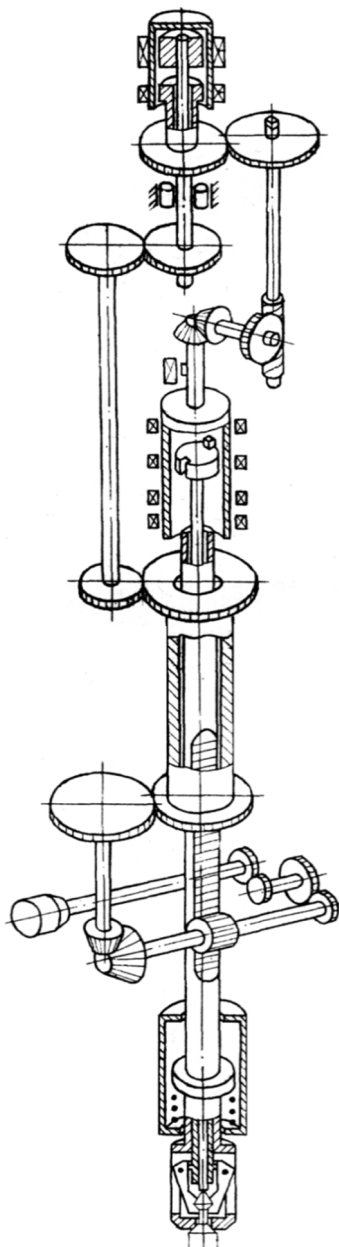
Применение в конструкции исполнительного механизма СУЗ шагового двигателя позволяет существенно уменьшить передаточные числа редукторов в ЭП штанги при заданных скоростях перемещения РО СУЗ, и, соответственно, упростить кинематические цепи ЭП, а также повысить их надежность по сравнению с исполнительными механизмами, в которых применены асинхронные электродвигатели.

Схема рейка-шестерня - наиболее простая в изготовлении и безотказная в работе в условиях рабочей среды контура, что обеспечивает надежное введение РО АЗ в активную зону при поступлении сигнала аварийной защиты.

Исключить преобразователь вращательного движения в поступательное и серьёзно упростить за счёт этого компоновку привода и размещение его на крышке реактора позволяет применение линейного ШД [10, 11, 22-25]. Однако серьёзным недостатком электропривода с линейными шаговыми двигателями является значительная инерционность подвижных масс, обусловленная безредукторной передачей движения непосредственно на исполнительный орган, и, как следствие этого, низкое быстродействие и склонность к колебаниям при отработке шагов. Кроме того, использование линейного ШД

требует выбора материала пар трения в линейных опорах, обеспечивающего достаточный ресурс и низкие механические потери.

Кинематическая схема ИМ СУЗ (рис. 1.9) иногда выполняется совмещённой с механизмом захвата, осуществляющим функцию сцепления - расцепления зубчатой рейки и РО, привод которого осуществляется посредством отдельного шагового двигателя, с теми же размерами сечения листов статора, что и основной ШД, но меньшей длины в осевом направлении [47].



**Рис. 1.9. Кинематическая схема ИМ СУЗ**

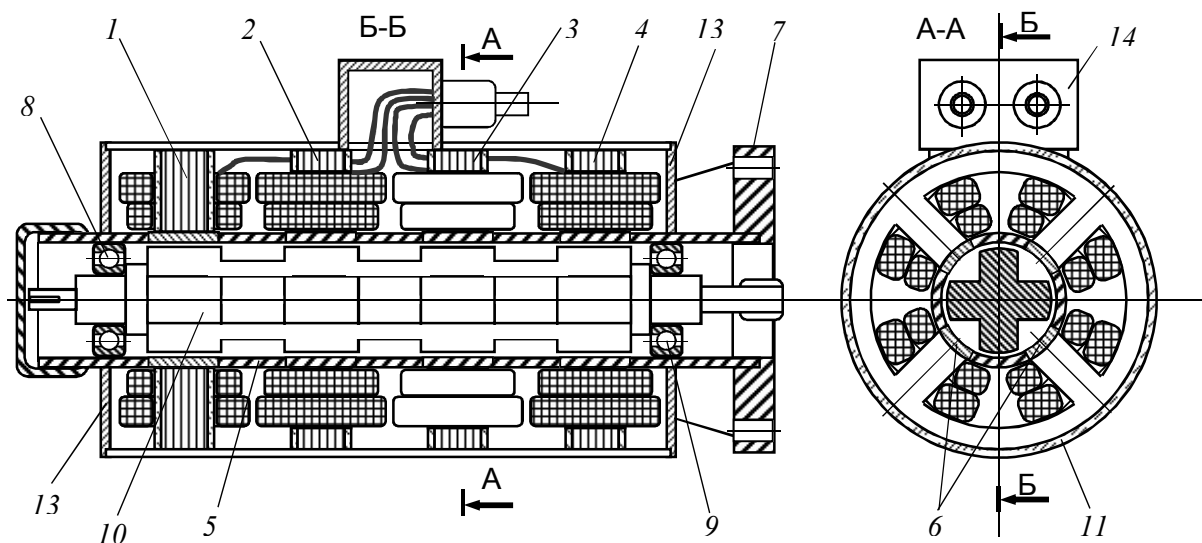
Этот механизм содержит также пружинные устройства, осуществляющие торможение РО в конце хода, до полного его останова.

### 1.3 Анализ существующих электромеханических преобразователей в шаговом приводе регулирующих органов

Рассмотрим существующие варианты реализации электромеханических преобразователей.

#### 1.3.1 Четырехстаторный шаговый двигатель с реактивным ротором

Ранние технические решения, основанные на общем уровне развития теории и практики шаговых двигателей [12, 13], позволили создать одну из первых конструкций, предназначенных специально для нужд энергетики – трёхстаторный, а затем четырёхстаторный (рис. 1.10) ШД с реактивным ротором и изолированными в магнитном отношении фазами [14, 15].



**Рис. 1.10. Четырехфазный ШД с изолированными в магнитном отношении фазами**

1-4 – магнитопроводы статоров (фаз) с катушками обмотки, 5 – герметизирующая труба, 6 – магнитомягкие вставки герметизирующей трубы, 7 – установочный фланец, 8 и 9 – подшипники, 10 – ротор, 11 – корпус, 12 и 13 – торцевые щиты, 14 – клеммная коробка

Данные ШД хорошо себя зарекомендовали при длительной работе на различных объектах ядерной энергетики, с ресурсом, начитывающим десятки и сотни тысяч часов непрерывной работы.

### **1.3.2 Электромеханический преобразователь для устройства контроля движения**

Одним из важных звеньев ЭТК механизмов вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов является устройство контроля движения (УКД), контролирующее скорость опускания РО при обесточивании ШД.

Необходимость устройства контроля скорости опускания обусловлена неравномерностью изменения реактивности при перемещении РО вглубь ядерного реактора. С самого начала падения полностью выведенного из активной зоны РО его эффективность изменяется незначительно. Следовательно, на начальном участке опускания РО в режиме аварийной защиты ему должно быть сообщено максимальное ускорение.

По мере погружения в активную зону эффективность РО возрастает, и его дальнейший разгон целесообразно ограничить, вплоть до перехода к равномерному движению в конце хода.

Таким образом, ускорение, а значит и закон изменения электромагнитного момента, развиваемого устройством контроля скорости опускания РО, должен соответствовать зависимости эффективности регулирующего органа от глубины погружения в активную зону (рис. 1.2).

Эта функция реализуется при помощи электромагнитного тормоза.

Самые ранние разработки тормозного устройства представляли собой индукционную машину с постоянными магнитами на роторе, поток которых взаимодействует с током, индуцированным в стержнях неподвижной короткозамкнутой клетки на статоре. С увеличением частоты вращения ротора, механически связанного с движущейся под действием собственного веса нагрузкой, на заданной скорости достигается баланс между моментом от веса и электромагнитным моментом устройства. Движение становится равномерным, исключая воздействие чрезмерных ударных нагрузок в конце хода [26].

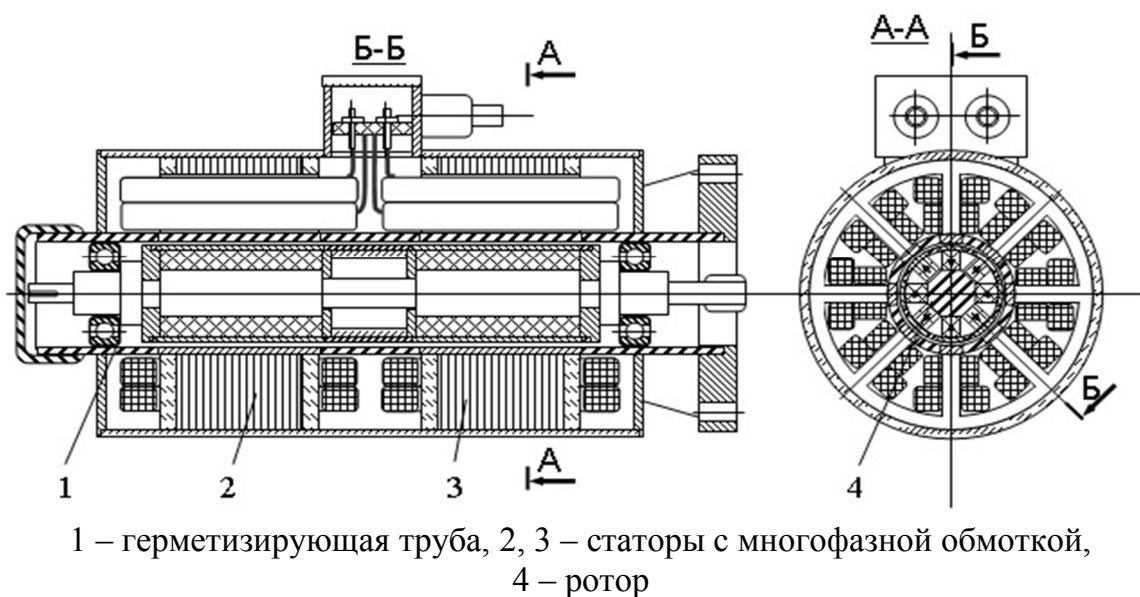


Недостатками такого устройства являются невозможность подстройки установившегося значения скорости опускания и чрезмерная мягкость механической характеристики. Поэтому небольшим приращениям нагрузки в механизме, под влиянием случайных факторов или износа, соответствуют значительные изменения скорости опускания. Это провоцирует крайне нежелательные колебания скорости вокруг установившегося значения, сопровождающие движение регулирующего органа после отключения от сети, а отсутствие возможности схемного или конструктивного влияния на характеристики делает переходный процесс неуправляемым.

### **1.3.3 Шаговый двигатель с постоянными магнитами на роторе**

Логика поиска более совершенных технических решений делает уместным решение объединить тормозное устройство с приводным электродвигателем и использовать их в качестве единого одномашинного агрегата, для реализации которого, можно использовать обычную синхронную машину с постоянными магнитами [27-30]. Однако, использование двух режимов работы не позволяет без каких-либо внутренних переключений в схеме обмотки переходить в тормозной (генераторный) режим с заданными характеристиками опускания регулирующего органа, т.е. не удовлетворяет требованиям пассивной безопасной эксплуатации привода СУЗ.

Для формирования подходящего закона изменения тормозного момента в машине с чётным числом фаз и постоянными магнитами на роторе было применено подключение конденсаторов к зажимам фаз, пространственные оси которых смещены относительно друг друга на 180 градусов. При однонаправленном (неревверсивном) направлении тока в фазах такое решение исключает замыкание цепей преобразователя дополнительными ветвями, образованными ёмкостной нагрузкой, а благодаря её подбору появляется возможность подстройки заданного значения установившейся скорости опускания РО [31, 32].



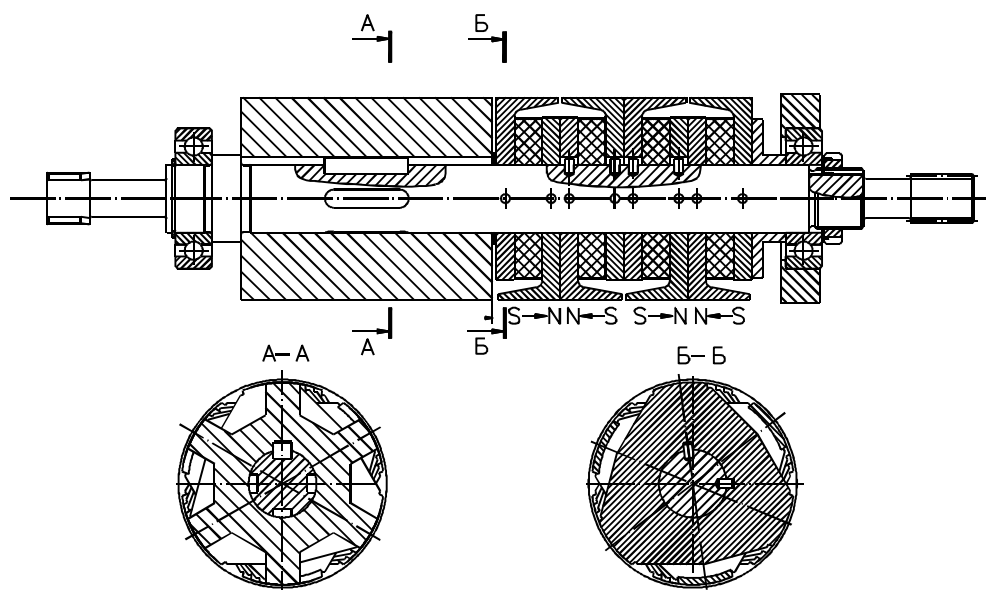
**Рис. 1.11 – Герметичный ШД с постоянными магнитами на роторе**

Такая синхронная машина (рис. 1.11) с дополнительными цепями для замыкания электродвижущей силы (ЭДС) вращения, работает и в качестве двигателя, обеспечивающего перемещение РО и позиционирование его в заданном положении, и в качестве тормоза, ограничивающего скорость его опускания при исчезновении напряжения на зажимах обмотки якоря. Однако, ей присущи два недостатка. Во-первых, в силу большого магнитного сопротивления постоянных магнитов, невозможно значительно форсировать момент путём увеличения тока. Существует также опасность размагничивания магнитов от этого действия.

Во-вторых, выход из строя вследствие пробоя хотя бы одного конденсатора приводит к потере работоспособности привода в целом, во всех режимах.

### **1.3.4 Индукторная машина с подразделенной обмоткой**

Для повышения надёжности была разработана конструкция индукторной машины с подразделённой обмоткой, состоящей из сосредоточенных катушек, разделённых на две равновитковые секции. Ротор её содержит расположенные на одном валу зубчатый магнитопровод и пакет с постоянными магнитами [33-35], расположенные внутри общего статора (рис. 1.12).



**Рис. 1.12. Двухпакетный ротор индукторного двигателя**

Пакет с постоянными магнитами используется в основном в генераторном режиме в качестве УКД, а зубчатый магнитопровод – исключительно в двигательном режиме.

В каждой фазе обмотки этого устройства выводы для подключения ёмкостной нагрузки генератора и для преобразователя частоты двигателя являются точками равного потенциала по отношению друг к другу. Поэтому любые изменения нагрузки в цепях генератора, в том числе и короткое замыкание, не нарушают работу двигателя.

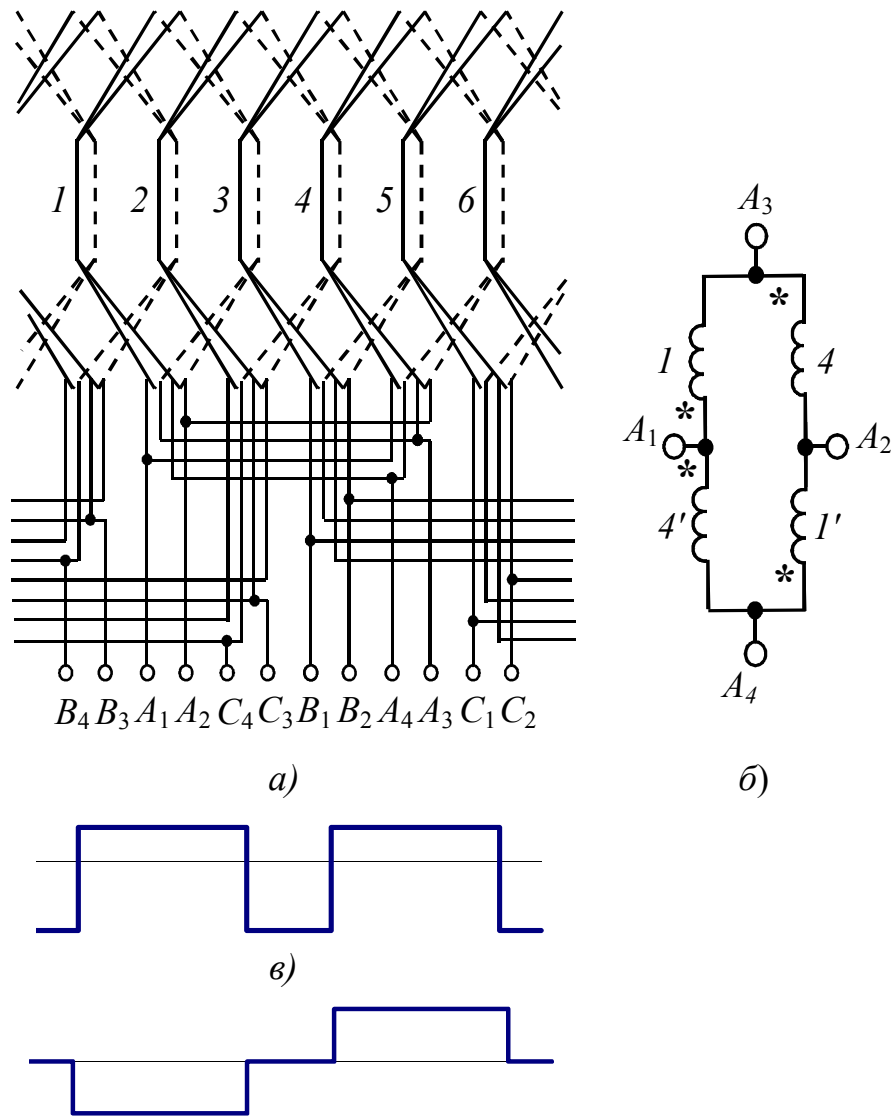
Параллельное включение обоих пакетов в общую магнитную цепь позволяет расширить функциональные возможности индукторной машины с самовозбуждением, позволяя ей работать при полном исчезновении питания, предохраняет магниты магнитоэлектрического пакета от размагничивания при воздействии форсированных токов обмотки. Они обеспечивают адекватное увеличению токов фаз приращение электромагнитного момента, благодаря относительно небольшому магнитному сопротивлению зубчатого пакета.

В пазы статора этой машины уложены катушки многофазной совмещённой обмоткой (рис. 1.13) [36]. Все её катушки подразделены на две одинаковые секции - полукатушки с уменьшенным в два раза числом витков.

Особенностью обмотки является соединение катушек (катушечных групп) в фазах по мостовой схеме с включением в противоположные ветви катушек, расположенных в одних и тех же пазах (рис. 1.13, б). Относительно зажимов, подключенных к одной диагонали моста ( $A_1-A_2$  на рис. 1.13, б), фазы содержат две параллельные ветви со встречным включением катушек в каждой ветви и образуют поле с числом пар полюсов  $2p = 4$ . Относительно зажимов, подключенных к другой диагонали ( $A_3-A_4$ ), обмотка содержит параллельные ветви с уменьшенным в два раза числом пар полюсов,  $2p = 2$ . Распределение МДС этих полей, изображенное для момента времени, когда первая фаза обтекается полным током, а вторая и третья - половинным током противоположного направления, показано на рис. 1.13, в и г.

В отличие от других аналогов [37, 38] такая обмотка допускает любое сопряжение фаз - как в звезду, так и в треугольник (для обоих чисел пар полюсов) благодаря взаимной эквипотенциальности средних точек параллельных ветвей, с которыми группы зажимов разных звёзд соединены выводами. Это позволяет создать в одной и той же машине одновременно два поля, вращающихся со скоростями, отличающимися в два раза. В зависимости от чередования фаз напряжения на каждой группе зажимов направления вращения этих полей могут совпадать, а могут быть противоположными.

Необходимым условием одновременного создания двух полей в машине с подразделенной обмоткой является лишь одно - многофазное устройство, питающее или использующее энергию одного из полей, образуемых обмоткой обязательно должно иметь гальванически не связанные друг с другом фазы [36]. В двигателе условие должно обеспечиваться питанием через трансформатор с несопряженными фазами вторичной обмотки. При использовании же указанного поля для торможения и рекуперации энергии нагрузка должна быть составлена из однофазных элементов.



<sup>с)</sup>  
 а - расположение и соединение катушек; б - соедине-  
 ние катушек в фазе; в - распределение МДС поля  
 большей полюсности;  
 г - распределение МДС поля меньшей полюсности

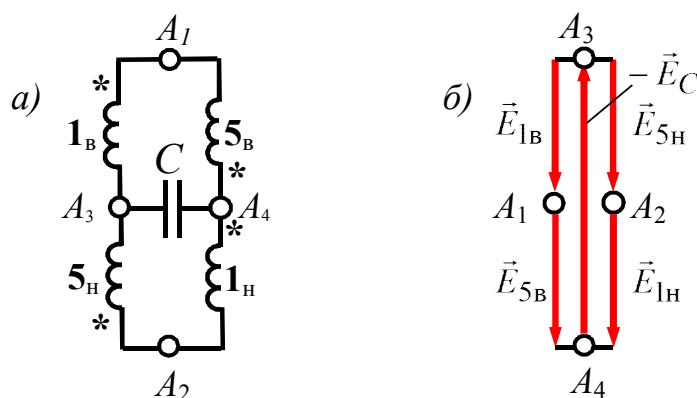
**Рис. 1.13. Схема подразделённой обмотки**

В общем случае схемы подразделенных обмоток можно получить на основе обычных схем петлевых и концентрических обмоток машин переменного тока с числом пазов на полюс и фазу, кратным 0,5.

При питании обмотки многофазным током через зажимы  $F_1-F_2$  ( $F$  – условное обозначение зажима фазы  $A$ ,  $B$  или  $C$ ) она образует поле с числом полюсов, равным удвоенному числу полюсов поля, образуемого при питании обмотки через зажимы  $F_3-F_4$ . Для компенсации реакции якоря и увеличения мощности при работе в генераторном режиме к одной или нескольким парам

зажимов  $A_3-A_4$ ,  $B_3-B_4$   $C_3-C_4$  может быть подключена емкостная нагрузка  $C_{\text{нагр}}$  (рис. 1.14, *a*).

При вращении ротора под действием поля активного пакета в катушках обмотки якоря наводится ЭДС. Векторная диаграмма ЭДС вращения, наводимых в катушках одной фазы (фазы  $A$ ), показана на рис. 1.14, *б*. Векторам электродвижущих сил ( $E_1$ ,  $E_5$ ) здесь приписаны номера катушек, последовательно отсчитываемые вдоль окружности статора, начиная с первой катушки, расположенной на первом полюсе (зубце) статора с восемью зубцами.



**Рис. 1.14. Подключение конденсаторов (*a*) и векторная диаграмма (*б*) ЭДС вращения в тормозном режиме работы индукторной машины с подразделённой обмоткой**

Из диаграммы следует, что результирующая ЭДС  $E_C$  на зажимах, предназначенных для образования поля полюсностью  $p_1$ , отлична от нуля. Эта ЭДС вызывает ток по двум контурам, замкнутых нагрузочным конденсатором  $C$ : по контуру  $A_3A_1A_4$  и контуру  $A_3A_2A_4$ . При малых скоростях вращения ротора сопротивление емкостной цепи велико и ток в этих контурах незначителен. Поэтому тормозной электромагнитный момент на этих скоростях мал и ротор продолжает разгоняться. По достижении ротором заданной скорости, определяемой соотношением индуктивности катушек и ёмкости конденсатора, наступает резонанс напряжений, сопровождающийся резким возрастанием токов в контурах, замкнутых конденсаторами (рис. 1.14). Возрастание тока приводит к увеличению тормозного момента и эффективному ограничению скорости до установившегося значения.

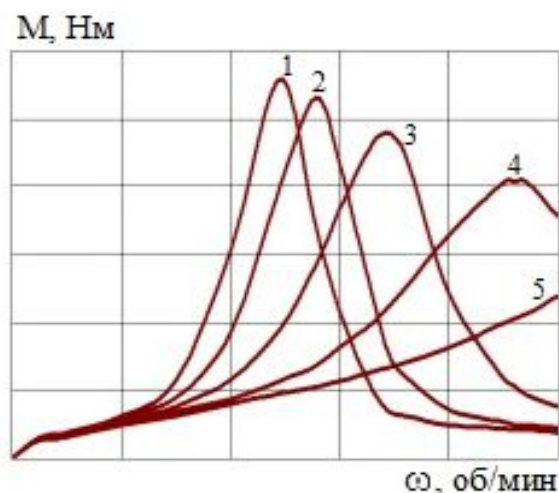
Нагрузочные конденсаторы в такой машине подключаются к одной группе фазных зажимов, а напряжение питания – к другой, эквипотенциальной по отношению к точкам подключения конденсаторов. Поэтому выход из строя конденсаторов, вплоть до их обрыва или короткого замыкания, не может привести к потере управляемости двигателя и механизма в целом.

Величину сопротивления нагрузки в этом случае следует выбирать таким образом, чтобы она несколько превышала индуктивное сопротивление фазы обмотки при частоте установившегося вращения ротора, соответствующей требуемой скорости равномерного вращения ротора, вплоть до максимума в области значения  $\omega = R/L_0$  [39].

$$M \cong \frac{C_m \cdot R \cdot \omega}{(R + \omega \cdot L_0)^2}, \quad (1.8)$$

где  $M$  – электромагнитный момент, Нм;  $C_m$  – постоянная момента электродвигателя, зависящая от его конструктивных соотношений,  $R$  – сопротивление активной нагрузки, Ом;  $L_0$  – постоянная составляющая индуктивности фазы, Гн

При емкостной нагрузке стабилизация частоты вращения имеет место на восходящих ветвях характеристик (рис. 1.15). Из пяти приведенных генераторных характеристик на данном рисунке, первая соответствует наибольшему емкостному сопротивлению.



**Рис. 1.15. Механические характеристики генераторного режима УКД при различной емкостной нагрузке**

Увеличивая емкость, можно сдвигать положение максимума момента по генераторной характеристике вниз от исходного. Вследствие увеличения добротности резонансных контуров с увеличением емкости конденсаторов, имеет место рост максимума момента.

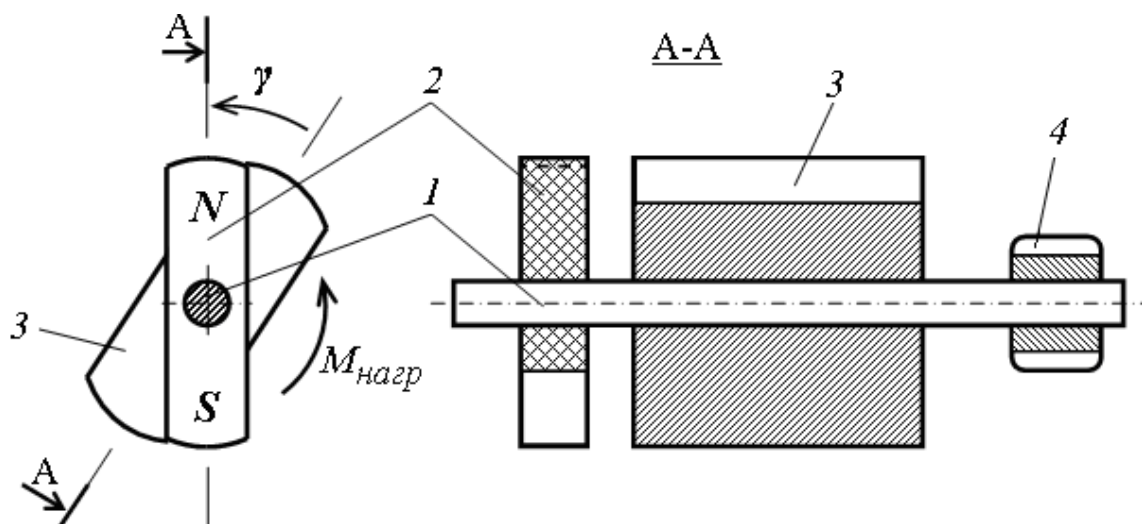
Однако, данная индукторная машина с подразделенной обмоткой, предполагающая размещение внутри общего статора двухсекционного ротора, имеет следующие недостатки:

- обмотка общего статора имеет завышенную длину по отношению к каждой из функционально совмещённых машин: генератора и двигателя, что ведёт к увеличению потерь в каждой из них;

- при работе в генераторном режиме зубчатый магнитопровод ротора создаёт дополнительную индуктивную нагрузку, которая снижает момент генератора и ограничивает диапазон скоростей, на котором он способен эффективно ограничивать скорость опускания РО.

### 1.3.5 Индукторная машина с магнитной асимметрией на роторе

Характеристики можно улучшить, введя асимметрию магнитной цепи на роторе,



1 – вал; 2 – магнитоэлектрический пакет; 3 – зубчатый пакет;  
4 – ведущая шестерня

**Рис. 1.16. Асимметричный ротор с радиально намагниченным магнитом**



путём углового смещения зубцов зубчатого магнитопровода относительно осей полюсов, образованных постоянными магнитами (рис. 1.16) [40].

Геометрическое сложение по угловым характеристикам момента от разных пакетов приводит к увеличению кратности максимального момента, наблюдаемой при вращении ротора в одном направлении, и к уменьшению кратности максимального момента, наблюдаемой при вращении ротора в противоположном направлении.

Максимальное значение угла смещения осей полюсов активного пакета относительно осей зубцов зубчатого пакета, при котором обеспечивается наибольшая разница электромагнитного момента машины при движении вверх и вниз составляет  $\frac{1}{4}$  часть полюсного деления активного пакета.

Возможным способом получения требуемого значения установившейся скорости опускания РО является также использование в качестве УКД генератора с подмагничиванием спинки посредством дополнительной обмотки [42-44]. Но такой способ регулирования скорости не изучен, требует дополнительной обмотки, намотанной вокруг спинки статора, что сильно усложняет конструкцию УКД. Кроме того, для реализации такого метода подстройки скорости опускания РО необходим автономный источник регулируемого напряжения для питания обмотки подмагничивания.

Движение УКД контролируется посредством датчиков перемещения, реагирующих на изменение углового положения ротора или зубчатого колеса редуктора [45], или рейки по длине её хода [46].

*Таблица 1.1*

**Сравнение характеристик электромеханических преобразователей**

№ п/п	Наименование электро-механического преобразователя	Преимущества	Недостатки
1	Четырехстаторный шаговый двигатель с реактивным ротором	1. Надежная работа в двигательном режиме 2. Простота управления и конструкции	1. Отсутствие генераторного режима в режиме аварийной защиты. 2. Большие габариты

№ п/п	Наименование электро-механического преобразователя	Преимущества	Недостатки
2	Электромеханический преобразователь для устройства контроля движения	1. Обеспечение работы в генераторном режиме 2. Надежность конструкции	1. Невозможность подстройки установившегося значения скорости опускания и чрезмерная мягкость механической характеристики. 2. Колебания значений установившейся скорости
3	Шаговый двигатель с постоянными магнитами на роторе	1. Совмещение функций двигателя и генератора в одном электро-механическом преобразователе. 2. Обеспечение функции пассивной защиты.	1. Массогабаритные характеристики. 2. Отсутствие возможности значительной форсировки момента путем увеличения тока. 3. Риск отказа в работе при пробое конденсатора в фазе статора.
4	Индукторная машина с подразделенной обмоткой	1. Снижение влияния форсировки момента путем увеличения тока на работу магнито-электрического пакета. 2. Пробой конденсаторов не приведет к отказу индукторной машины и привода РО.	1. Обмотка общего статора имеет повышенную длину по отношению к каждой из функционально совмещённых машин 2. Низкие значения момента генератора и недостаточный диапазон скоростей, на котором возможно ограничивать скорость опускания РО; 3. Массогабаритные характеристики.
5	Индукторная машина с магнитной асимметрией на роторе	1. Улучшение механических характеристик в двигательном и генераторном режиме	1. Недостаточные значения момента генератора и диапазона скоростей, на котором возможно ограничивать скорость опускания РО значительной массы;

#### **1.4 Методики проектирования электромеханических преобразователей**

Традиционные подходы к проектированию двигателей и генераторов предполагают определение основных размеров: диаметра и длины зазора в осевом направлении, через электромагнитные нагрузки. Ими являются индукция в зазоре и линейная нагрузка, представляющая собой ток, приходящийся на единицу длины окружности ротора или расточки статора [48-52].

Однако, при таком подходе игнорируется важнейший параметр шагового привода – момент инерции его подвижных частей, приведенный к валу двигателя. О существовании диапазона наиболее благоприятных соотношений между моментами инерции шагового двигателя и привода изложено в труде профессора И.П. Копылова и его учеников [53]. Методики проектирования ШД с учетом этого параметра представлены в работах профессора Б.А. Ивоботенко [14]. В [54] описан подход к синтезу геометрических размеров через безразмерные параметры. Разработаны методики проектирования индукторных двигателей с учётом момента инерции подвижных частей привода [55- 57].

Подавляющее большинство этих методик исходят из существенных упрощающих допущений и не соответствуют современному уровню внедрения вычислительной и преобразовательной техники инженеров и исследователей.

В зарубежной литературе имеются труды с описанием общего подхода к определению размеров электрических машин исходя из электромагнитных нагрузок [58-62], определению размеров машин с двухсторонней зубчатостью [63, 64], поиску оптимального соотношения чисел полюсов статора и ротора [65]. Значительное место в зарубежных публикациях неизменно отводится определению базовых размеров машин с постоянными магнитами на роторе [66-70].

Методы поверочного расчета, то есть определение характеристик по известным размерам и обмоточным данным спроектированного ШД, как и всех

синхронных машин базируется на теории магнитных полей [71, 72], неподвижных во вращающейся системе координат, и определении электромагнитного момента по приращению (убыли) их энергии [73-75]. Исходя из этой теории профессором А.В. Ивановым-Смоленским и его учениками был обоснован и развит метод проводимостей зубцовых контуров, известный в настоящее время под названием метода конечных макроэлементов [76]. Позднее, в связи с внедрением мощных средств вычислительной техники и специального программного обеспечения в расчетную практику инженеров и исследователей, основным инструментом для расчетного исследования спроектированных двигателей все более широко стал применяться метод конечных элементов (МКЭ). Наибольшее распространение он получил при решении плоских (двухмерных) стационарных и квазистационарных задач расчета синхронных машин методами векторного или скалярного магнитного потенциала, соответственно в двухмерной или трехмерной постановке [77-86].

Математическое моделирование электропривода с ШД исходит из уравнений теории электромеханического преобразования энергии, наиболее полно отраженной в трудах профессора И.П. Копылова [87-89]. Моделирование электропривода с ШД может быть выполнено как в преобразованных [5], так и в фазных координатах [90, 91]. Модель в фазных координатах является более наглядной и понятной в случае интеграции в состав модели полупроводниковых приборов, подключенных к фазам обмотки. Сам электромеханический преобразователь – синхронная машина, может быть представлен системой индуктивных и взаимоиндуктивных связей, периодически изменяющихся по углу поворота ротора [92, 93], либо полевой моделью, например сеточной, с постпроцессорной обработкой результатов для определения фазных ЭДС или матрицы индуктивных параметров [94].

Методы оптимизации электрических машин в общем виде, без применения к конкретным типам двигателей и генераторов, рассмотрены в работе профессора И.П. Копылова [88]. Применительно к шаговому приводу они частично затронуты в труде профессоров Б.А. Ивоботенко, Н.Ф Ильинского и

И.П. Копылова, посвященном применению в электромеханике математического аппарата теории планирования эксперимента [95].

В отечественной и зарубежной печати широко представлены труды по математическому моделированию электрических машин в среде Matlab-Simulink [95-98], модули которой формируются на основании определённой идеализации магнитной и электрических цепей машины, что делает получаемые результаты менее строгими, чем полученные посредством МКЭ.

Теория электропривода с шаговыми двигателями была разработана в проблемной лаборатории электромеханики Московского энергетического института, под руководством профессоров М.Г. Чиликина, Б.А. Ивоботенко, В.П. Рубцова и др. [5, 18]. Основные её положения:

- наиболее существенные особенности привода с ШД описываются системой уравнений идеализированной синхронной машины, с дискретными функциями воздействующих напряжений;

- исследование переходных и установившихся периодических режимов осуществляется на математической модели, при помощи которой для типовых видов нагрузки получены обобщённые динамические и частотные характеристики;

- для приближённого решения уравнения движения используется аналитическое решение уравнения движения, а для уточнённого – численные методы.

Эти основы дают, прежде всего, качественное описание электромеханических процессов в шаговом приводе, необходимое для понимания их физической сущности. Количественное соответствие в настоящее время достигается компьютерным моделированием на основе фундаментальных методов и эмпирических зависимостей, позволяющих учитывать нелинейность расчётных моделей, в полной мере отвечающих современному уровню внедрения вычислительной техники в расчётную практику инженеров и исследователей.

## 1.5 Основные цели и задачи исследования

Из проведённого анализа конструктивных схем ИМ СУЗ и их компонентного состава можно сделать следующий вывод. Одним из факторов, которые ограничивают возможность целенаправленно влиять на характеристики привода СУЗ во всех режимах работы, является противоречие между повышением эксплуатационных качеств (реализация кратковременного форсирования момента, остановка вращающегося ротора после обесточивания, повышение надежности после воздействия больших токов), необходимых для двигательного режима, но одновременно ухудшающих работу в генераторном режиме.

Для устранения выявленного противоречия между требованиями, предъявляемыми к характеристикам двигателя и генератора в одномашинном исполнении при работе их в общем приводе ИМ СУЗ, поставлены следующие **цели и задачи**, которые являются предметом настоящего исследования:

1) Предложить концептуальную схему электромеханического преобразователя, обеспечивающую электромагнитное разделение функций двигателя и генератора в приводе ИМ СУЗ;

2) Для каждого из устройств: двигателя и генератора, обеспечивающих выполнение разделённых функций в приводах КГ и АЗ, предложить математическое описание и специальное ПО, позволяющее выполнять проектирование, моделирование и численный анализ с использованием расширенных возможностей современной вычислительной техники;

3) Спроектировать, изготовить и провести численные и натурные исследования компонентов электромеханического преобразователя с разделением функций двигателя и генератора (тормоза) в одном приводе ИМ СУЗ.

На основании проведённых исследований подтвердить достоверность разработанных методик проектирования и численного анализа двигателя и генератора;

4) Предложить перспективные технические решения, позволяющие расширить область применения электромеханических преобразователей в приводах КГ и АЗ, упростить кинематическую схему этих приводов и обеспечить дополнительные возможности по настройке заданной скорости опускания РО в режиме АЗ.

## 2. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ИМ СУЗ

### 2.1 Постановка задачи по модернизации привода

Анализ решений, описанный в предыдущей главе, выявил следующие недостатки привода прототипа (табл.1.1, п.5) с электромеханическим преобразователем, совмещающим функции двигателя и генератора (тормоза):

1. Обмотка общего статора имеет завышенную длину по отношению к каждой из функционально совмещённых машин: генератора и двигателя, что ведёт к увеличению потерь в каждой из них.

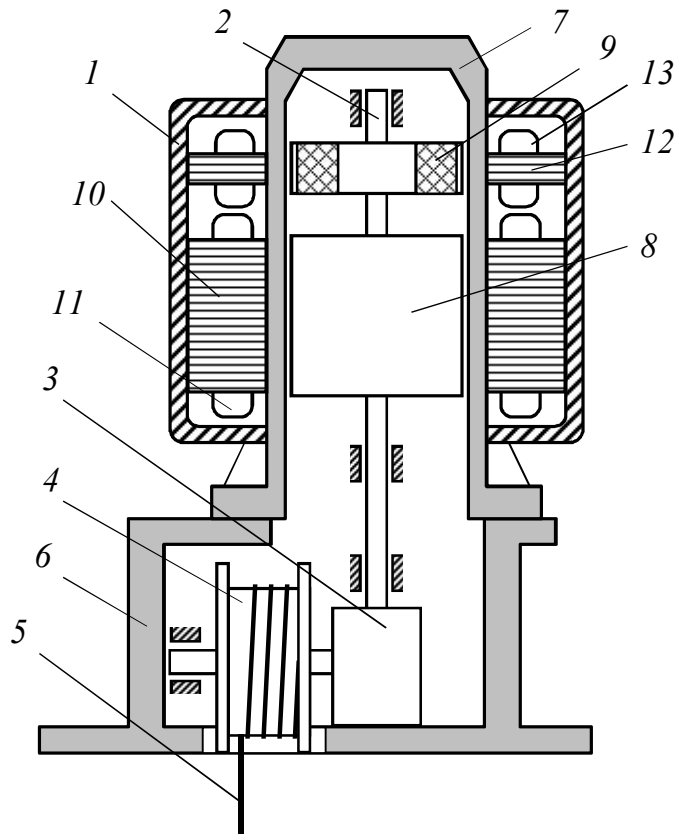
2. При работе в генераторном режиме зубчатый магнитопровод ротора создаёт дополнительную индуктивную нагрузку, которая снижает момент генератора и ограничивает диапазон скоростей, на котором он способен эффективно ограничивать скорость опускания РО.

Устранить перечисленные недостатки позволяет двухмашинная сборка из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, которые установлены в одном корпусе и соединены общим валом (рис. 2.1).

Принцип работы данного электромеханического преобразователя заключается в том, что при подключении многофазной обмотки статора основного магнитопровода *10* синхронной машины к сети многофазного напряжения создается вращающееся магнитное поле. Оно приводит во вращение зубчатый магнитопровод *8*, а с ним и вал *2*, с постоянными магнитами *9*, на котором они закреплены. Т.е. машина с основным магнитопроводом работает двигателем.

Вал *2* вращает через редуктор *3* барабан *4*, и соответственно перемещает регулирующий орган через трос *5*, один конец которого жестко закреплен на барабане. Постоянные магниты *9* наводят ЭДС в катушках *13*, в результате чего на зажимах обмотки магнитопровода генератора (рис. 2.3) наводится переменное напряжение





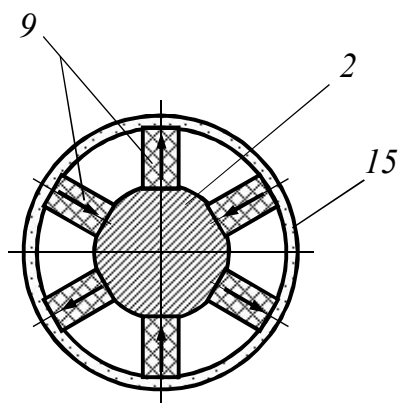
- 1 – корпус электромеханического преобразователя;  
 2 – вал;  
 3 – редуктор;  
 4 – барабан;  
 5 – трос;  
 6 – фрагмент корпуса реактора;  
 7 – герметизирующая труба;  
 8 – зубчатый магнитопровод ротора двигателя;  
 9 – постоянные магниты генератора;  
 10 – магнитопровод статора двигателя;  
 11 – катушки обмотки статора двигателя;  
 12 – магнитопровод статора генератора;  
 13 – катушки обмотки генератора

**Рис. 2.1. Электропривод для перемещения регулирующего органа (компоновочная схема)**

Под действием ЭДС, наведённой в обмотке генератора (рис. 2.3), в фазах, замкнутых конденсаторами  $C$ , потечёт ток. При небольшой частоте вращения, которая имеет место при вращении вала с магнитами в режиме двигателя, возникающий ток не оказывает какого-либо заметного влияния на момент на валу 2.

При обесточивании обмотки основного магнитопровода синхронной машины ее вал 2 раскручивается под действием силы веса регулирующего органа, приложенной к валу через барабан 4 и редуктор 3.

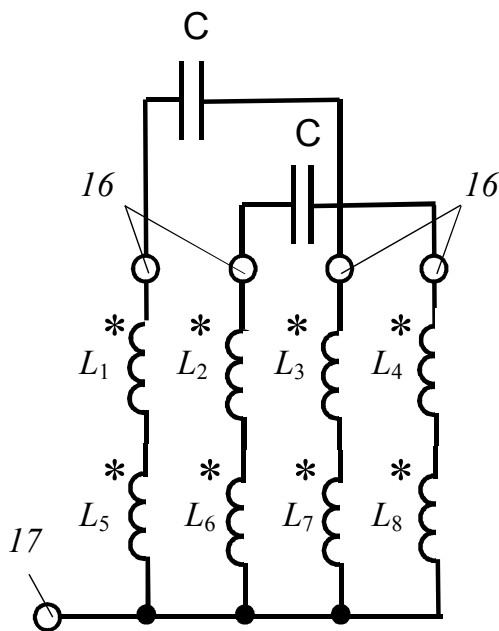
При этом постоянными магнитами 9, вращающимися вместе с валом (см. также рис. 2.2), наводится ЭДС в обмотке генератора. Обмотка состоит из катушек 13, которая вызывает ток в цепи, замкнутой конденсаторами (рис. 2.3, где катушки 13 обмотки обозначены символом  $L$  с индексом, обозначающим номер катушки вдоль окружности статора). Возникающий ток, первоначально небольшой, однако, при достижении ротором частоты вращения, соответствующей заданной скорости установившегося опускания регулирующего органа, он резко возрастает, обеспечивая необходимое для торможения РО увеличение момента (рис.1.14).



2 – вал;  
9 – постоянные магниты;  
15 – оболочка

**Рис. 2.2. Схема конструкции ротора генератора**

На установившейся частоте вращения тормозной электромагнитный момент от взаимодействия поля постоянных магнитов с обмоткой генератора уравнивает момент от веса РО, приложенный через барабан и редуктор к валу 2. Разгон РО прекращается, и он опускается равномерно, без чрезмерных ударных нагрузок в конце хода.



16 – зажимы для подключения фаз обмотки;  
 17 - зажим для подключения нулевой точки

**Рис. 2.3. Схема соединения катушек обмотки генератора**

Для достижения электроприводом перемещения регулирующего органа заданной установившейся скорости равномерного опускания необходимо, чтобы частота ЭДС, наводимой в фазах обмотки дополнительного магнитопровода синхронной машины, была меньше величины, определяемой соотношением [46]

$$n_{\text{уст}} < \frac{30}{\pi p \sqrt{LC}}, \quad (2.1)$$

где  $n_{\text{уст}}$  - скорость опускания, об/мин;  $p$  – число пар полюсов обмотки дополнительного магнитопровода,  $L$ , Гн и  $C$ , Ф – индуктивность одной её фазы и ёмкость подключенных к её зажимам конденсаторов.

Этому значению частоты вращения ротора соответствует максимум тормозного электромагнитного момента. Он имеет место вблизи значения скорости, соответствующей частоте резонанса напряжений в  $LC$  контурах, образованных замыканием конденсаторами фаз обмотки генератора.

Выше уровня резонансной частоты ограничение скорости опускания РО невозможно, поскольку при чрезмерном разгоне, выше значения, соответствующего максимуму момента под воздействием каких-либо случайных

факторов, происходит резкое падение тормозного электромагнитного момента и неуправляемый разгон подвижных частей привода. Для надежного функционирования устройства нужно, чтобы амплитуда тормозного момента соответствовала скорости, которая превышает скорость установившегося опускания РО и является максимально большой.

Амплитуда момента определяется величиной тока, которая, в свою очередь, определяется добротностью резонансных контуров, образованных фазами обмотки дополнительного магнитопровода и конденсаторами. В данном устройстве она выше, чем у базовых образцов, за счёт меньшего сопротивления более коротких катушек обмотки отдельного генератора по сравнению с совмещённым с двигателем аналогом, поскольку они намотаны не на всю длину общей машины, а только на её дополнительный магнитопровод.

Повышения функциональной надёжности привода с отдельным генератором происходит за счёт более интенсивного увеличения скорости на участке разгона регулирующего органа и более эффективного торможения на участке ограничения скорости опускания РО до установившегося значения, за счёт повышения добротности резонансных контуров.

Преимущества привода РО в предлагаемом решении (компоновка с отдельным двигателем и генератором):

- исключается электрическая связь между двигательной и генераторной частями, что повышает надёжность работы каждого из устройств, улучшает характеристики генератора по развиваемому тормозному моменту и диапазону рабочих скоростей;

- полностью устраняются возможные дисбалансы магнитного потока по фазам, что способствует повышению плавности движения.

- появляется возможность конструирования магнитных систем генератора с меньшим магнитным рассеянием потока магнитов, а значит с лучшим их использованием;

- упрощается математическое описание и проектировочная схема каждой из совместно работающих в электроприводе машин.

Удвоение (в пределе) длины вылета лобовых частей в такой конструкции частично компенсируется меньшими потерями в меди, благодаря тому, что в длительном режиме работы (в режиме удержания и перемещения РО двигателем) обмотка генератора оказывается практически отключенной, вследствие малости наводимой ЭДС и протекающего по ней тока. Кроме того, она обладает меньшими магнитными потерями, вследствие полной симметрии распределения потока рассеяния по фазам.

Особенностями устройства являются работа в шаговом приводе и общий диаметр расточки статора  $D$ . В связи с этим требуется выработать новый подход к совместному проектированию генератора и двигателя для работы в шаговом приводе перемещения регулирующего органа.

## **2.2 Подход к определению базовых размеров электромеханического преобразователя привода РО**

Базовыми размерами электромеханического преобразователя (машины), необходимыми для определения всех остальных его размеров при проектировании, являются диаметр расточки её статора или диаметр ротора (что на стадии начало проектирования одно и то же) и длина пакета магнитопровода статора [48, 49].

При совместном проектировании обеих машин по компоновочной схеме с расположением роторов двигателя и генератора на общем валу необходимо учитывать оптимальное соотношение моментов инерции двигателя  $J_{дв}$ , кг·м<sup>2</sup> и подвижных частей привода  $J_{пр}$ , кг·м<sup>2</sup> [53]. С учётом момента инерции, которым обладает ротор генератора, это оптимальное соотношение можно записать в следующем виде

$$J_{пр} + J_{г} = (1 \div 2) J_{дв} , \quad (2.2)$$

где  $J_{г}$  – момент инерции ротора генератора, кг·м<sup>2</sup>. Режим работы генератора – повторно-кратковременный, режим работы двигателя – длительный. Оба устройства должны быть расположены в общем корпусе, иметь одинаковую расточку статора, и, по возможности, общий штамп.

Полагая роторы двигателя и генератора однородными цилиндрами с одинаковым внешним диаметром условие (2.2) можно переписать в виде

$$J_{\text{пр}} = \frac{\pi}{32} D^5 [(1 \div 2) \lambda_1 \rho_1 - \lambda_2 \rho_2], \quad (2.3)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – относительная, по отношению к диаметру расточки  $D$ , м, аксиальная длина ротора двигателя и ротора генератора, соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – средняя плотность материала ротора двигателя, рассчитанная, исходя из наличия воздушных включений и объёмов с плотностью, отличной от плотности железа, кг/м<sup>3</sup>.

Исходя из уравнения для машинной постоянной (Арнольда), для двигателя и генератора можно записать [73]

$$\frac{D^2 \lambda_1}{M_1} = \frac{1}{K_1 B_{\delta 1} A_1} \quad (2.4)$$

$$\frac{D^2 \lambda_2}{M_2} = \frac{1}{K_2 B_{\delta 2} A_2}, \quad (2.5)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – конструктивные коэффициенты двигателя и генератора, определяемые формой кривой индукции в зазоре, коэффициентом полюсного перекрытия и обмоточным коэффициентом каждой из машин;

$B_{\delta 1}$ , и  $B_{\delta 2}$  – индукция в зазоре двигателя и генератора, Тл;

$A_1$ ,  $A_2$  – линейная нагрузка двигателя и генератора, А/м;

$M_1$  и  $M_2$  – электромагнитный момент, двигательный и генераторный (тормозной), развиваемый каждой из них, Нм.

Следует отметить, что на частоте регулирования, с которой осуществляется перемещение РО двигателем, электромагнитный момент генератора незначителен вследствие малости скорости вращения ротора в этом режиме, влияния на движение привода он не оказывает.

Выражая  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  из (2.4) и (2.5), и подставляя полученные выражения в (2.3), для середины допустимого диапазона соотношений момента инерции ротора двигателя, и генератора с подвижными частями привода получим ре-

комендуемое значение общего для двигателя и генератора диаметра расточки  $D$ , м

$$D = 3,2 \sqrt{\frac{J_{\text{пр}}}{\frac{1,5M_1\rho_1}{K_1B_{\delta 1}A_1} - \frac{M_2\rho_2}{K_2B_{\delta 2}A_2}}} \quad (2.6)$$

Благодаря наличию магнитомягких вставок, внедрённых в тело герметизирующей перегородки, отделяющей расточку статора от полости ротора, индукция в зазоре двигателя  $B_{\delta 1}$  может быть выбрана в рекомендуемых для других электрических машин пределах, т.е. в диапазоне  $0,7 \div 0,95$  Тл.

В силу технологических факторов и необходимости ограничения индуктивного сопротивления, в генераторе такие вставки могут отсутствовать, что влечёт увеличение неферромагнитных путей замыкания потока между статором и ротором. Поэтому индукцию в зазоре генератора следует ограничить уровнем не более 0,5 Тл, при использовании редкоземельных магнитов, и не более 0,25 Тл при использовании ферритов (бария или самария). Однако, во избежание чрезмерного завышения габаритов, для этого устройства можно увеличить линейную токовую нагрузку  $A_2$ , обеспечивая её за счёт увеличенной плотности тока. Вследствие ограниченной по времени длительности движения РО до перемещения крайнее положение, плотность тока допустимо довести до  $15-20$  А/мм<sup>2</sup>, обеспечивая сокращение осевого габарита.

С линейной токовой нагрузкой и МДС фазы обмотки связывается размер магнита в направлении намагничивания. Для магнитной системы с радиально намагниченными магнитами равенство МДС обмотки и магнитов обеспечивается, если длину последних  $l_m$ , м выбирать, исходя из условия

$$l_m = \frac{\pi D A_2}{4 p_2} \frac{1}{H_{CB}}, \quad (2.7)$$

где  $H_{CB}$  – коэрцитивная сила материала постоянного магнита на кривой размагничивания по индукции, А/м.

### 2.3 Проектирование индукторного двигателя

Проектируемый индукторный двигатель с электромагнитным возбуждением от постоянной составляющей фазных токов [56, 92] позволяет обеспечить глубокую форсировку момента при увеличении тока, за счёт малого сопротивления прохождению потока по его магнитной цепи.

Исходя из известных базовых размеров, диаметра расточки статора двигателя  $D$ , м и относительной длины его пакета

$$\lambda_1 = \frac{L_\delta}{D}, \quad (2.8)$$

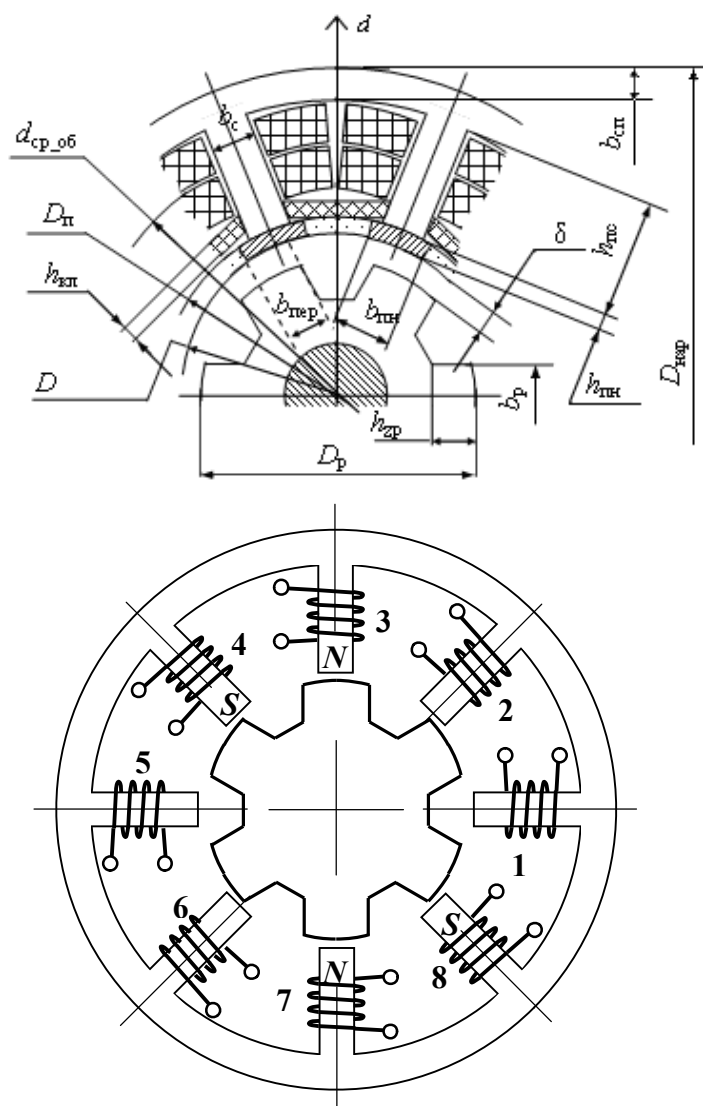
Проектирование по исходным данным табл. 2.1 осуществляется в последовательности, представленной в табл. 2.2. Принятые обозначения размеров показаны на проектировочной схеме рис. 2.4 (фрагмент магнитной цепи).

Особенностью этой методики является расчёт магнитной цепи, при определении развиваемого машиной момента, с учётом насыщения её ферромагнитных участков по слаборазветвлённой схеме замещения (рис. 2.5).

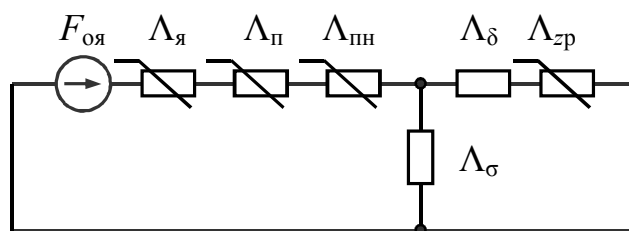
В состав схемы замещения магнитной цепи явнополюсной индукторной машины входят магнитные проводимости  $\Lambda$ , Гн следующих участков магнитной цепи:

- полюса статора  $\Lambda_{\text{п}}$  и участков ярма к нему примыкающих  $\Lambda_{\text{я}}$ ;
- полюсного наконечника статора  $\Lambda_{\text{пн}}$ ;
- воздушного зазора  $\Lambda_\delta$ ;
- путей замыкания потока рассеяния: пазового, в том числе по полюсным наконечникам, и лобовых частей  $\Lambda_\sigma$ ;
- зубцов ротора в секторе, ограниченном полюсным делением статора  $\Lambda_{\text{зр}}$ .





**Рис. 2.4. Проектировочная схема и схема конструкции индукторной машины с зубчатым статором и ротором**



**Рис. 2.5. Расчётная схема замещения магнитной цепи индукторного двигателя**

Магнитный поток по этой схеме замещения удобно определять по известному графоаналитическому методу [99], подходящему для расчёта малоразветвлённых магнитных цепей. В соответствии с ним вычисления проводятся в следующей последовательности:

а) пересчёт характеристик намагничивания зубцов и ярма с участками магнитопровода для потока возбуждения статора из кривой намагничивания электротехнической стали;

б) построение характеристики намагничивания зубцов, ярма и полюсных наконечников статора путём сложения значений аргумента (МДС) при одинаковых значениях потока;

в) построение кривой намагничивания зубцов ротора;

г) определение общей характеристики ферромагнитных участков магнитной цепи  $F_{Fe}(\Phi)$  сложением значений аргумента кривых по п.п. б и в;

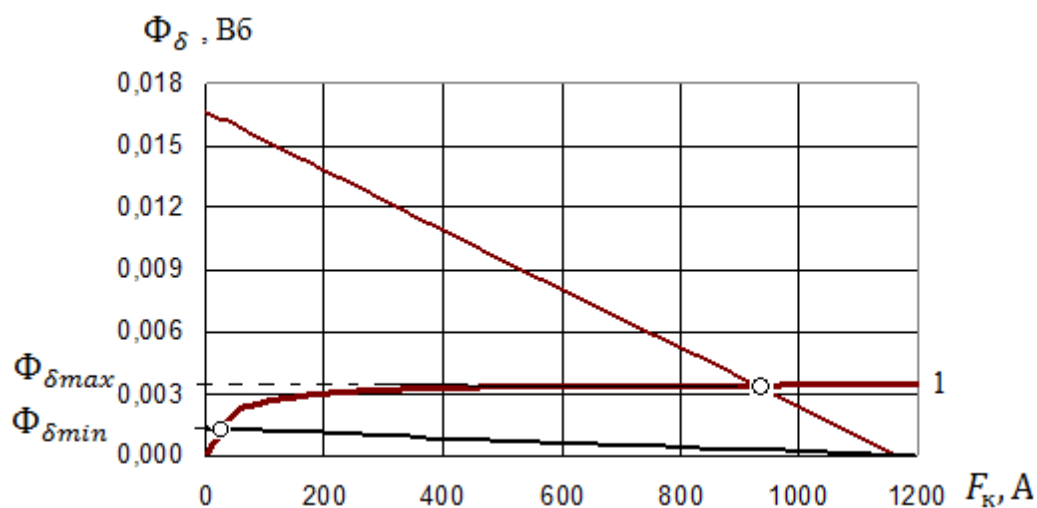
е) расчет линейной проводимости для потока через воздушный зазор под полюсным наконечником статора при соосном расположении зубцов статора и ротора  $\Lambda_{\delta}$ ;

ж) определение максимального потока в воздушном зазоре по ординате точки пересечения характеристики  $F_{Fe}(A)$ ,  $\Phi$  (Вб) и прямой, характеризующей функцию максимального (в силу соосного расположения зубцов статора и ротора) магнитного потока в зазоре  $\Phi_{\delta\max}$ , Вб

$$F_{\delta} = F_{\kappa} - \frac{\Phi_{\delta l}}{\Lambda_{\delta} + \Lambda_{\sigma}}, \quad (2.9)$$

где  $F_{\kappa}$  – МДС катушки обмотки якоря на явно выраженном полюсе, предварительно определённая, исходя из принятых значений линейной нагрузки  $A$  (в Амперах на метр окружности расточки) и плотности тока  $j$  (в А/мм<sup>2</sup>).

Построения, отражающие изложенную последовательность графоаналитического решения нелинейного уравнения магнитной цепи машины, показаны на рис. 2.6. Здесь кривая  $I$  представляет собой сумму падений магнитного напряжения на всех ферромагнитных участках магнитной цепи двигателя. Верхняя и нижняя прямые на этом рисунке представляют проводимость воздушного зазора. Они получены при совпадении оси фазы обмотки и оси зубца ротора и при совпадении её с осью паза ротора, соответственно.



**Рис. 2.6. Графоаналитическое решение нелинейного уравнения магнитной цепи явнополюсной машины**

Методика табл. 2.2 по исходным данным табл. 2.1 содержит 90 пунктов расчёта с определением геометрических размеров, обмоточных данных, электромагнитных, моментных и массогабаритных характеристик. Методика основывается на фундаментальных законах электромеханики, кроме того на практических экспериментальных данных.

*Таблица 2.1*

**Исходные данные для проектирования индукторного двигателя с самовозбуждением**

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения
Номинальный вращающий момент	$M_{\text{ном}}$	Нм (кГ·см)
Рабочая температура (с учётом перегрева)	$T^{\circ}$	$^{\circ}\text{C}$
Диаметр расточки статора	$D$	мм
Относительная длина пакета статора	$\lambda_1$	-

## Алгоритм и методика проектирования индукторных двигателей

## Последовательность и расчётные формулы проектирования индукторного двигателя

№ п.п.	Наименование параметра	Обозначение	Расчётное соотношение	Единицы измерения
1	2	3	4	5
1	Соотношение главных размеров: “Длина/Диаметр” статора	$\lambda$	$L_\delta/D$	-
	<i>Выбирается с учётом допустимых пределов изменения отношения <math>L_\delta/\tau</math> (<math>\tau</math> – длина полюсного деления), рекомендованных в литературе по проектированию машин соответствующего исполнения и габаритов.</i>			
2	Число фаз обмотки статора	$m$	$m = 3 \div 6$	-
	<i>Выбор <math>m=3</math> обеспечивает наиболее простую конструкцию двигателя, <math>m = 6</math> – наиболее быстродействующую, с точки зрения верхней границы частотного диапазона при тех же характеристиках источника напряжения или тока.</i>			
	<i>Выбор нечётного <math>m</math> устанавливает электромагнитные связи между фазами, свойственные индукторно-реактивному двигателю.</i>			
	<i>Выбор чётного <math>m</math> устанавливает электромагнитные связи, характерные для индукторного двигателя.</i>			
3	Число зубцов на статоре	$Z_1$	$2m$	-
4	Число полюсов поля якоря и поля возбуждения обмотки статора	$2p_1$ $2p_2$	$2p_1 = 2$ , при нечётном $m$ , $2p_1 = 4$ , при чётном $m$ , $2p_2 = Z_1$	-
5	Число зубцов на роторе	$Z_2$	$Z_1 \pm 2$	-
6	Обмоточный коэффициент	$K_{об}$	$K_p K_y \cdot$ $K_p = 1.$ $K_y$ – коэффициент укорочения, $K_y = \sin \frac{\beta\pi}{2},$ где $\beta$ – относительное укорочение шага, $\beta = \frac{2p_1}{Z_1}$	-
7	Относительная длина полюсных дуг зубцов статора	$\alpha_\delta$	$\alpha_\delta = 0,45 \div 0,49$	-

1	2	3	4	5
8	Линейная токовая нагрузка	$A$	Для закрытых машин малой мощности с самовентиляцией линейную нагрузку следует задавать в области минимально рекомендованных значений, $A=14000\div 25000$	А/м
9	Индукция в зазоре	$B_{\delta}$	$0,70\div 0,95$	Тл
10	Диаметр расточки статора	$D$	(2.6)	м
11	Осевая длина пакета с учётом толщины нажимных листов	$L_{\delta}$	$1000\lambda D/k_c$	мм
где $k_c$ – коэффициент заполнения сталью пакета магнитопровода статора. В зависимости от толщины листов и вида из изоляции следует принять $k_c=0,93$ или $0,95$ – для листов толщиной $0,35$ и $0,5$ мм, изолированных оксидной плёнкой. Для лакированных листов той же толщины следует принимать $k_c=0,93$ или $0,91$ .				
12	Осевая длина ротора	$L_p$	$(1,01\div 1,05)L_{\delta}$	мм
13	Ширина полюсных наконечников статора	$b_{пн}$	$\frac{\pi D \cdot 1000}{Z_1} \alpha_{\delta}$	мм
14	Плотность тока	$j$	Задаётся как действующее значение на одном полупериоде изменения (на втором полупериоде $j=0$ )	А/мм <sup>2</sup>
15	Коэффициент насыщения (предварительно)	$K_n$	$1,4\div 1,6$	-
16	Площадь меди обмоточных проводов	$S_m$	$\frac{\pi D A K_n}{Z_1 j}$	мм <sup>2</sup>
17	Коэффициент заполнения пазов медью сосредоточенных катушек, отдельно намотанных на оправке и вставленных затем в пазы (предварительно)	$K_3$	$0,65\div 0,72$ до $0,75$ в реально изготовленных конструкциях	-
18	Припуск на сборку магнитопровода	$\xi$	$0,1\div 0,3$ – в зависимости от размеров сечения и качества сборки магнитопровода	мм
19	Диаметр и площадь поперечного сечения провода без изоляции	$d_{пр}, S_{пр}$	Выбирается из ряда номинальных диаметров обмоточного провода определённой марки, с учётом предполагаемого значения номинального тока	мм

1	2	3	4	5
20	Диаметр изолированного провода	$d_{из}$	Из справочных данных на выбранный провод	мм
21	Площадь, занятая проводами обмотки в пазу	$S_{пр}$	$\frac{4d_{из}^2 S_M}{\pi d_{пр}^2 K_3}$	мм <sup>2</sup>
22	Число витков катушек на одном зубце	$w$	$Ц.Ч. \left( \frac{S_{пр} K_3}{d_{из}^2} \right)$ Ц.Ч. – целая часть	-
23	Ток катушек, расположенных на одном зубце	$I_{кат}$	$\frac{\pi d_{пр}^2 j}{4}$	А
<i>Предполагается, что если по технологическим причинам на каждом зубце статора расположена не одна, а несколько катушек, то все они соединены последовательно и обтекаются общим током.</i>				
24	МДС катушек одного зубца	$F_k$	$I_{кат} w$	А
25	Общая толщина изоляции	$\Delta_{из}$	1,00÷1,25	мм
<p><i>Определяется в соответствии с предварительно составленной спецификацией паза. Для низковольтных двигателей большинства климатических исполнений (по ГОСТ 15150-69) можно рекомендовать следующую спецификацию паза</i></p> <p><i>1. Пазовая коробочка (корпусная изоляция по периметру паза):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 слой стеклолакоткани,</li> <li>- 1 слой миканита,</li> <li>- 1 слой стеклолакоткани.</li> </ul> <p><i>2. Катушечная изоляция:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- снаружи 1 слой лакоткани,</li> <li>- к проводу 1 слой микалента, оба слоя с перекрытием 1/2 ширины.</li> </ul> <p><i>(По каждой позиции спецификации следует выбрать конкретные марки и толщину)</i></p>				
26	Высота полюсного наконечника	$h_{пн}$	$(0,25 \div 0,30) b_{пн}$	мм
27	Ширина зубца статора	$b_c$	$\frac{\pi(1000D + 2h_{пн})}{(2 \div 4)Z_1}$	мм
28	Толщина пазового клина	$h_{кл}$	<i>Рекомендуется пазовый клин из стеклотекстолита СТЭФ толщиной 2 – 4 мм.</i>	мм
29	Площадь, занимаемая изоляцией, вне зависимости от высоты паза:			
	- пазовый клин	$S_{кл}$	$\left( \frac{\pi D_{пн}}{Z_1} - b_c \right) h_{кл}$	
	- площадь уменьшения паза "в свету"	$S_y$	$\left( \frac{\pi D_{пн}}{Z_1} - b_c \right) \zeta$	мм <sup>2</sup>

1	2	3	4	5
	- пазовая изоляция	$s_{\text{п}}$	$2\left(\frac{\pi D_{\text{п}}}{Z_1} - b_{\text{с}}\right)\Delta_{\text{п}}$	
	- катушечная изоляция	$s_{\text{к}}$	$4\left(\frac{\pi D_{\text{п}}}{Z_1} - b_{\text{с}}\right)\Delta_{\text{к}}$	
	Всего:	$s_{\text{из}}$	$s_{\text{кл}} + s_{\text{у}} + s_{\text{п}} + s_{\text{кат}}$	
30	Площадь, занимаемая изоляцией, зависящая от высоты паза:			
	- уменьшение паза "в свету"	$s'_{\text{у}}$	$\left(2 + \frac{2\pi}{Z_1}\right)\zeta$	
	- пазовая изоляция	$s'_{\text{п}}$	$\left(2 + \frac{2\pi}{Z_1}\right)\Delta_{\text{п}}$	мм
	- катушечная изоляция	$s'_{\text{к}}$	$\left(4 + \frac{4,4\pi}{Z_1}\right)\Delta_{\text{к}}$	
	Всего:	$s'_{\text{из}}$	$s'_{\text{у}} + s'_{\text{п}} + s'_{\text{к}}$	
31	Площадь паза магнитопровода статора в функции высоты полюсов (коэффициенты квадратного уравнения):			
	- квадратичная функция высоты зубцов статора	$a$	$\frac{\pi}{Z_1}$	-
	- линейная функция высоты зубцов статора	$b$		мм
			$\pi \frac{D + 2h_{\text{кл}}}{Z_1} - b_{\text{с}} - s'_{\text{из}} - 2 \frac{0,001H_{\text{зс}}d_{\text{из}}^2}{k_3 s_{\text{пр}} j}$	
	- свободный член	$c$	$s_{\text{кл}} - s_{\text{из}} - \frac{2F_{\text{зс}}d_{\text{из}}^2}{k_3 s_{\text{пр}} j}$	мм <sup>2</sup>
32	Высота паза (и зубца) магнитопровода статора	$h_{\text{пс}}$	$h_{\text{обм}} + h_{\text{кл}}$	мм
33	Радиальный размер спинки статора	$b_{\text{сп}}$	$(0,5 \div 0,55)b_{\text{с}}$	мм
34	Наружный диаметр магнитопровода статора	$D_{\text{нар}}$	$D + 2(h_{\text{пс}} + b_{\text{сп}})$	мм
35	Средний радиус закругления лобовых частей катушек	$r_{\text{зак}}$		мм
			$\frac{\pi}{1000Z_1}(1000D + 2h_{\text{пн}} + h_{\text{пс}}) - \frac{b_{\text{с}}}{2}$	
36	Средняя длина витка	$l_{\text{ср}}$		м
			$\frac{\pi}{2000} \left[ \frac{\pi(D_{\text{п}} + h_{\text{пс}})}{Z_1} + b_{\text{с}} \right] + 0,002L_{\delta}$	

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5
37	Активное сопротивление одной катушки при 20°C	$r_{кат}$	$\frac{(1/\lambda_m)w_k l_{cp}}{s_{пр}}$	Ом
	$1/\lambda_m=0,01724(Ом \cdot м^2) / м$ - удельное электрическое сопротивление меди.			
38	Активное сопротивление фазы при 20°C	$r_{ф20}$	$2r_{кат} \frac{m}{Z_1}$	Ом
39	Активное сопротивление фазы при рабочей температуре	$r_p$	$r_{ф20} [1 + 0,004(T^\circ - 20)]$	Ом
	$0,004$ – температурный коэффициент сопротивления, Ом/град.			
40	Воздушный зазор	$\delta$	в пределах (0,25÷0,5)	мм
41	Диаметр ротора	$D_p$	$1000D-2\delta$	мм
42	Ширина зубца ротора	$b_p$	$b_{пн}+2\delta$	мм
43	Высота зубца ротора	$h_{зр}$	$(0,75\div0,85)b_p$	мм
44	Действующее значение импульса тока фазы	$I_\phi$	$js_{пр} \frac{Z_1}{m}$	А
45	Амплитуда импульса тока в фазе, при треугольной форме импульса	$I_{max}$	$\frac{I_\phi}{\sqrt{3}}$	А
46	Проводимость рассеяния магнитного потока по полюсным наконечникам	$\lambda_{сн}$	$\mu_o \frac{h_{пн} L_\delta}{\tau_c - b_{пн}} 10^{-3}$	Гн
47	Проводимость пазового рассеяния (на один паз)	$\lambda_{\sigma-п}$	$\mu_o \frac{0,001h_{пс} L_\delta}{\pi \frac{D_{п} + h_{пс}}{Z_1} - b_c}$	Гн
48	Кривая намагничивания зубца статора	$\Phi(F_z)$	Пересчёт из кривой намагничивания электротехнической стали $B_1(H_1)$	Вб(А)
49	Кривая намагничивания ярма статора	$\Phi(F_я)$	Пересчёт из кривой намагничивания электротехнической стали $B_1(H_1)$	Вб(А)
50	Кривая намагничивания зубцов и ярма статора	$\Phi(F_{зл})$	Сложение аргументов функций п.48 и п.49	Вб(А)
51	Кривая намагничивания полюсных наконечников статора	$\Phi(F_{пн})$	Пересчёт из кривой намагничивания нержавеющей стали $B_2(H_2)$	Вб(А)
52	Кривая намагничивания полюса статора	$\Phi(F_{зл})$	Сложение аргументов функций п.50 и п.51	Вб(А)
53	Кривая намагничивания зубца ротора	$\Phi(F_z)$	Пересчёт из кривой намагничивания нержавеющей стали $B_1(H_1)$	Вб(А)



1	2	3	4	5
54	Кривая намагничивания полюса статора и зубца ротора	$\Phi(F_{\Sigma})$	Сложение аргументов функций п.52 и п.53	Вб(А)
55	Магнитная проводимость зазора под полюсом	$\Lambda_{\delta}$	$0,001\mu_0 L_{\delta} \frac{b_{\text{пн}} + b_{\text{зр}}}{2\delta}$	Гн
56	Амплитуда магнитного потока	$\Phi_{\delta\text{max}}$	Ордината точки пересечения кривой п.54 и прямой (2.8), рис. 2.6	Вб
57	МДС зазора	$\Phi_{\delta}$	$F_{\text{к}} - \frac{\Phi_{\delta\text{max}}}{\Lambda_{\delta}}$	А
58	Падение магнитного напряжения на ферромагнитных участках	$F_{\Sigma}$	Абсцисса точки пересечения кривой п.54 и прямой (2.8), рис. 2.6	А
59	Коэффициент насыщения (окончательно)	$K_{\text{н}}$	$\frac{F_{\Sigma} + F_{\delta}}{F_{\delta}}$	-
<p>Подлежит сравнению с принятым ранее значением (п.15). При существенном отличии предварительно принятое значение корректируется, и выполняется пересчёт, начиная с этого пункта</p>				
60	Относительная длина полюсного деления	$t_z/\delta$	$\frac{\pi D 1000}{Z_2 \delta}$	-
61	Коэффициент уменьшения проводимости зазора под пазом ротора	$k_{\Lambda}$	Из табл. 2.3, исходя из найденного в предыдущем пункте отношения $t_z/\delta$	-
62	Средний электромагнитный момент, обеспечиваемый катушками одной фазы на периоде изменения	$M_{\text{ср}}$	$\frac{1}{2\lambda_{\delta}} [\Phi_{\delta\text{max}} (1 - k_{\Lambda})^2] \frac{2000D}{b_{\text{пн}} + b_{\text{зр}}} \frac{Z_1}{m}$	Н·м
63	Динамический момент при одновременном возбуждении половины фаз	$M_{\text{дин}}$	$\frac{m}{2} M_{\text{ср}}$	Н·м
	Проверка соответствия динамического момента требуемому значению		-	-
64	Амплитуда индукции в зазоре	$B_{\delta\text{м}}$	$\frac{2000000\Phi_{\delta\text{max}}\Lambda_{\delta}}{(b_{\text{пн}} + b_{\text{зр}})L_{\delta}\Lambda_{\delta\sigma}}$	Тл
65	Амплитуда индуктивности фазы	$L_{\text{max}}$	$\frac{w\Phi_{\delta\text{max}}}{I_{\text{ном}}} \frac{Z_1}{m}$	Гн
66	Электромагнитная постоянная времени, максимальное значение	$\tau$	$\frac{L_{\text{max}}}{r_{\phi 20}}$	с

1	2	3	4	5
67	Минимальное значение индуктивности фазы	$L_{min}$	$4W^2(2\lambda_{\sigma_n} + 2\lambda_{\sigma_H})\frac{Z_1}{m}$	Гн
68	Электрические потери в меди обмотки при рабочей температуре	$P_{эм}$	$\frac{m}{2}I_{\phi}^2 r_p$	Вт
69	Момент инерции ротора	$J$	$\frac{\pi\rho_{ж}L_{\delta}}{32000}(2D_p^2 10^{-12} - \Delta)$ где $\Delta = 0,5 \cdot 10^{-12} [(D_p^2 - 4D_p h_{зр} + 4h_{зр}^2)(2D_p^2 - 4D_p h_{зр} + 4h_{зр}^2)]$ , $\rho_{ж}$ – плотность железа	кг·м <sup>2</sup>
70	Частота приемистости при идеальном холостом ходе	$\Omega_{пр}$	$\cos\left(\frac{\pi}{2m}\right)\sqrt{\frac{M_{дин}}{Z_2 J} \frac{60}{\pi}}$	об/мин
71	Наибольшая частота перемагничивания магнитопровода статора	$f_{max}$	$\frac{\Omega_{пр} Z_2}{60}$	Гц
72	Номинальная частота вращения	$\Omega_{ном}$	Ввод значения $\Omega_{ном} \leq \Omega_{пр}$	об/мин
73	Масса спинки магнитопровода статора	$m_{сп}$	$\frac{\pi}{4} [D_{нар}^2 - (D_{нар}^2 - 2b_{сп})^2] L_{\delta} k_3 \rho_{ж} 10^{-9}$	кг
74	Масса зубцов магнитопровода статора	$m_{zc}$	$\rho_{ж} S_{zc} h_{пс} k_3 Z_1 10^{-9}$	кг
75	Магнитные потери в спинке (ярме) статора	$P_{сп}$	$p_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \left(\frac{k_{\sigma} B_{\delta} b_c}{2b_{сп}}\right)^2 m_{сп}$ где $k_{\sigma}$ – коэффициент рассеяния, $k_{\sigma} = \frac{\Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma H} + \Phi_{\sigma П}}{\Phi_{\delta}}$ . Магнитными потерями в роторе можно пренебречь, ввиду в $Z_2$ раз меньшей частоты перемагничивания его магнитопровода.	Вт
76	Масса полюсных наконечников статора	$m_{пн}$	$Z_1 h_{пн} (D + h_{пн}) L_{\delta} \operatorname{arctg}\left(\frac{b_{пн}}{D}\right) \rho_{ж} 10^{-9}$	кг
77	Магнитные потери в зубцах статора	$P_{zc}$	$0,11 \left(\frac{Z_2 Z_2 \Omega_{ном} B_{\delta}}{1000}\right)^2 m_{zc}$	Вт
78	Магнитные потери в полюсных наконечниках статора	$P_{пн}$	$0,11 \left(\frac{Z_2 Z_2 \Omega_{ном} B_{\delta}}{1000}\right)^2 m_{пн}$	Вт
79	Масса зубцов ротора	$m_{зр}$	$h_{зр} L_p b_p Z_2 \rho_{ж} 10^{-9}$	кг
80	Магнитные потери в роторе	$P_{рп}$	$p_{1/50} \left(\frac{\Omega_{ном} p}{Z_2 3000}\right)^2 B_{\delta}^2 m_{зр}$	Вт

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5
81	Сумма магнитных потерь на номинальной частоте	$P_{\text{маг}}$	$P_{\text{пн}} + P_{\text{zc}} + P_{\text{сп}} + P_{\text{мп}}$	Вт
82	Длина статора с учётом вылета лобовых частей	$L_S$	$2 \frac{D_{\text{нар}} - 2b_{\text{сп}}}{Z_1} + L_{\delta} + 2l_{\text{пр}}$	мм
83	Полезная мощность на номинальной частоте	$P_2$	$\frac{2\pi\Omega_{\text{ном}} M_{\text{дин}}}{60}$	Вт
84	Электрический КПД на номинальной частоте	$\eta$	$\frac{P_2}{P_2 + P_{\text{маг}} + P_{\text{эм}}}$	-
85	Машинная постоянная (Арнольда), расчёт через механические параметры	$C_A$	$\frac{D^2 L_{\delta}}{M_{\text{дин}} \cdot 10^{-9}}$	$\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$
86	Машинная постоянная (Арнольда), расчёт через электрические параметры	$C_A$	$\frac{2}{\pi\alpha_{\delta} K_{\text{об}} AB_{\delta}}$	$\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$
87	Масса меди обмоточных проводов $\rho_{\text{м}} = 8940 \text{ кг/м}^3$ - плотность меди.	$m_{\text{меди}}$	$2w_{\text{к}} Z_1 l_{\text{ср}} s_{\text{пр}} \rho_{\text{м}} 10^{-6}$	кг
88	Общая масса ферромагнитных материалов	$m_{\text{Fe}}$	$\rho_{\text{ж}} [0,25\pi(D_{\text{р}} 1000 - b_{\text{р}} h_{\text{зр}}) + b_{\text{р}} h_{\text{зр}}] L_{\text{р}} \cdot 10^{-9} + m_{\text{сп}} + m_{\text{zc}} + m_{\text{пн}}$	кг
89	Общая масса активных частей	$m_{\text{а}}$	$m_{\text{меди}} + m_{\text{Fe}}$	кг
90	Удельная тепловая нагрузка от электрических потерь в обмотке	$A_J$	$\frac{1140 \cdot P_{\text{м}}}{[1 + 0,004(T_{\text{о}} - 20)]\pi D l_{\text{ср}}}$	$\frac{\text{А}^2}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$
<i>Для проводов класса изоляции F допустимо не более 1500-2000</i>				

Таблица 2.3

**Относительное уменьшение магнитной проводимости зазора при повороте ротора на половину зубцового деления из соосного положения зубцов**

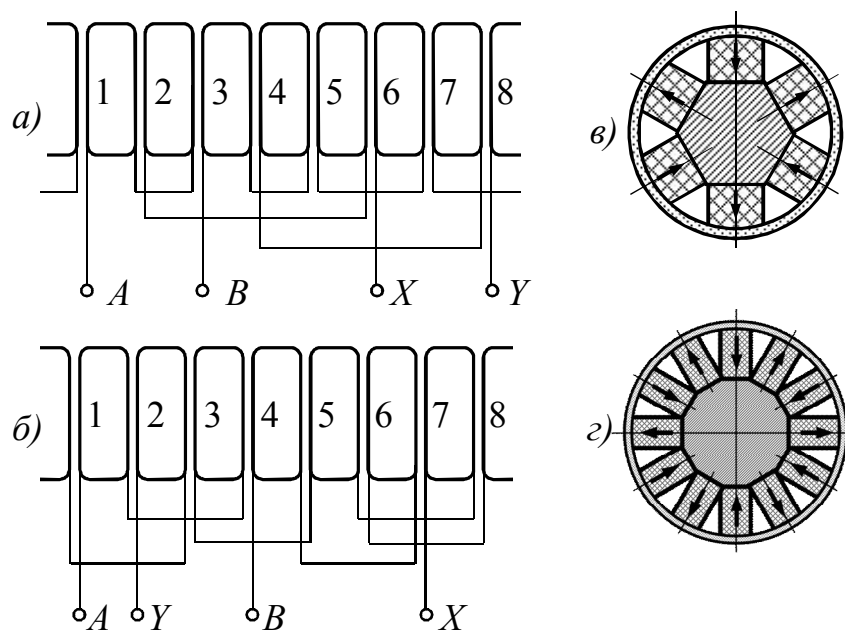
$t_z/\delta$	15	20	25	30	40	50	80	100	120	140	160	180	200
$k_{\Lambda}$	0,301	0,278	0,259	0,207	0,191	0,177	0,088	0,077	0,068	0,061	0,056	0,051	0,048

## 2.4 Разработка генератора для ограничения скорости опускания РО

При разработке магнитоэлектрических машин с минимальным уровнем пульсаций момента и мощности, как и других двигателей и генераторов

переменного тока, весьма важно бывает обеспечить плавное распределение МДС и магнитного потока в зазоре. Стандартный подход при решении этой проблемы предусматривает подавление высших гармоник путём увеличения числа катушек в катушечных группах и укорочения их шага. В пределе шаг может быть равным единице ( $y = 1$ ), т.е. в этом случае обмотка состоит из катушек, стороны которых лежат в соседних пазах. Такое решение позволяет также сократить до минимума вылет лобовых частей и упростить технологию изготовления и укладки катушек в открытые и полуоткрытые пазы сердечника, однако при малом числе полюсов влечёт за собой существенное ухудшение массогабаритных показателей из-за низкого обмоточного коэффициента.

С другой стороны, во многих случаях не всегда возможно выполнить достаточное число пазов под обмотку в магнитопроводе статора по технологическим причинам, что особенно касается герметичных и малогабаритных машин. Оправданным решением в этих условиях может стать отказ от преобразования энергии на первой гармонике магнитного поля в зазоре и использование одной из высших гармоник, в частности, третьей. При этом решении схема обмотки должна быть изменена с тем, чтобы обеспечить приемлемый обмоточный коэффициент для высшей гармоники. Это требование можно выполнить даже при использовании катушек с минимальным шагом по пазам, т.е. равным зубцовому делению ( $y = 1$ ). Оно приближает шаг по рабочей высшей гармонике к диаметральному шагу и позволяет сохранить упомянутые выше преимущества по компоновке лобовых частей и статора в целом. При ограниченном количестве пазов, их число на полюс и фазу  $q$  не может быть большим. Допустимо дробное его значение, в том числе меньше единицы ( $q < 1$ ), с числом зубцов магнитопровода якоря на 20-30% бóльшим или меньшим числа полюсов (рис. 2.7, *a* и *б*, соответственно). Применение дробных обмоток, как известно, позволяет повышать порядки зубцовых гармонических ЭДС и улучшать за счёт этого форму результирующей кривой потока в зазоре.



а), в) – схема обмотки и конструкция шестиполюсного индуктора;

б), г) - схема обмотки и конструкция двенадцатиполюсного индуктора;

**Рис. 2.7. Схемы обмотки якоря и конструкции ротора для работы на третьей гармонике поля якоря**

Машина с обмоткой рис. 2.7, а комплектуется шестиполюсным магнитоэлектрическим индуктором на роторе (рис. 2.7, в), обмотка рис. 2.7, б – двенадцатиполюсным индуктором (рис. 2.7, г). Обмотки имеют нечётный знаменатель дробности,  $q=2/3$  и  $q=1/3$ , и не содержат гармоник чётных порядков. Первая из них обеспечивает подавление полей первой и зубцовых гармоник, увеличивая долю третьей гармоники в общей МДС, а параметры второй (рис. 2.7, б) для этих гармоник идентичны (табл. 2.3, обмоточный коэффициент дробных обмоток определён путём построения многоугольников МДС - диаграмм Гёргеса [100]).

Общим недостатком обмоток с  $q < 1$  является присутствие гармоник дробных порядков, имеющих значительные амплитуды [101], которые могут создавать большие добавочные потери в полюсных наконечниках индуктора. Средством борьбы с ними являются выполнение полюсных наконечников шихтованными, что позволяет уменьшить потери от вихревых токов, или полный отказ от полюсных наконечников на роторе, что дополнительно позволит исключить и потери от дробных гармоник на гистерезис, хотя и может

при этом стимулировать локальное размагничивание магнитов в области их внешних углов.

Таблица 2.4

**Значения обмоточного коэффициента**

Наименование параметра	Значение в схемах:	
	рис. 2.7, а	рис. 2.7, б
Коэффициент укорочения:		
- по первой гармонике	0,383	0,7071
- по рабочей гармонике ( $\nu = 3$ )	0,924	0,7071
Обмоточный коэффициент:		
- по первой гармонике	0,1464	0,7071
- по рабочей гармонике	0,8535	0,7071

Анализируя конструкции переменного-полюсных магнитоэлектрических машин с возбуждением со стороны ротора, для работы на высших гармониках МДС можно рекомендовать следующие магнитные системы:

- индуктор с составным звездообразным магнитопроводом,
- индуктор с участками локального насыщения на границах полюсных делений [102].

Первый содержит радиально намагниченные магниты и легко может быть изготовлен с немагнитной гильзой вместо полюсных наконечников, как на рис. 2.7, в и г, а магнитопровод второго изготавливается из листов электротехнической стали. Относительно малая индуктивность фаз обмотки якоря в первой конструкции и наличие ферромагнитных путей рассеяния магнитного потока во второй конструкции ротора служат определённой защитой магнитов от полного или частичного размагничивания при воздействии полей якоря, обусловленных токами форсированных режимов и максимальных (ударных) токов короткого замыкания.

Катушки с шагом  $y = 1$  укладывают в открытые пазы статора. При таком решении наложение реактивной составляющей момента искажает форму угловой характеристики двигателя. Особенно сильно это искажение проявляется при наличии магнитомягких полюсных наконечников на роторе, где велика доля поперечного потока.

Для подавления гармоник высших порядков и реактивных моментов, обусловленных зубчатостью статора, воздушный зазор следует увеличивать по сравнению с прочими аналогами, а компенсацию падения магнитного напряжения, обусловленного этим увеличением, осуществлять применением высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе сплавов РЗМ, ферритов бария или стронция.

При использовании ферритов, коэрцитивная сила по индукции  $H_{CB}$  которых обычно находится в пределах 200-300 кА/м, в машинах с зубчатым статором следует выбирать зазор  $\delta$  не менее  $1/10 - 1/15$  зубцового деления статора  $t_z$ . Влияние повышенного магнитного сопротивления зазора при этом в значительной мере сглаживается магнитным сопротивлением собственно постоянных магнитов, весьма большим в упомянутых группах магнитотвёрдых материалов.

Эти магниты обладают прямолинейной характеристикой размагничивания в области второго квадранта. Максимум их удельной магнитной энергии приходится на середину прямой магнитного возврата, которая совпадает с характеристикой размагничивания, поэтому индукцию в зазоре  $B_\delta$ , Тл целесообразно предварительно выбрать, исходя из соотношения

$$B_\delta = K_{\text{пм}} \frac{B_r}{2}, \quad (2.10)$$

где  $B_r$  – паспортное значение остаточной индукции магнитотвёрдого материала, Тл;  $K_{\text{пм}}$  – коэффициент, определяемый отношением площади магнитов к площади полюсных наконечников ротора у зазора: для ротора (индуктора) с составным звездообразным магнитопроводом без полюсных наконечников  $K_{\text{пм}}=1$ . При наличии полюсных наконечников и для индуктора с участками локального насыщения на границах полюсных делений  $K_{\text{пм}}=0,85 \div 0,95$ .

При проектировании и генераторов с ёмкостной стабилизацией фазное напряжение  $U_{\text{ном}}$ , В и ЭДС  $E_0$ , В можно приравнять

$$E_0 = U_{\text{ном}}. \quad (2.11)$$

Учитывая это, диаметр ротора  $D$ , м и число витков в фазе окажутся связанными между собой зависимостью

$$D^2 = \frac{pU_{\text{ном}}}{1,11\pi K_{\text{пм}} \alpha_{\delta} \lambda \nu f K_{\text{обв}} w_1 B_r}, \quad (2.12)$$

где  $\nu$  – номер рабочей гармоники;

$p$  – число пар полюсов индуктора;

$f$  – частота сети, Гц;

$\alpha_{\delta}$  – расчётный коэффициент полюсного перекрытия;

$\lambda$  – отношение диаметра ротора к аксиальной длине зазора;

$K_{\text{обв}}$  – обмоточный коэффициент для рабочей гармоники;

$w_1$  – число витков фазы обмотки якоря.

Зависимость (2.12) следует из уравнения для ЭДС фазы обмотки  $E_0$ , В

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \nu f w_1 K_{\text{обв}} \Phi_m, \quad (2.13)$$

$\Phi_m$  – полный поток возбуждения, Вб (на один полюс магнитной системы ротора),

$$\Phi_m = K_{\text{пм}} \frac{B_r}{2} \frac{\pi D^2 \lambda \alpha_{\delta}}{2p} \quad (2.14)$$

Диаметр  $D$ , общий для двигателя и генератора, известен из (2.6).

Одним из ограничений является условие размещения магнитов внутри окружности ротора с диаметром  $D$ , обеспечивающих необходимую линейную нагрузку  $A$ , А/м. Во избежание размагничивания она должна несколько превышать таковую со стороны статора, при максимально возможном токе якоря в условиях воздействия эксплуатационных перегрузок по току

$$A = \frac{2pH_{\text{СВ}} l_{\text{М}} K_{\text{ЗМ}}}{\pi D} = \frac{2m w_1 I_{\text{max}}}{\pi(D + 2\delta)}, \quad (2.15)$$

где  $H_{\text{СВ}}$  – коэрцитивная сила магнитотвёрдого материала по индукции, А/м;



$l_m$  – общая длина магнитов с полюсными наконечниками (если они присутствуют) в направлении одной силовой линии поля возбуждения, м;

$p$  – число пар полюсов, образованных магнитами индуктора на роторе ( $p = \nu p_1$ );

$I_{\max}$  – амплитуда максимального тока фазы обмотки якоря при протекании форсированных токов (в двигателе) или тока ударного короткого замыкания (в генераторе), А;

$K_{зм}$  – коэффициент запаса МДС магнитов индуктора, принимаемый для обеспечения их устойчивости к размагничиванию меньшим единицы на 5-10%.

С другой стороны, линейную нагрузку целесообразно связать с требуемой мощностью (моментом), выделив её из известных соотношений для машинной постоянной (Арнольда) [103]

$$C_A = \frac{D^3 \Omega}{\lambda P} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta K_B K_{обв} A B_\delta}, \quad (2.16)$$

где  $\Omega$  – синхронная частота вращения рад/с;

$P$  – расчётная мощность, Вт;

$K_B$  – коэффициент формы поля,  $K_B = 1,11$ .

Из совместного решения (2.12), (2.15) и (2.16) определяются размеры и параметры  $D$ ,  $\lambda$ ,  $l_m$ ,  $w_1$ . С учётом этой процедуры можно предложить достаточно универсальный алгоритм проектирования магнитоэлектрических машин, область применения которого распространяется на любые магнитные системы ротора с прямолинейной характеристикой размагничивания магнитов.

Сначала выбираются схема обмотки якоря и конструктивная схема индуктора с постоянными магнитами на роторе, а также марка магнитов. Сделанный выбор определяет значения  $K_{обв}$ ,  $K_{пм}$ ,  $H_{CB}$ ,  $B_r$  (а значит и  $B_\delta$ ).

Расчётные мощность  $P$ , Вт или момент  $M = P/\Omega$  зависят от соответствующих номинальных величин, которые являются исходными данными технического задания. Максимальный фазный ток  $I_{\max}$  в цепи якоря опреде-

ляется параметрами используемого преобразователя или пускозащитной аппаратуры.

После совместного решения (2.12), (2.15) и (2.16) по линейной нагрузке и назначенной плотности тока вычисляются пазовая МДС  $F_{\text{паза}}$ , А необходимая для получения требуемых значений расчётной мощности или момента и площадь  $S_{\text{пр}}$ , мм<sup>2</sup> занятая проводами обмотки в пазу

$$F_{\text{паза}} = \frac{\pi D A K_{\text{н}}}{Z_1}, \quad (2.17)$$

$$S_{\text{пр}} = \frac{4 d_{\text{из}}^2 F_{\text{паза}}}{\pi d_{\text{г}}^2 K_3 j}, \quad (2.18)$$

где  $K_{\text{н}}$  – коэффициент насыщения, в силу присутствия в магнитной цепи линейных проводимостей высококоэрцитивных магнитов с проницаемостью близкой к магнитной проницаемости воздуха, этот коэффициент весьма близок к единице;

$Z_1$  – число пазов обмотки якоря, установленное на стадии выбора её схемы;

$d_{\text{из}}$  – диаметр изолированного обмоточного провода, мм;

$d_{\text{г}}$  – его диаметр без изоляции, мм

$K_3$  – коэффициент заполнения проводниками свободной от изоляции площади паза, принимаемый в соответствии с рекомендациями, принятыми для всыпных или катушечных обмоток электрических машин [103],

$j$  – плотность тока в обмотке, соответствующая номинальному току якоря, А/мм<sup>2</sup>

Далее, учитывая форму пазов статора и спецификацию изоляции в них, определяется радиальная длина обмотанной части зубцов статора  $h_{\text{обм}}$ , мм в виде корня квадратного уравнения [92]

$$h_{\text{обм}} = \frac{1}{a} \left( -\frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - ac} \right). \quad (2.19)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  представляют собой соответственно квадратичную, линейную и независимую функции площади проводов и изоляции в пазу от его высоты.

После решения (2.19) определяются высота пазов и зубцов, радиальный размер ярма и внешний диаметр. В силу небольшой по отношению к зазору относительной длины полюсного деления машина с ротором (рис. 2.7 б, г), спроектированная для работы на третьей гармонике, приближается по соотношению индуктивных параметров к неявнополюсной, она обеспечивает синусоидальную форму угловых характеристик и эффективное подавление высших гармоник в кривых ЭДС и выходного напряжения. Увеличенный зазор и отсутствие полюсных наконечников на роторе несколько снижают удельные показатели по максимальному моменту и мощности, однако чистота гармонического спектра потока в зазоре обуславливает достижение более важных эксплуатационных показателей, таких как предсказуемость динамических характеристик, отсутствие вибраций и плавность движения ротора в дискретном (шаговом) приводе.

Традиционные методы поверочного расчёта магнитной цепи не в полной мере подходят для машин с небольшим числом зубцовых делений статора, не кратным числу полюсов индуктора, поскольку предполагают выделение в модели одного полюсного деления статора и одного полюсного деления ротора. При различной их протяжённости использование однополюсной или двухполюсной модели неизбежно приведёт к игнорированию потока через границы расчётных областей, что может стать причиной существенных погрешностей.

При гармоническом законе изменения потокосцепления достаточно выполнить расчёт магнитной цепи только при одном положении ротора – положении максимального потокосцепления фазы обмотки якоря с полем возбуждения  $\Phi_{am}$ . В машине со схемой рис. 2.7, а и ротором рис. 2.7, в, таковым является положение, при котором ось паза, занятого катушками только одной фазы, например, паза 2 с катушечными сторонами фазы А, совпадает с гра-

ницей полюсного деления ротора. На сеточной модели (рис. 3.4) ротор находится в положении максимального потокосцепления с фазой  $A$ , паз 2 с катушечными сторонами которой изображён в самом верхнем положении (каждая катушка модели состоит из двух половин: верхней и нижней).

По найденной амплитуде потокосцепления или потока взаимной индукции  $\Phi_{am}$ , Вб определяются ЭДС фазы  $E_m$ , В, фазный ток  $I$ , А, ток во внешней цепи, моментные и энергетические характеристики [103]:

$$E_m = 2\pi\omega_k K_{об} \Phi_{am} \cdot l_\delta, \quad (2.20)$$

$$X_H = R_H \operatorname{tg}(\beta), \quad (2.21)$$

$$\beta = \arccos \frac{R + R_H}{\sqrt{(X_H + X_q)^2 + (R + R_H)^2}}, \quad (2.22)$$

$$R_1 = R + \frac{X_d + X_q}{2} \cos(2\beta), \quad (2.23)$$

$$X_1 = 0,5(X_d + X_q) + 0,5(X_d - X_q) \cos(2\beta), \quad (2.24)$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_H + R_1)^2 + (X_H + X_1)^2}}, \quad (2.25)$$

$$U = \frac{R_H I}{\cos(\varphi)}, \quad P = 3R_H I^2, \quad (2.26)$$

где  $R_H$  и  $X_H$  – активная и реактивная составляющие нагрузки, Ом;

$\cos(\varphi)$  – коэффициент мощности;

$X_d$  и  $X_q$  – индуктивное сопротивление якоря по продольной и поперечной осям соответственно, Ом;

$R_1$  и  $X_1$  – активная и индуктивная составляющие полного (главного) сопротивления якоря;

$\beta$  – угол (фазовый сдвиг) между током и ЭДС;

$I$  – действующее значение тока в фазе обмотки якоря, А;

$P$  – активная мощность, Вт.

Принцип преобразования энергии на высшей (третьей) гармонике поля якоря получил практическое применение в шаговом электроприводе верти-

кального перемещения регулирующего органа ядерного реактора. При обесточивании внешней цепи двигатель переходит в генераторный режим. Характеристикой режима является генераторная (рис. 1.14). Для стабилизации магнитного поля к обмотке подключается ёмкостная нагрузка. На низкочастотном участке характеристики ток и электромагнитный момент линейно возрастают с ростом частоты вращения под влиянием роста ЭДС, реактивный ток в цепи является индуктивным. На более высоких частотах сказывается влияние компенсации поля реакции якоря конденсаторами, и момент возрастает более интенсивно, вплоть до максимума, при котором наступает резонанс напряжений. Этот участок характеристики является рабочим. На нём электромагнитный момент уравнивает момент от веса регулирующего органа и последний опускается равномерно.

При дальнейшем разгоне ротора реактивный ток в цепи становится ёмкостным, характеристика переходит на ниспадающую ветвь вследствие роста ёмкостного сопротивления. Эта ветвь соответствует неустойчивой работе: в теоретически возможном случае преодоления максимума электромагнитного момента под действием какого-либо случайного импульса нагрузки происходит неуправляемый разгон ротора. Чтобы этого не произошло машина, как и любая другая в синхронном приводе, должна обладать достаточной кратностью максимального момента.

В итоге проведённых исследований можно дать рекомендацию о целесообразности использования высшей гармоники в генераторе для ограничения скорости опускания РО обесточенного привода. Преимущества состоят в следующем:

- 1) использование высшей (третьей, пятой или зубцовой) гармоники для преобразования энергии в магнитоэлектрических машинах с ограниченным числом пазов на статоре позволяет увеличить относительную радиальную длину воздушного зазора и приблизить за счёт этого форму поля в зазоре к синусоидальной;

2) снизить неблагоприятное действие реактивных моментов, обусловленных поперечной реакцией якоря;

3) переход к высшей рабочей гармонике можно рассматривать также как способ сокращения длины вылета лобовых частей путём размещения сосредоточенных катушек, стороны которых расположены в соседних пазах, без чрезмерного снижения обмоточного коэффициента.

Практическая возможность и целесообразность применения магнитоэлектрических машин с преобразованием энергии на третьей гармонике поля якоря получила экспериментальное подтверждение.

## **2.5 Модель движения привода в режиме опускания РО под действием собственного веса**

В последнем режиме скорость движения РО под действием собственного веса ограничивается переключением электромеханического преобразователя из двигательного режима в генераторный режим, или использованием отдельного устройства.

Допущения. Полагаем, что в этом режиме электромагнитные процессы в двигателе после его обесточивания завершаются до начала электромеханического процесса движения РО в сторону его опускания.

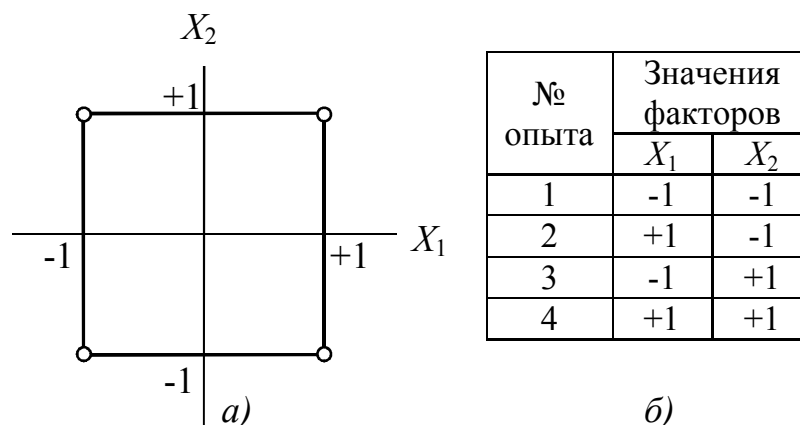
Полагаем также, что все возмущения на частоте опускания РО поглощаются приводом, и он движется без колебаний вокруг синхронной частоты, определяемой мгновенным значением частоты вращения генератора.

Тогда математическая модель электропривода в режиме опускания РО под действием собственного веса будет представлена единственным уравнением движения, записанным в виде баланса составляющих момента и угло-

вого ускорения  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + M(\dot{\theta}) + M_2 \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = 0. \quad (2.27)$$

Здесь  $J$  – момент инерции привода, приведённый к валу обесточенной машины,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $M_1$  – приведённый момент от веса РО, Нм;  $M_2$  – момент от действия сил трения в механизме, Нм.



**Рис. 2.8. Двухмерное факторное пространство (а) и таблица варьируемых факторов ПФЭ  $2^2$  (б)**

Характеристикой машины,  $M(\dot{\theta})$  работающей в режиме ограничения опускания РО, является генераторная. Она представляет собой зависимость электромагнитного момента от угловой скорости  $\dot{\theta}$  принудительного вращения ротора внешним механизмом через вал. Устройства, предназначенные для работы в генераторном режиме, представляют собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов. Для стабилизации поля возбуждения к обмотке якоря подключены конденсаторы [92]. Характеристика представляет собой кривую, нелинейно возрастающую до некоторого максимального значения, определяемого частотой резонанса напряжений в цепи якоря и ёмкостной нагрузки, после чего переходит на неустойчивый участок падения момента с ростом скорости опускания РО.

Эта характеристика требует серьёзного расчёта, так как помимо частоты вращения она является функцией температуры и ёмкости подключенных конденсаторов. Однако, если известны экспериментальные результаты, то за-

дача может быть упрощена путём обработки данных до получения универсальных зависимостей.

В качестве математического аппарата, посредством которого эти зависимости могут быть получены, удобно использовать математический аппарат теории планирования эксперимента [95]. Метод позволяет перейти от подробных, но громоздких для использования моделей, которые имеют простую аналитическую форму и потому удобны в использовании.

Простейший план эксперимента включает в себя все возможные сочетания минимального и максимального значений каждого фактора. Все они образуют  $n$  – мерное факторное пространство. При  $n = 2$  оно представляет собой квадрат с вершинами в точках  $-1-1$ ,  $-1+1$ ,  $+1-1$ ,  $+1+1$  (рис. 2.8, а).

Значение  $-1$  соответствует минимальному значению варьируемого фактора,  $X_1$  или  $X_2$ , а  $+1$  – максимальному значению варьируемого фактора.

Совокупность этих значений составляет факторное пространство. Для него заполняется таблица (рис. 2.8, б). План проведения экспериментов в соответствии с этой таблицей в теории планирования эксперимента обозначается как ПФЭ (полный факторный эксперимент) типа  $2^2$ .

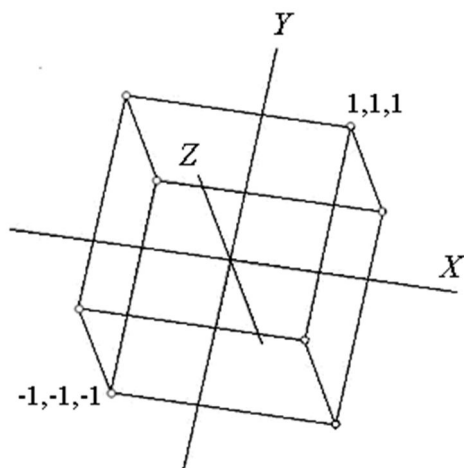
Трёхфакторное пространство,  $n = 3$ , представляет собой куб с координатами  $\pm 1$  в его вершинах (рис. 2.9).

Полный факторный эксперимент в трёхмерном факторном пространстве обозначается как ПФЭ  $2^3$ . Объём опытов для него представлен в таблице (рис. 2.9, б).

В общем случае виртуального  $n$ -мерного факторного пространства для полного факторного эксперимента требуется провести  $2^n$  опытов.

Рассмотрим задачу определения электромагнитного момента магнитоэлектрического генератора с ротором, который работает на ёмкостную нагрузку.





№ опыта	Значения факторов		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

**Рис. 2.9. Трёхмерное факторное пространство (а) и план эксперимента ПФЭ  $2^3$  (б)**

Учесть уменьшение генераторного момента под влиянием температуры можно посредством введения коэффициента теплового влияния:

$$K_{ТВ} = \frac{P_{гор}}{P_{хол}} = \frac{M_{э\_гор}}{M_{э\_хол}}, \quad (2.28)$$

где  $P_{гор}$ ,  $M_{э\_гор}$ ,  $P_{хол}$ ,  $M_{э\_хол}$  - мощность и электромагнитный момент, развиваемые в генераторном режиме горячим и холодным двигателем соответственно, при каждых конкретных значениях ёмкости нагрузочных конденсаторов и скорости вращения ротора.

Для того, чтобы по точкам  $K_{ТВ}$  найти всю функцию этого коэффициента, воспользуемся математическим аппаратом метода планирования эксперимента. Сначала зададимся пределами изменения переменных (факторов). Выбранные пределы приведены в табл. 1. Коэффициенты полинома  $a_1 \dots a_6$  вычисляются через кодированные значения факторов

$$a_i = \frac{\sum_{n=1}^N \tilde{x}_{in} K_{ТВ(n)}}{N}, \quad i = 0, 1, \dots, 6, \quad (2.29)$$

где  $\tilde{x}$  – кодированные значения температуры, ёмкости или скорости вращения ротора двигателя ( $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  или  $\tilde{\Omega}$ ),  $N$  – число элементов матрицы полного факторного эксперимента. При трёхфакторном ортогональном плане первого

порядка  $N = 2^3 = 8$ ;  $K_{ТВ(n)}$  – значение коэффициента уменьшения генераторного момента в  $n$ -м опыте ( $n=1, 2, 3, \dots, N$ ).

Кодированные значения факторов  $\tilde{X}_i$  связаны с их истинными значениями  $X$  следующим образом:

$$\tilde{x} = \frac{2X - X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2.30)$$

где  $X$  – символьное обозначение воздействующего фактора,  $T$ ,  $C$  или  $\Omega$ ;  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значение фактора по табл. 2.5.

Таблица 2.5

### Пределы изменения факторов коэффициента теплового влияния $K_{ТВ}$

Наименование параметра	Обозначение [ед.изм.]	Минимум	Максимум
Температура обмотки генератора	$T$ [°C]	20	150
Ёмкость нагрузочных конденсаторов	$C$ [мкФ]	10	70
Частота вращения ротора двигателя	$\Omega$ [об/мин]	100	800

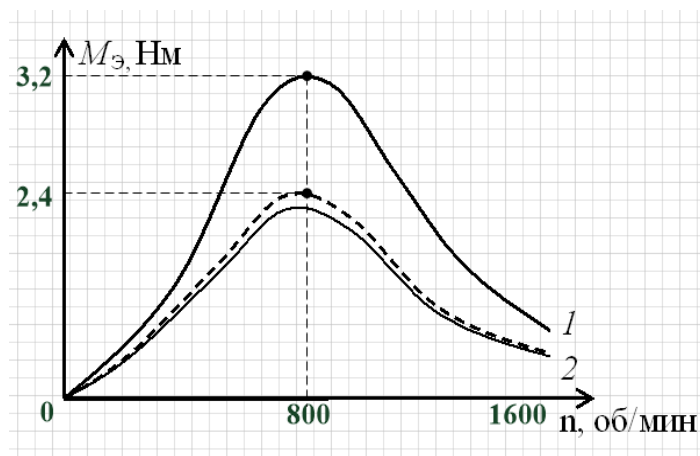
Экспериментальные значения коэффициента температурного влияния  $K_{ТВ}$  взяты из результатов испытаний двигателя в холодном и горячем состоянии, температура корпуса которого в процессе проведения испытаний достигала 150°C. Испытания проводились в соответствии с планом трёхмерного факторного эксперимента ПФЭ  $2^3$ , рис. 2.9.

Полином функции коэффициента теплового влияния, найденный с использованием полученных экспериментальных результатов, в кодированных значениях факторов  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{\Omega}$ , имеет вид

$$K_{ТВ} = 0,861 - 0,139\tilde{T} - 0,049\tilde{C} - 0,043\tilde{\Omega} - 0,049\tilde{T}\tilde{C} - 0,043\tilde{T}\tilde{\Omega} + 0,022\tilde{C}\tilde{\Omega}. \quad (2.31)$$

Переход к истинным значениям факторов  $T$ ,  $C$ ,  $\Omega$  от кодированных  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{C}$  и  $\tilde{\Omega}$ , даёт следующий состав коэффициентов полинома:

$$K_{ТВ} = 1,0454 - 0,0005T - 0,00023C - 0,000006\Omega - 0,000036TC - 0,000002T\Omega + 0,000002C\Omega. \quad (2.32)$$



**Рис. 2.10. Экспериментальные (сплошные) и расчётная (пунктирная) характеристики магнитоэлектрического генератора в горячем и холодном состоянии**

Эту функцию можно проверить, сравнив полученные с её помощью результаты из характеристик холодного двигателя (рис. 2.10, кривая 1) с характеристиками, снятыми непосредственно на горячем двигателе (рис. 2.10, кривые 2, сплошная и пунктирная). Можно отметить хорошую сходимость расчётных и экспериментальных результатов, достигнутую в приводе с описанными характеристиками.

## 2.6 Краткие результаты к главе 2

В итоге расчётной, конструкторской и экспериментальной проработки получены следующие результаты по компоновке и составу электромеханических преобразователей для усовершенствованного привода ИМ СУЗ

- на уровне изобретения обоснована новая концепция разделения функций двигателя и генератора в приводе СУЗ по отдельным электромеханическим устройствам;

- для каждого из этих устройств, двигателя и генератора, рекомендован тип машины, методика проектирования и расчёта характеристик;

- выполнены расчётно-аналитические исследования процесса движения привода в режиме управляемого самохода после срабатывания АЗ, с последующим остановом РО переводом обесточенного двигателя в статический режим работы;

- с помощью математического аппарата теории планирования эксперимента подобраны зависимости, отражающие влияние теплового состояния постоянных магнитов на тормозной электромагнитный момент генератора.

### 3 РАСЧЁТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Объект и методы исследований

Разработанные в предыдущей главе методики позволили спроектировать электромеханический преобразователь, предназначенный для привода ИМ СУЗ, который состоит из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора (рис. 3.1).

Требуемые технические характеристики электромеханического преобразователя, назначенные при проведении расчётов приведены в табл. 3.1.

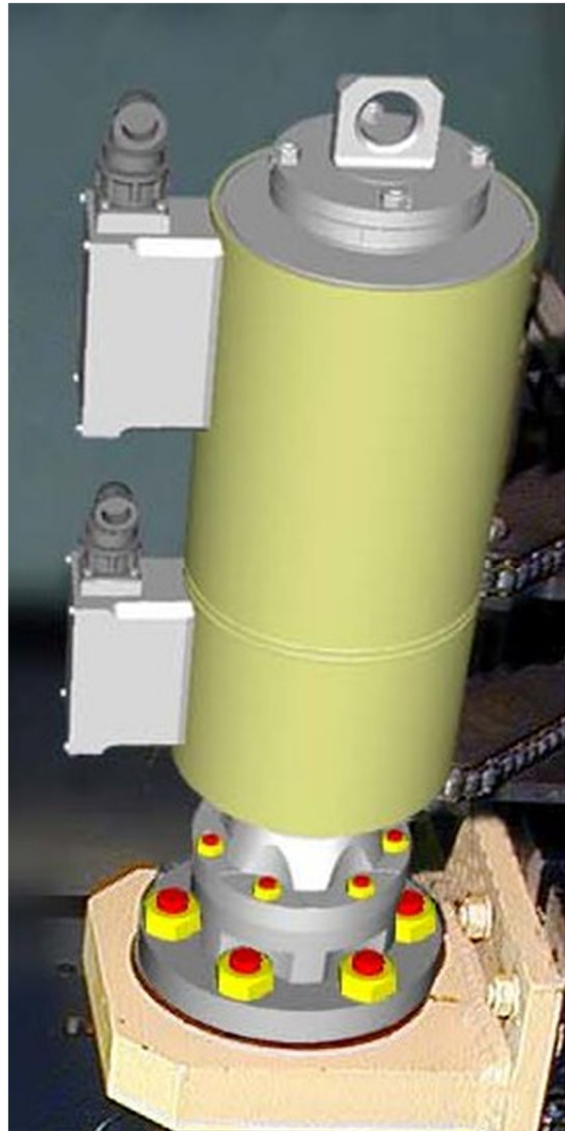
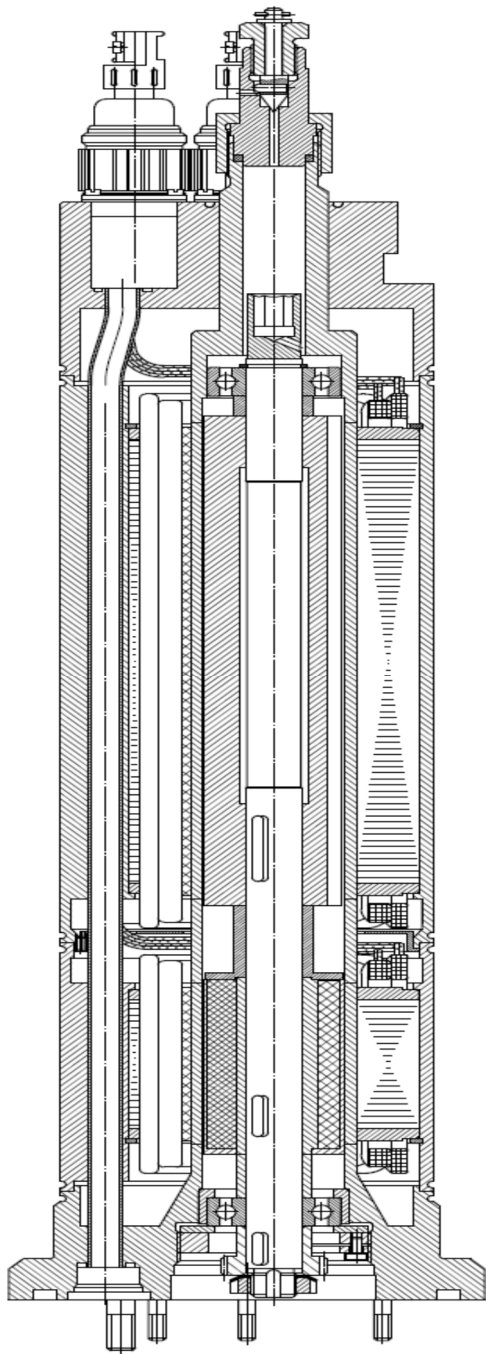
Таблица 3.1

Требуемые технические характеристики

Наименование параметра	Значение
Потребный момент на валу двигателя, необходимый для подъёма стержня с РО, Н·м (кгс·см), не менее	20,6 (210)
Потребный момент, необходимый для удержания стержня с РО, Н·м (кгс·см), не менее	0,69 (7,0)
Частота вращения ротора в двигательном режиме наибольшая, с <sup>-1</sup> (об/мин)	15,7 (150)
Продолжительность работы в двигательном режиме, с	72, не более
Продолжительность работы в двигательном режиме по отношению к общей продолжительности работы привода	1%, не более
Момент инерции привода, приведённый к валу двигателя (редуктор + РО + рейка), кг·м <sup>2</sup>	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Температура окружающей среды, °С	150

Результаты проектировочного расчёта двигателя, предназначенного для привода ИМ СУЗ, по методике табл. 2.2 представлены в Приложении 1 (табл. П.1).

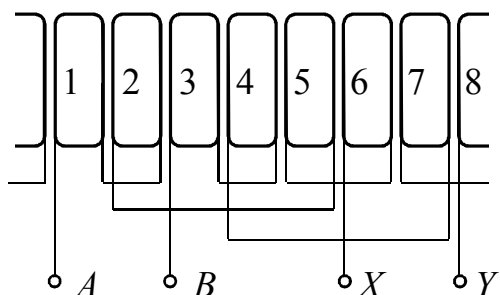
Генератор представляет собой синхронную машину с двухфазной обмоткой якоря (рис. 3.2) и постоянными магнитами на роторе (рис. 3.3). Магниты ротора намагничены в радиальном направлении и образуют по окружности 6 полюсов чередующейся полярности. Поле ротора взаимодействует с полем третьей гармоники поля статора, которое создаётся обмоткой якоря.



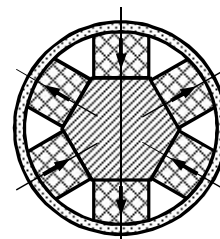
**Рис. 3.1. Вид электромеханического преобразователя: конструкция в разрезе и внешний вид**

Обмотка обеспечивает подавление первой гармоники, обмоточный коэффициент по первой гармонике составляет 0,1464, и поддержание на приемлемом уровне третьей гармоники. Обмоточный коэффициент по третьей (рабочей) гармонике составляет 0,8535. Кроме того, подавление высших гармоник потока магнитов ротора и приближение его формы в зазоре к синусоидальной обеспечивается увеличением расстояния между расточкой статора и

внешними поверхностями магнитов за счёт применения рубашки из немагнитного материала (титана или нержавеющей стали 0X18) толщиной 1,5 мм, без магнитомягких вставок.



**Рис. 3.2. Схема обмотки якоря генератора**



**Рис. 3.3. Сечение ротора генератора**

Для стабилизации магнитного поля к обмотке может быть подключена емкостная нагрузка. Геометрические размеры и параметры ротора и обмотки статора представлены в табл. 3.1.

*Таблица 3.1*

**Геометрические размеры и параметры ротора и обмотки статора**

Наименование параметра	Значение
1 Число полюсов, образованных магнитами ротора	6
2 Размеры магнита, мм: - ширина - радиальный размер, в направлении намагничивания - аксиальная длина	14,0 10,5 83
3 Наружный диаметр ротора, мм	49,5
4 Диаметр ротора по наружным поверхностям магнитов, мм	46,5
5 Материал рубашки на роторе	Сталь 0X18
6 Материал магнитов	Феррит 22БА220
7 Аксиальная длина ротора (расчётная), мм	83,0
8 Аксиальная длина магнитопровода статора с учётом толщины нажимных листов, мм	75,0
9 Толщина одного нажимного листа, мм	6,0
10 Диаметр обмоточного провода без изоляции, мм	0,4

Таблица 3.1 (продолжение)

Наименование параметра	Значение
11 Диаметр обмоточного провода в изоляции (ПНЭТ-имид), мм	0,439
12 Площадь сечения одной катушки (по чертежу), мм <sup>2</sup>	68
13 Коэффициент заполнения	0,715
14 Число витков одной катушки	252
15 Число катушек на полюсе (зубце)	2
16 Соединение катушек на полюсе	Последов.
17 Средняя длина витка, м	0,23
18 Омическое сопротивление одной катушки при 20°С, Ом	7,95
19 Омическое сопротивление фазы при последовательном соединении катушек при 20°С, Ом	31,8
<p>П р и м е ч а н и е – значения фактических измерений омического сопротивления катушки №6 при 20°С составило 7,441- 7,520 Ом; катушки №7 - 7,038-7,085 Ом</p>	

### 3.2 Поверочный расчёт и математическое моделирование двигателя

#### 3.2.1. Объём расчётных исследований

Поверочный расчёт двигателя включает в себя:

- расчёт электромагнитного момента при неподвижном роторе в функции углового положения ротора (расчёт статических характеристик);

- расчётные исследования работы двигателя в составе электропривода, которые включают в себя расчёт процесса пуска. Процесс воспроизводится при работе привода под нагрузкой, с моментом инерции, равным суммарному моменту инерции ротора и вращающихся масс привода.

Расчёты выполнены на сеточной модели двигателя.

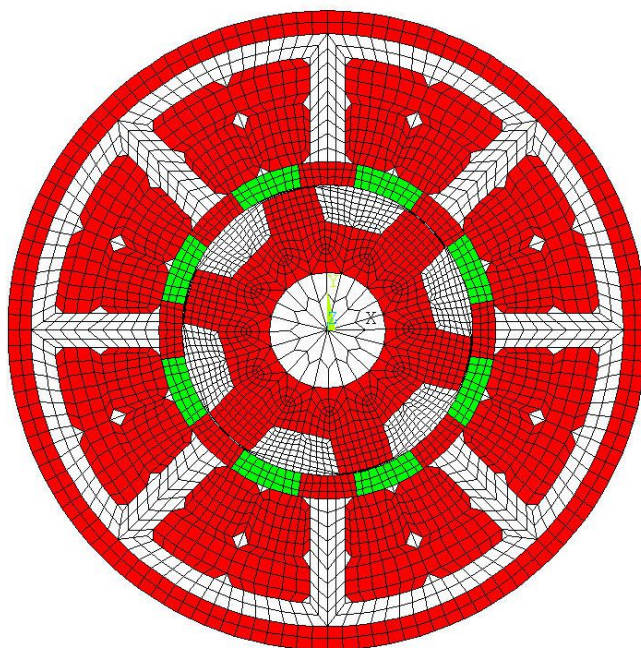
#### 3.2.2. Описание сеточной модели

Сеточная модель двигателя, составленная на основе исходного чертежа рис. 3.1, в поперечном сечении показана на рис. 3.4.



Модель представлена  $\approx 2,9$  тысячами элементов, что позволяет обеспечить приемлемую производительность выполнения циклически повторяющихся вычислений на современном ПК средней мощности.

Сетка в областях статора состоит из восьмиузловых элементов. Сетка в областях ротора и воздушного зазора при расчёте динамики электропривода состоит из четырёхузловых элементов.



**Рис. 3.4. Сеточная модель двигателя**

Для формирования уравнений связи на поверхности контакта подвижных и неподвижных областей модели сформирован компонент из элементов, примыкающих к поверхности расточки статора, и компонент из узлов на границе воздушного зазора, примыкающей к статору.

### 3.2.3. Алгоритм интегрирования уравнения движения

Влиянием массивных проводящих объектов, внедрённых в магнитную цепь статора и ротора двигателя, пренебрегаем.

С учётом принятого допущения число уравнений, описывающих работу исследуемого электропривода, снижается до единственного – уравнения движения

$$J\ddot{\theta} = M_{\text{дв}} - \text{sign}|M_{\text{тр}}| \pm M_{\text{ро}}, \quad (3.1)$$

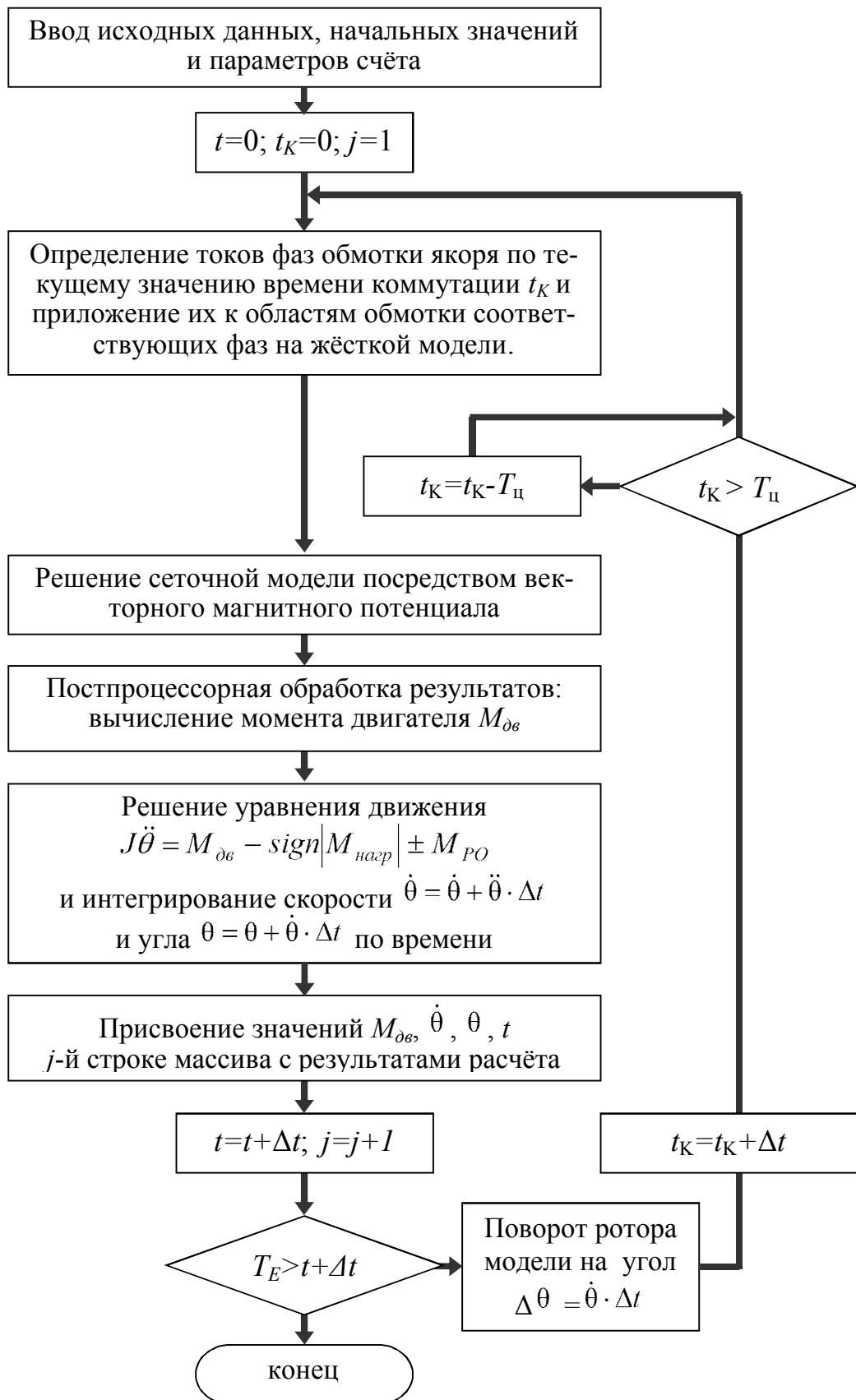
где  $J$  – момент инерции ротора двигателя и приведённый к его оси момент инерции движущихся частей исполнительного механизма;  $M_{об}$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_{тр}$  – момент сил трения в механизме;  $M_{РО}$  – момент от веса регулирующего органа (в ИМ с несамотормозящимся редуктором типа «винт-гайка» или «рейка-шестерня»). В ИМ СУЗ БН-800 применён червячный редуктор, поэтому  $M_{РО} \approx 0$ ;  $\ddot{\theta}$  – угловое ускорение.

Схема алгоритма, обеспечивающего интегрирование уравнения движения электропривода на базе синхронной машины с импульсным управлением, показана на рис. 3.5. Его особенностью является большая универсальность, поскольку все параметры конкретной машины, в том числе наличие или отсутствие постоянных магнитов, дополнительных конструктивных элементов, внедрённых в магнитную цепь статора или ротора, учитываются её сеточной моделью. Модель способна работать с импульсами тока любой фиксированной формы. При этом предполагается, что преобразователь сохраняет свойства источника тока на всём диапазоне частот следования импульсов, при котором эксплуатируется привод. Предполагается также отсутствие влияния короткозамкнутых и массивных проводящих частей, о котором было упомянуто выше.

Последнее предположение не является обязательным, но позволяет значительно повысить производительность модели за счёт увеличения шага интегрирования по времени.

Кроме сеточной и жёсткой (solid) моделей электродвигателя, исходными данными для моделирования движения привода являются:

- параметры привода, входящие в уравнение движения  $J$ ,  $M_{тр}$  и  $M_{РО}$ ;
- параметры импульса питания двигателя: значения тока в характерных точках на периоде изменения в интервале от 0 до  $2\pi$ , и цикл коммутации фазы  $T_{ц}$  обмотки двигателя, определяющий синхронную частоту вращения;
- начальные условия: начальные значения угла  $\theta$  и угловой скорости  $\dot{\theta}$ ;
- параметры счёта: шаг счёта по времени (шаг интегрирования)  $\Delta t$  и время окончания счёта  $T_E$ .



**Рис. 3.5. Алгоритм интегрирования уравнения движения шагового электропривода на базе индукторной машины**

Переменная цикла  $j$  обеспечивает формирование строк выходного массива с записью значений момента двигателя, скорости вращения ротора и угла, соответствующих текущему времени  $t$ .

Токовые нагрузки фаз определяются в начале каждого цикла путём интерполяции между характерными точками импульса тока по угловому аргументу

$$\varphi_1 = \frac{2\pi \cdot t_k}{T_{ц}}, \quad (3.2)$$

для первой фазы и

$$\varphi_n = 2\pi \left( \frac{t_k}{T_{ц}} + \frac{n-1}{m} \right) \quad (3.3)$$

для остальных фаз  $m$  – фазного двигателя ( $2 \leq n \leq m$ ), причём при  $\varphi_n > 2\pi$  выполняется корректировка  $\varphi_n = \varphi_n - 2\pi$ . Здесь  $t_k$  – циклически изменяющееся время ( $0 \leq t_k < T_{ц}$ ), по значениям которого определяется путём интерполяции текущее значение тока фаз двигателя.

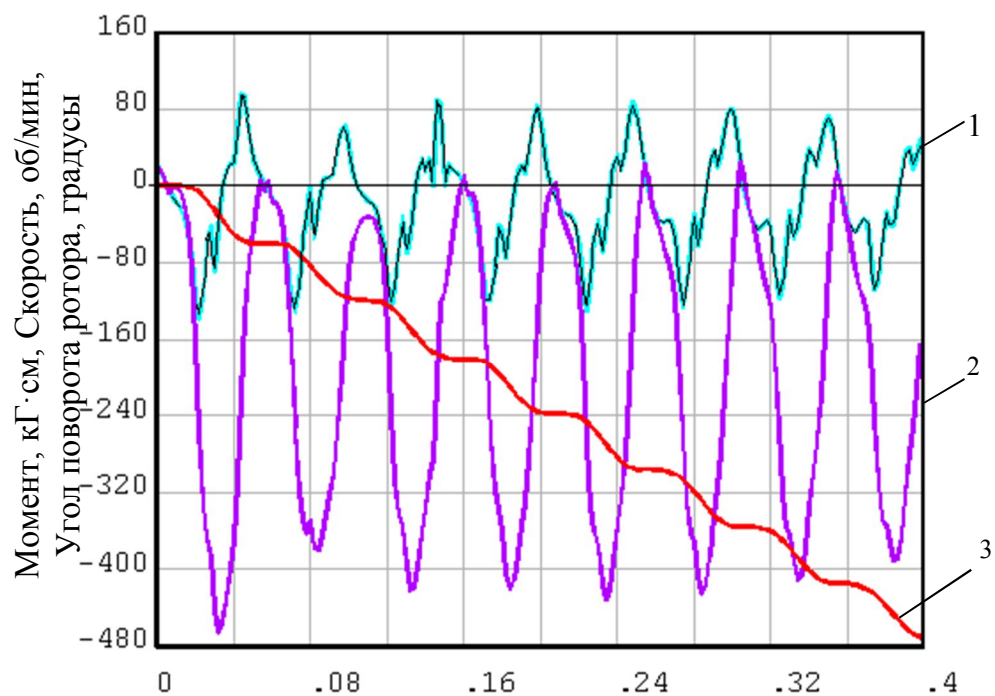
Для проведения поверочного и исследовательского расчётов на встроенном языке программирования пакета ANSYS были разработаны и отлажены APDL-программы, текст которых представлен в Приложении 2.1.

#### 3.2.4. Результаты расчётов

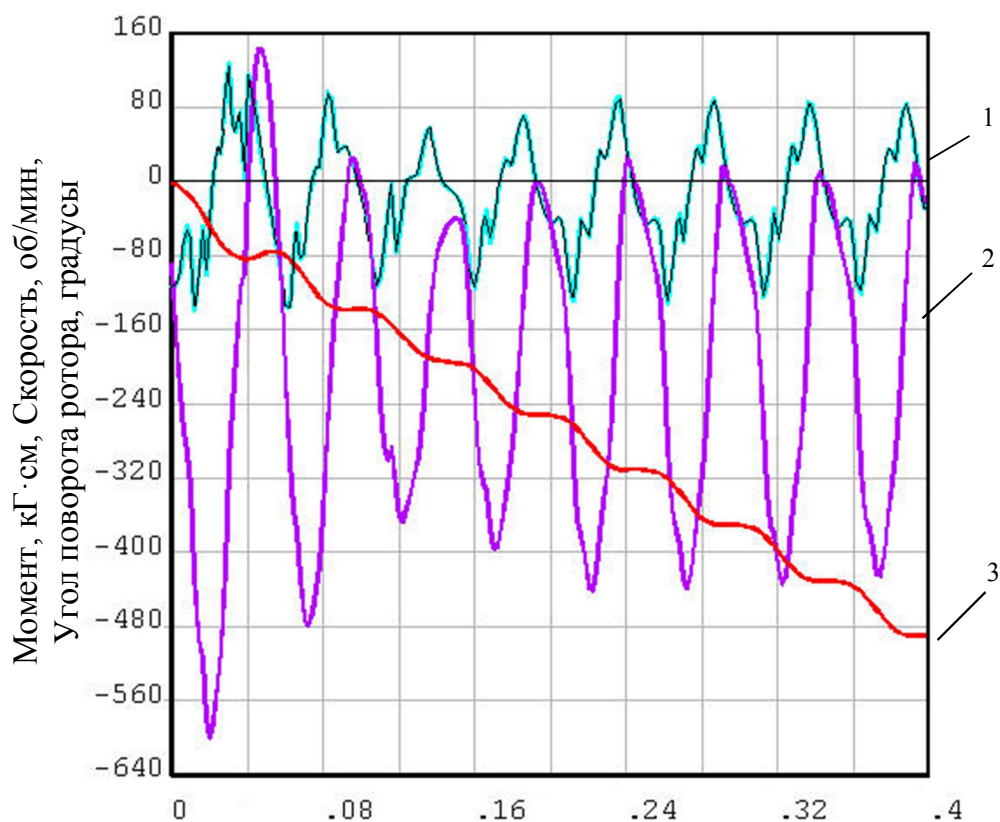
Сначала на этой модели были подтверждены результаты проектировочного расчёта по развиваемому электромагнитному моменту.

Затем выполнены расчётные исследования процесса пуска двигателя из неподвижного состояния на синхронную частоту вращения 195 об/мин в приводе испытательного стенда, который создаёт нагрузку типа «сухое трение».

Значения параметров двигателя и привода, принятые при расчёте осциллограмм пуска, приведены в табл. 3.2.



Пуск из положения устойчивого равновесия



Пуск из положения неустойчивого равновесия

Рис. 3.6. Осциллограммы момента, скорости и угла при пуске

Таблица 3.2

**Значения параметров двигателя и привода, принятые в расчёте**

Наименование параметра	Значение
Момент инерции ротора и вращающихся масс привода, кг·м <sup>2</sup>	0,00241
Тип нагрузки	«Сухое трение»
Форма импульсов тока	Треугольная
Амплитуда импульсов тока, А	9,5
Время окончания расчётного интервала, с	0,4
Число импульсов (тактов коммутации) в расчётном интервале	32
Шаг ротора двигателя	15°
Угол, который должен отработать двигатель в конце расчётного интервала:	
- из положения устойчивого равновесия, не менее	465°
- не более	495°
- из положения неустойчивого равновесия, не менее	450°

Расчётные осциллограммы момента (кривая 1, в кг·см), угловой скорости (кривая 2, в об/мин) и угла поворота ротора (кривая 3, в угловых градусах) показаны на рис. 3.6. Знак «←→» на них указывает на то, что ротор вращается в обратном направлении по отношению к направлению вращения ротора.

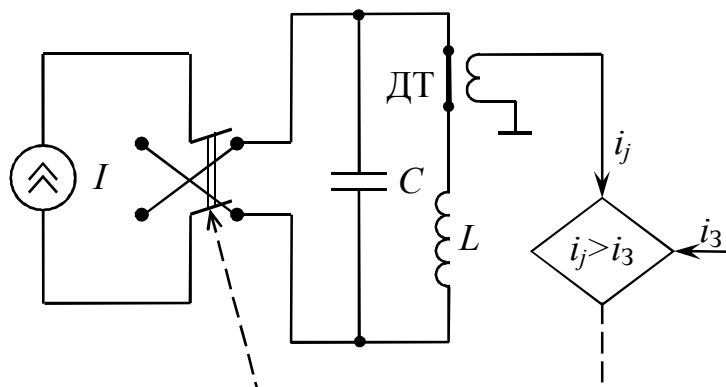
Из рисунка следует, что по окончании расчётного интервала ротор отработывает угол 471,4°, который оказывается в приведённых в таблице 2.3. пределах. Отсюда можно сделать вывод, что его движение осуществляется без пропуска шагов, и двигатель обеспечивает работоспособность привода.

### **3.3 Характеристики системы управления электромеханическим преобразователем в приводе с источником тока**

Современные средства преобразовательной техники с инверторами тока позволяют активно влиять на форму тока в фазах с тем, чтобы электромеха-

нический преобразователь приобрел определённые, заранее заданные положительные качества.

Входной цепью инвертора тока является источник тока. Функция его ключей сводится к периодическому изменению направления тока источника в выходной цепи. Нагрузкой инвертора тока является цепь, шунтированная конденсатором. При этом выходная цепь инвертора тока обладает свойствами источника напряжения [16-18].



**Рис. 3.7. Схема формирования тока в фазах шагового двигателя**

Для формирования тока каждая фаза обмотки подключается к источнику посредством ключа (рис. 3.7). Этот ключ замыкается и размыкается по сигналам логического устройства, по результатам сравнения мгновенного значения тока фазы  $i_j$ , измеренного датчиком тока ДТ, с заданным его значением  $i_3$ . Периодическая функция заданных значений  $i_3$  передаётся из внешнего устройства памяти.

Опрос и сравнение значений тока  $i_j$ ,  $i_3$  осуществляется с тактовой частотой широтно-импульсного модулятора (ШИМ), которая составляет несколько кГц. На каждом такте при  $i_j > i_3$  ключ размыкается, и ток фазы  $i_j$  спадает через разрядные цепи (на рис. 3.7 не показаны). При  $i_j < i_3$  фаза вновь подключается к источнику  $I$ , обеспечивая ускоренное нарастание тока благодаря тому, что уровень напряжения источника значительно превышает величину, необходимую для обеспечения номинального фазного тока двигателя  $I_{ном}$ .

В блоке управления инвертором чаще всего применяют гистерезисное управление. В соответствии с ним сигнал рассогласования между базовым

сигналом  $i_3$  и сигналом обратной связи по току, снимаемый с датчика тока ДТ,  $i_{\text{ДТ}}$

$$\Delta i = i_3 - i_{\text{ДТ}} \quad (3.4)$$

сравнивается с допустимой полосой его отклонения (полосой гистерезиса). Исходя из результатов сравнения, вырабатывается сигнал на переключение соответствующих транзисторов инвертора, в зависимости от того, находится или нет вычисленное отклонение в пределах отрицательного и положительного максимально допустимых его значений

$$-\Delta i_{\text{max}} \leq \Delta i \leq \Delta i_{\text{max}} . \quad (3.5)$$

Функции модуля сравнения здесь выполняет компаратор. Заданное и пилообразное напряжения, создающие токи  $i_3$  и  $i_{\text{ДТ}}$  поступают на прямой и инверсный входы, соответственно, в результате чего на выходе компаратора формируется сигнал ШИМ, управляющий ключами инвертора.

Полная схема преобразователя частоты с источниками тока в фазах инвертора (рис. 3.8) содержит генератор импульсов ГИ, распределитель импульсов РИ, три или несколько, по числу фаз, идентичных канала регулирования тока в фазах ШД и источник питания постоянного тока ИП.

Из распределителя импульсов сигналы управления поступают в каналы регулирования токов РТ в фазах ШД. Эти каналы осуществляют стабилизацию токов. В состав каждого из каналов регулирования тока входит ПИД регулятор, широтно-импульсный модулятор, усилитель сигнала обратной связи, и силовой каскад. Широтно-импульсный модулятор состоит из генератора сигнала пилообразной формы, работающего на частоте модуляции, и устройства сравнения сигналов. Широтно-импульсный модулятор преобразует непрерывный аналоговый сигнал, полученный на выходе регулятора, в импульсный сигнал с переменной скважностью. Этот сигнал управляет коммутацией ключей силового каскада  $VT1-VT4$ . Режим источника тока на входе инвертора каждого канала создан включением источника дросселя  $L_{\text{д}}$



с индуктивностью, достаточной для подавления пульсаций входного тока.

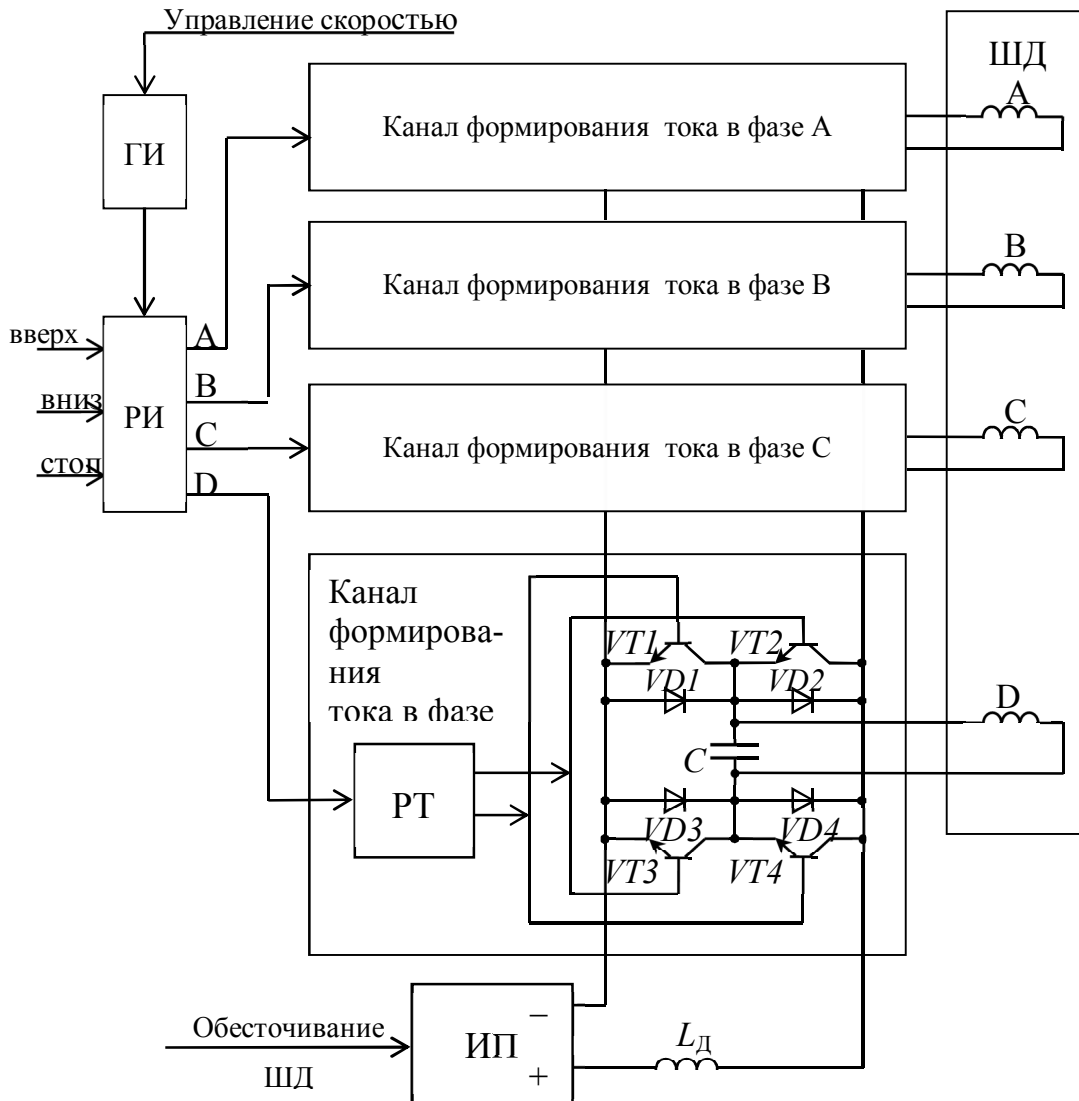


Рис. 3.8. Структурная схема преобразователя с инвертором тока

В качестве силовых ключей  $VT1-VT4$  в мостовой схеме применяются металлооксидные кремниевые транзисторы с полевым эффектом (MOSFET) или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). MOSFET транзисторы имеют высокое быстродействие, достаточно большие уровни коммутируемых токов и рассеиваемой мощности и малое остаточное напряжение на открытом ключе, но диапазон их напряжений ограничен величиной (100–200) В. IGBT транзисторы доступны на номинальные напряжения до 6500 В и токи до 4500 А. Их быстродействие ниже, чем у MOSFET [19]. Для исследований работы электромеханического преобразователя с

питанием от источника напряжения целесообразно использовать электрическую схему замещения (рис.3.9).

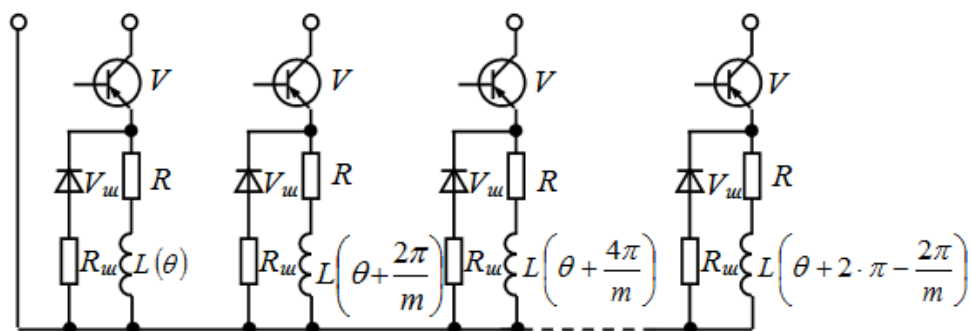


Рис. 3.9. Электрическая схема замещения индукторного двигателя

### 3.4 Исследование влияния формы импульсов на работу шагового привода с индукторным двигателем

Рассмотренный преобразователь (рис.3.8) позволяют влиять на форму тока в фазах с тем, чтобы машина приобрела определённые, заранее заданные положительные качества. В шаговом приводе и шаговых двигателях переходные процессы отключения фаз обмотки происходят непрерывно. При этом важно обеспечить плавное движение ротора не только в области высоких частот вращения, где вынужденные колебания ротора поглощаются приводом, но и в области низких частот. На частотах, от нескольких единиц до нескольких десятков об/мин, неравномерность момента приводят к резким колебаниям скорости, вплоть до полной остановки ротора и движения его в обратном направлении.

Сгладить этот процесс можно подбором формы импульсов тока, подаваемых в фазы обмотки якоря шагового двигателя. Электромеханический переходный процесс, при котором ток машины изменяют по определённому, заранее подобранному в соответствии с тем или иным критерием, закону можно назвать электрически управляемым или частично управляемым [92].

Целью исследований являются:

1) разработка алгоритма для расчётов в подтверждение работоспособности спроектированного двигателя в составе электротехнического комплекса, состоящего из преобразователя тока, двигателя и преобразователя движения;

2) исследование работы электропривода на базе спроектированного двигателя в различных установившихся и переходных режимах: пуск, реверс, торможение, скачки нагрузки и др., в виде расчётных осциллограмм изменения во времени электрических и механических переменных, для их анализа и обобщения;

3) определение предельных значений мгновенных величин в уточнение исходных требований к компонентному составу электропривода: преобразователю частоты и нагрузочным устройствам;

4) определение (подбор) формы напряжения или тока в фазах двигателя по условиям минимизации пульсаций момента, мощности потребления, времени разгона на заданную частоту, обеспечения заданной частоты приемистости, и др. критериям.

В этом переходном процессе положение ротора, определяемое уравнением движения, выносится за рамки управляемого процесса. Оно является неуправляемым результатом действия всех токов машины: управляемых и неуправляемых, а также механических нагрузок электропривода.

В условиях подавления влияния индуктивных связей система уравнений электромеханического преобразования энергии распадается на электрическую задачу формирования тока в фазах двигателя, и на электромеханическую задачу. Последняя задача описывает перемещение ротора под действием электромагнитного момента двигателя посредством единственного уравнения движения вида

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + \frac{d\theta}{dt} \alpha + M_2 \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{Z}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}, \quad (3.6)$$

где  $J$  – приведённый момент инерции;  $M_1$  и  $M_2$  – составляющие нагрузки: потенциальная и типа «сухое трение» соответственно;  $\alpha$  – коэффициент составляющей нагрузки типа «вязкое трение»,  $Z$  – число зубцов на роторе двигателя.

Токи фаз в этом уравнении являются заданными величинами. Предполагается, что другие токи, в частности, наведённые в проводящих частях машины, отсутствуют или практически не оказывают влияния на её момент. Они учитываются при определении потерь.

Подход к определению формы импульсов тока

Если задаться условием равномерности движения ротора

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{const}, \quad (3.7)$$

то уравнение движения представляет собой баланс электромагнитного момента двигателя и связанной с ним механической нагрузки  $M_{\text{нагр}}$ ,

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N i_j \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_k + M_{\text{нагр}} = 0. \quad (3.8)$$

Для минимизации электрических потерь при определении токов воспользуемся условием их пропорциональности - производным изменения индуктивности соответствующих фаз обмотки якоря по углу [92]:

$$i_1 : i_2 : i_3 : \dots : i_{m-1} : i_m = \frac{dL_{11}}{d\theta} : \frac{dL_{22}}{d\theta} : \frac{dL_{33}}{d\theta} : \dots : \frac{dL_{m-1,m-1}}{d\theta} : \frac{dL_{mm}}{d\theta}, \quad (3.9)$$

где основной составляющей собственных индуктивностей  $L_{11}, L_{22}, L_{33}, \dots, L_{mm}$  является доля, обусловленная потокоцеплением фаз с полем возбуждения.

При формировании алгоритма определения токов с учётом условия (3.9), фазы с отрицательной производной индуктивности по углу отключаем, т.е. приравниваем их токи нулю. С учётом этого действия и (3.9) можно установить форму кривой тока в одной фазе, например в первой ( $j = 1$ ). На одном полупериоде ток определяется в соответствии с одной из пропорций условия (3.9), а на другом принимает нулевое значение.

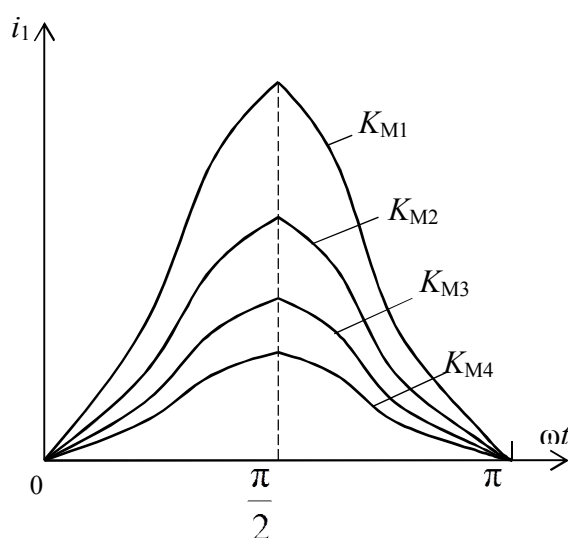
Токи остальных повторяют найденную кривую с учётом пространственного смещения фазных зон:

$$\Delta\varphi_j = \frac{2\pi}{m}(j-1). \quad (3.10)$$

В частотном приводе на базе синхронной машины задача решается при различных значениях кратности максимального момента  $K_M$ :

$$K_M = \frac{M_{\text{Эmax}}}{M_{\text{Эном}}} \quad (3.11)$$

( $1 < K_M < 2 \div 5$ ), где  $M_{\text{Эmax}}$  – максимальный электромагнитный момент двигателя, который он способен обеспечить при данном токе в положении наибольшей производной изменения индуктивности (3.9) или по углу.  $M_{\text{Эном}}$  – номинальный момент двигателя.



**Рис. 3.10. Форма тока, определённая исходя из (3.9) при  $K_{M1} > K_{M2} > K_{M3} > K_{M4}$**

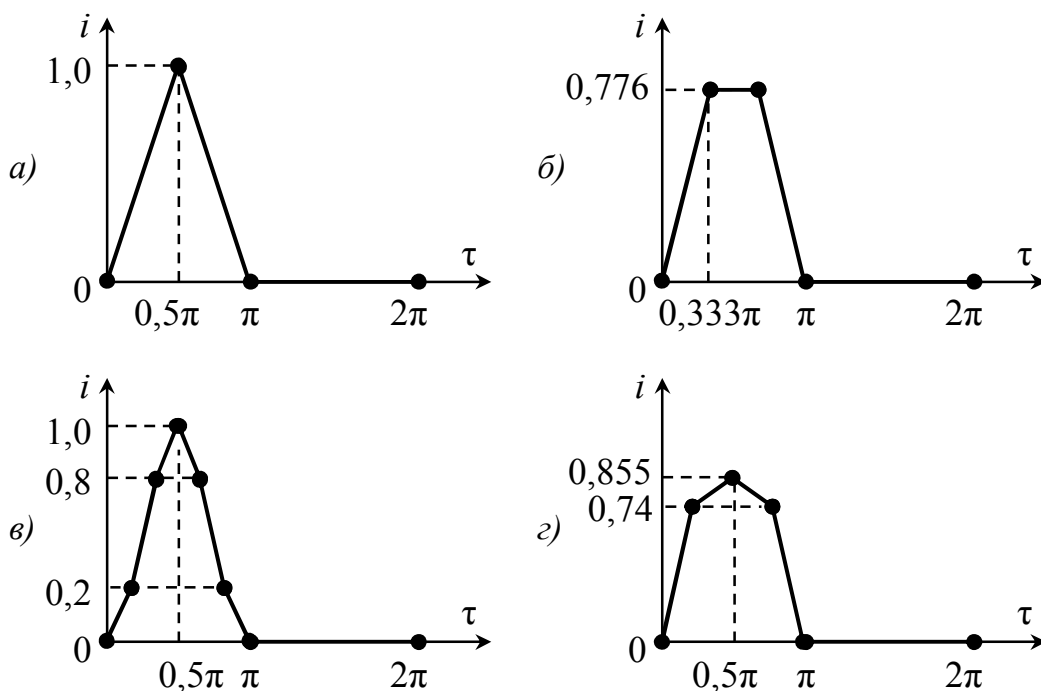
Меньшим значениям кратности соответствует больший запас статической устойчивости. Повышение кратности максимального момента здесь, как и в любом синхронном приводе, достигается за счёт снижения КПД, вследствие увеличения электрических и магнитных потерь с ростом тока (рис. 3.10).

Алгоритм воспроизведения движения шагового привода с источником тока содержит в блоке интегрирования единственное уравнение – уравнение движения (3.6). В нём задаётся форма импульса тока.

Можно рассмотреть несколько вариантов формы импульсов тока, дающих определённое приближение к представленной на рис. 3.10:

- треугольная (рис. 3.11, а);

- трапецеидальная (рис. 3.11, б);
- симметричный «криволинейный треугольник» по рис. 3.10, аппроксимированный тремя фронтами линейного нарастания и спадания тока разной крутизны (рис. 3.11, в);
- аппроксимированная полуволна синусоиды (рис. 3.11, г);



**Рис. 3.11. Формы импульсов для работы в приводе с инвертором тока**

Амплитуды и координаты характерных точек импульсов тока на рис. 3.11 даны с учётом условия, при котором обеспечивается одинаковая мощность электрических потерь, в функции безразмерного времени (3.12).

$$\tau = \frac{2\pi t_I}{T_{ц}}; (0 < t_I < T_{ц}), \quad (3.12)$$

где  $t_I$  – время, прошедшее от начала цикла коммутации, отсчитываемое с момента подачи тока на первую фазу обмотки двигателя.

Исследования проводились на предварительно спроектированном двигателе с большим числом устойчивых положений на оборот. Параметры двигателя и привода представлены в табл. 3.3.

### Параметры двигателя и привода

Наименование параметра	Значение
Момент нагрузки на валу, типа «сухое трение», Н·м	3,0
Прочие составляющие момента нагрузки	0
Момент инерции двигателя и привода, кг·м <sup>2</sup>	0,2
Активное сопротивление фазы в нагретом состоянии, Ом	1,29
Максимальное значение индуктивности фазы, Гн	0,0087
Минимальное значение индуктивности фазы, Гн	0,0016
Индуктивность рассеяния лобовых частей, Гн	0,0015
Число зубцов на роторе	100
Число фаз	4

Расчёты показывают, что изгиб переднего и заднего фронтов импульсов тока по сравнению с линейным его нарастанием и спаданием (рис. 3.11, *в*, по сравнению с рис. 3.11, *а*) практически не оказывает влияния на плавность движения ротора, которая оценивалась по максимальному угловому ускорению за время переходного процесса. При этом плавность движения ротора при пуске с импульсами трапецеидальной, рис. 3.11, *б*, и синусоидальной формы, рис. 3.11, *г*, оказалась на 30-40% выше, чем при треугольных импульсах, что можно объяснить большей составляющей первой гармоники в импульсах тока, аппроксимирующих синусоиду.

Расчётные опыты, осциллограммы скорости и перемещения в которых показаны на рис. 3.12, выявили преимущество преобразователя с импульсами тока формы «криволинейный треугольник» (рис. 3.11, *в*) с пуском на частоту приемистости. Из всех вариантов формы тока, представленных на рис. 3.11, успешный пуск был осуществлён только при подаче импульсов формы «криволинейный треугольник», сформированный с учётом условия (3.7), (рис. 3.11, *в*).

Серьёзный практический интерес представляют аналогичные кривые, полученные в приводе с другими видами нагрузки и их сочетанием, в частности, для потенциальной нагрузки при движении на подъём и на опускание регулирующего органа (рис. 3.12) [104]. В этих устройствах преобладает

потенциальная нагрузка от веса регулирующего органа, которая содержит также составляющую трения.

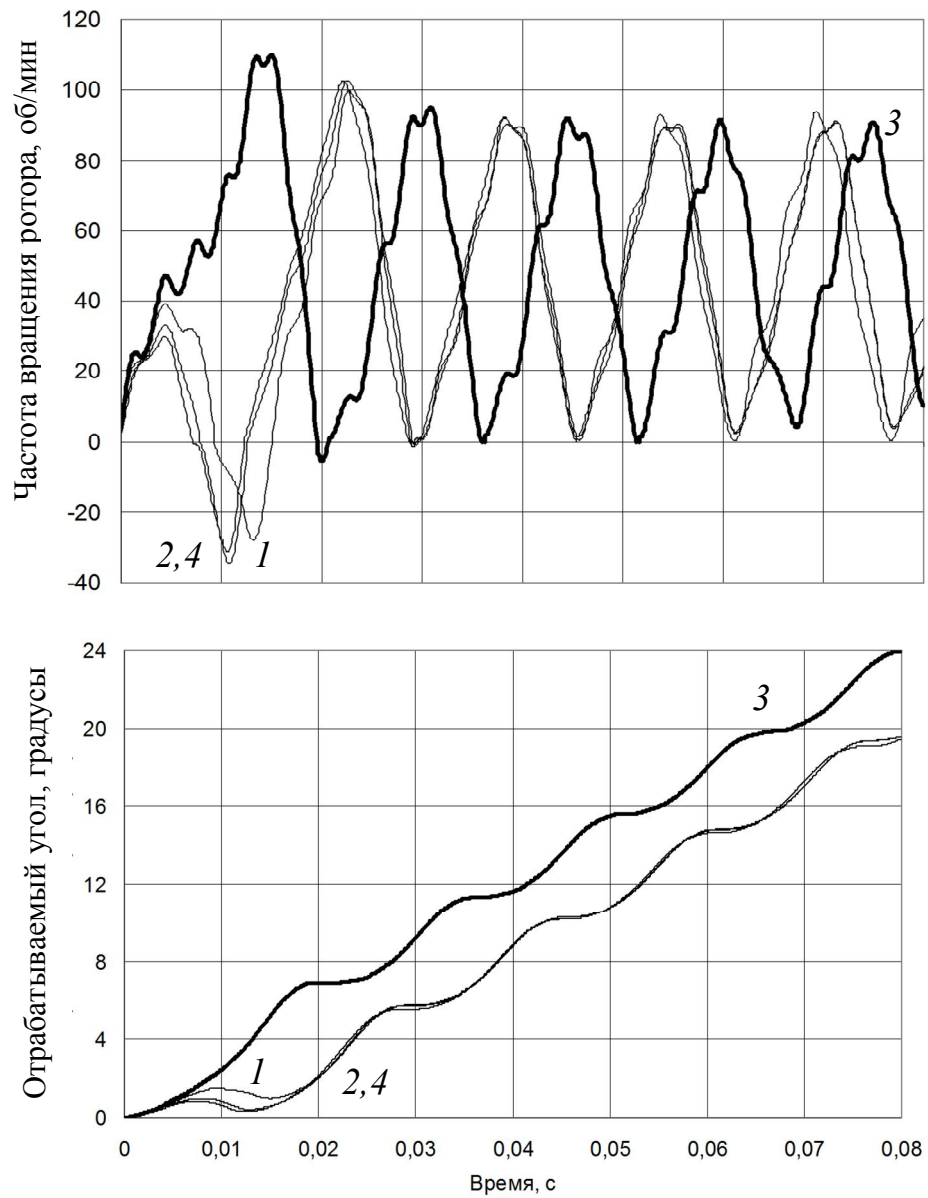
Расчётные осциллограммы, полученные при воспроизведении пуска привода с этими же параметрами, но с преобладанием потенциальной нагрузки, она составляет 90% от общего момента, представлены на рис. 3.13. Из них следует, что при изменении характера нагрузки обеспечивается положительный результат с треугольными импульсами с прямолинейными фронтами нарастания и спадания тока (рис. 3.11, *a*) и с импульсами тока «криволинейный треугольник» (рис. 3.11, *в*), кривые 1 и 3 на рис. 3.13, соответственно.

Благодаря избыточной мощности в начале переходного процесса, привод с прямолинейными фронтами импульсов тока демонстрирует более уверенный на пуск на первых тактах коммутации, сопровождающийся, однако, большей амплитудой переходных колебаний скорости, способных ограничить диапазон рабочих частот.

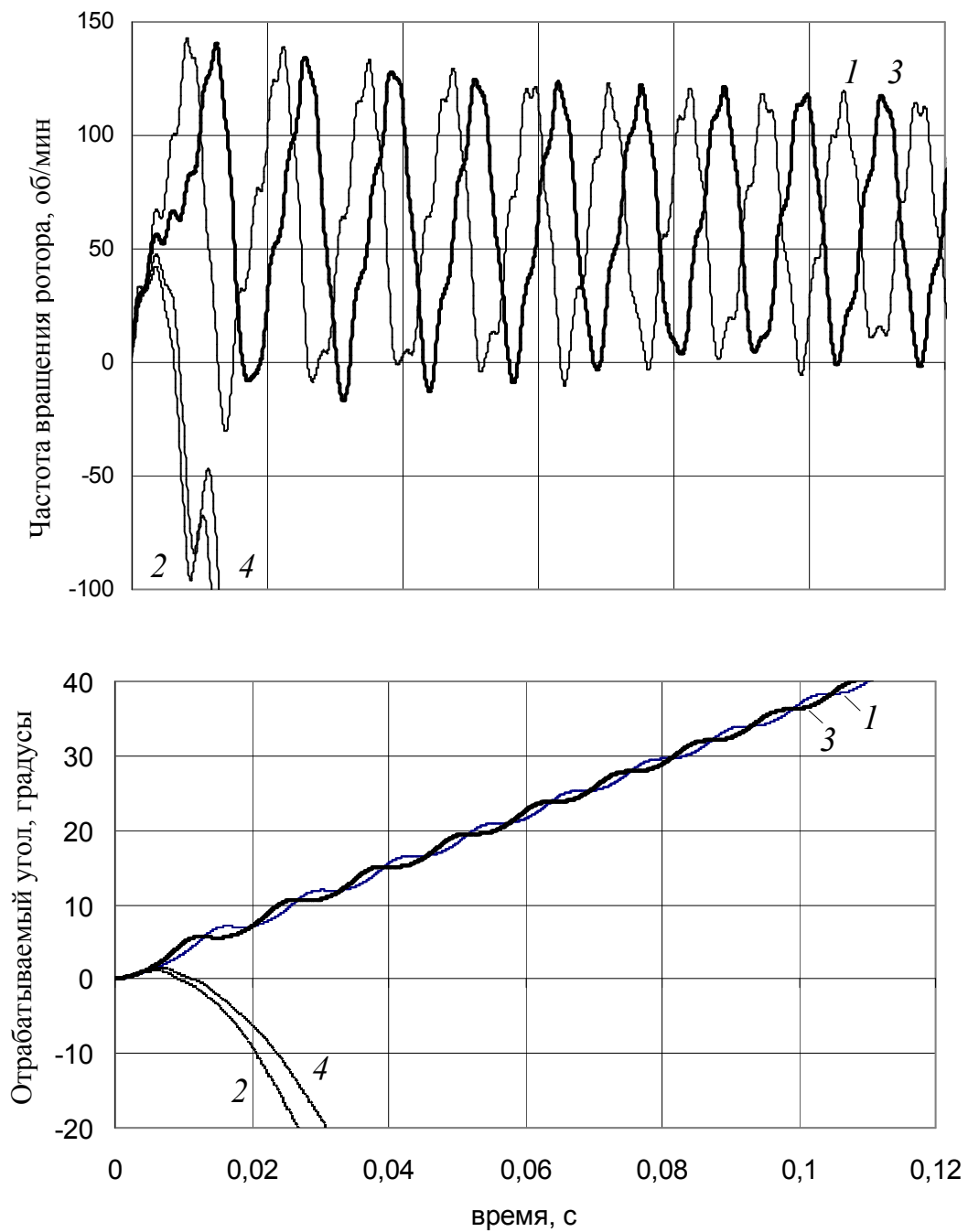
При неблагоприятном исходе процесса пуска в приводе с трапецеидальными и аппроксимированными синусоидальными импульсами тока ротор двигателя начинает неуправляемый разгон под действием момента веса регулирующего органа, приложенного через редуктор (кривые 2 и 4 на рис. 3.13).

При этом отмечено, что изменение начального углового положения ротора от 0 до  $\pi$ , отсчитываемого по отношению к пространственному положению оси первой фазы, не влияет на результат процесса, с любой формой импульсов тока.





**Рис. 3.12. Осциллограммы пуска шагового электропривода на частоту приёмности при различной форме импульсов тока в фазах**



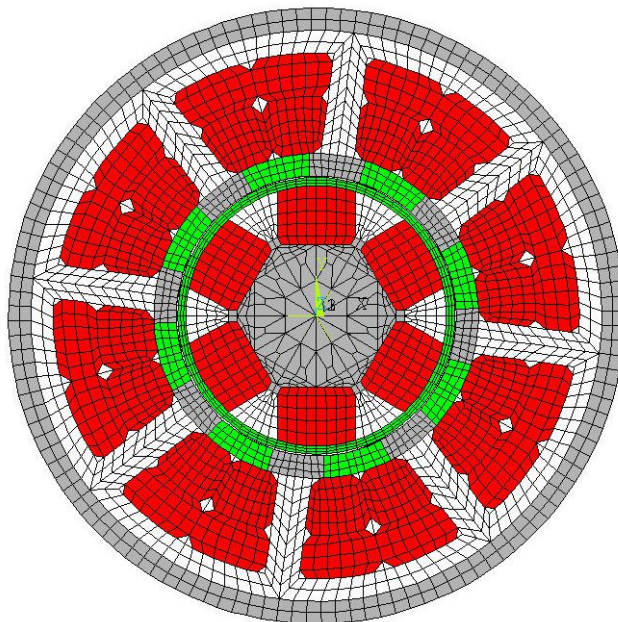
**Рис. 3.13. Осциллограммы пуска привода вертикального перемещения на частоту приёмности при различной форме импульсов тока в фазах**

### **3.5 Исследования генератора**

Поверочный расчёт генератора выполнен с использованием сеточной модели (рис. 3.14). Он содержит расчёт угловых характеристик генераторного момента при трёх значениях плотности тока в обмотке якоря и расчёт ЭДС, наводимой при вращении ротора. Результаты расчёта представлены в табл. 3.3. Угловые характеристики, рассчитанные при трёх значениях тока

якоря, приведены на рис. 3.15, при различных значениях плотности тока в обмотке якоря:  $j_1$  (кривая 1),  $j_2$  (кривая 2) и  $j_3$  (кривая 3), причём  $j_1 > j_2 > j_3$ .

APDL- программы расчёта угловых характеристик представлены в Приложении П.2.2.



**Рис. 3.14. Сеточная модель генератора**

Анализ характеристик показал целесообразность перехода на последовательное включение катушек в фазах генератора (схема 1 на рис. 3.16), с ёмкостью по 5 мкФ в каждой. В исследуемом образце такая схема позволит выполнить условие

$$f = \frac{pn_{уст}}{60} < \frac{1}{\sqrt{L_{\sigma}C}} \quad (3.13)$$

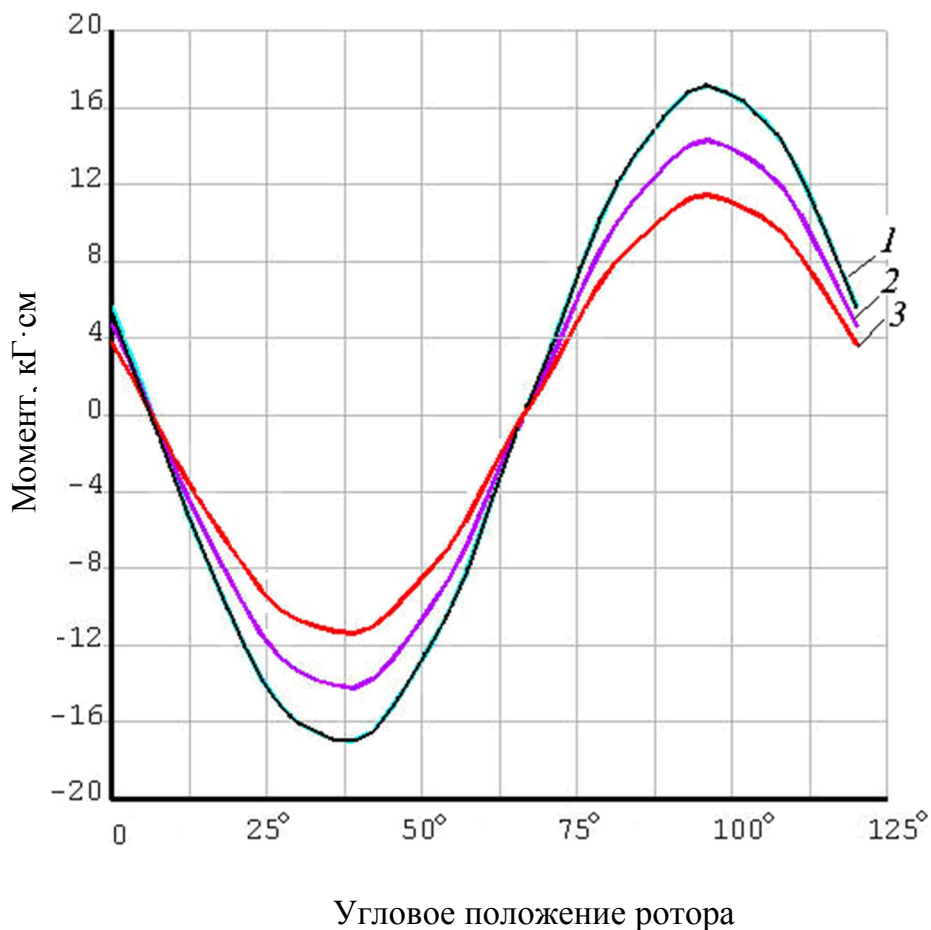
или

$$n_{уст} < \frac{60}{p\sqrt{L_{\sigma}C}}, \quad (3.14)$$

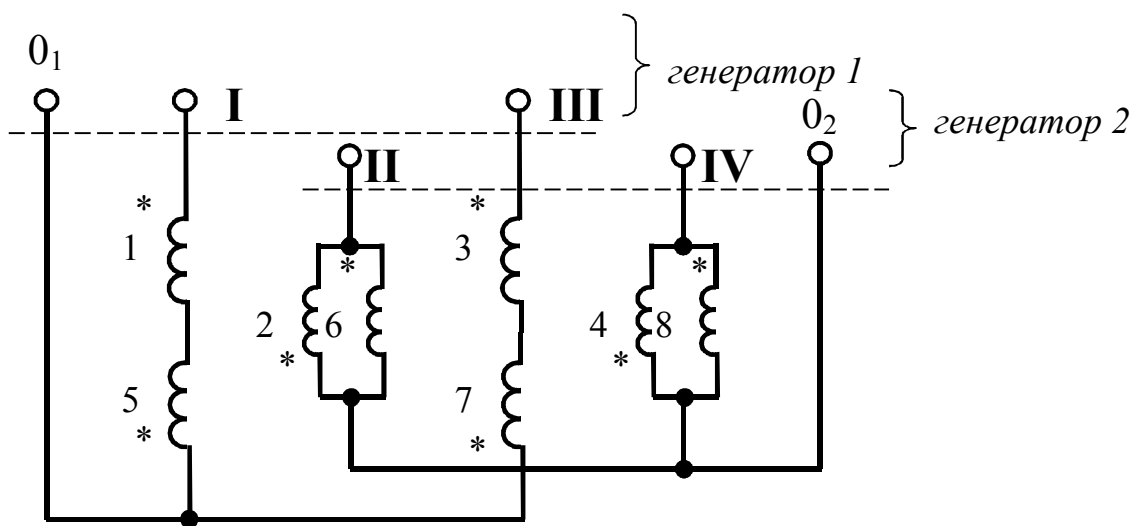
где  $p$  – число пар полюсов вращающегося поля возбуждения. Кроме того такая схема позволяет исключить контуры замыкания токов, обусловленных магнитной и электрической асимметрией полюсов и катушек.

## Результаты расчёта и измерений характеристик генератора

Наименование параметра	Значение
1 Амплитуда потокосцепления поля ротора и фазы обмотки якоря (определена по сеточной модели рис. 3.14), Вб	$1,75 \cdot 10^{-3}$
2 Наибольшая частота вращения ротора, $\text{с}^{-1}$ (об/мин)	46 (2760)
3 Наибольшая частота наводимой ЭДС, Гц	138
4 Амплитуда ЭДС ветви одной фазы обмотки якоря при наибольшей частоте вращения ротора, В	98
5 Амплитуда сигнала, выдаваемого во вторичный преобразователь для определения углового положения ротора путем интегрирования сигнала по частоте вращения, при последовательном соединении ветвей обмотки в фазах, В/(об/мин), не менее	0,07
Эксперимент, при 10 об/мин	0,9
эксперимент, на клемме III датчика (15 В при 200 об/мин при синусоидальной форме ЭДС)	0,075
6 Амплитуда генераторного момента, Н·м ( $\text{кГ} \cdot \text{см}$ ) при значении плотности тока $j$ в обмотке якоря: $-j_1=6,0 \text{ А/мм}^2$ $-j_2=5,0 \text{ А/мм}^2$ $-j_3= 4,0 \text{ А/мм}^2$	1,67 (17,0) 1,39 (14,2) 1,12 (11,4) (эксперимент: $\approx 12$ )
Потребный генераторный момент, $\text{кГ} \cdot \text{см}$ менее	4,0
При частоте вращения, об/мин	2650
Фактический генераторный момент, двухфазная схема, при ёмкости конденсаторов, мкФ, $\text{кГ} \cdot \text{см}$	
15/15	7,5
10/10	5,0
5/5	3,15
То же, при последовательной схеме катушек в фазах генератора, 10/10	29,5
5/5	13,5
0/5 (при 2630 об/мин)	0,9
0/3 (при 2760 об/мин)	0,5
0/0 (2760 об/мин)	0,28



**Рис. 3.15. Угловые характеристики генератора**



**Рис. 3.16. Схема включения катушек генератора**

Расчёт выполнен по формулам

$$f = \frac{pn}{60}; \tag{3.15}$$

$$E_m = 2\pi \cdot 2w_k K_{об} \Phi_m \cdot L_\delta; \quad (3.16)$$

$$I = \frac{2E_m}{\sqrt{2}r_\phi}, \quad (3.17)$$

где  $f$  – частота ЭДС, соответствующая наибольшей частоте вращения ротора, Гц;

$p$  – число пар полюсов ротора;

$n$  – частота вращения ротора, соответствующая наибольшей скорости опускания РО, об/мин;

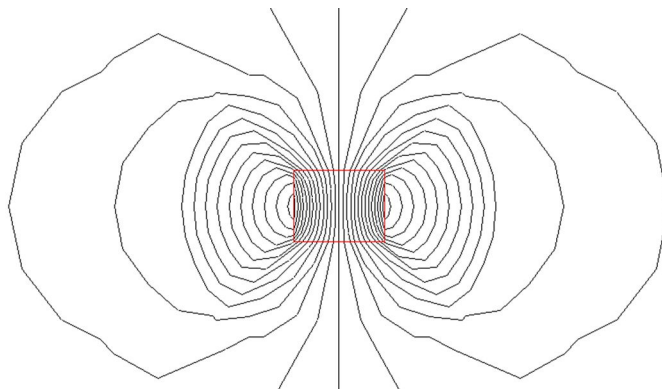
$K_{об}$  – обмоточный коэффициент обмотки по третьей (рабочей) гармонике;

$\Phi_m$  – амплитуда потокосцепления поля ротора и фазы обмотки якоря, определяемая по сеточной модели, Вб;

$L_\delta$  – аксиальная длина ротора, м.

В процессе изготовления генератора выполнен расчёт остаточного магнитного потока заготовки постоянного магнита выполнен для занесения данных в конструкторскую документацию, с целью проверки степени намагниченности перед направлением в сборку.

Расчёт выполнен путём интегрирования линий магнитной индукции поля (рис. 3.17), рассчитанного методом конечных элементов. Результаты расчёта остаточного магнитного потока для заготовок магнитов ротора генератора размером 83,0x14,0x11,0 мм из материала двух марок представлены в табл. 3.4.



**Рис. 3.17. Магнитное поле заготовки постоянного магнита ротора генератора**

**Характеристики магнитов генератора**

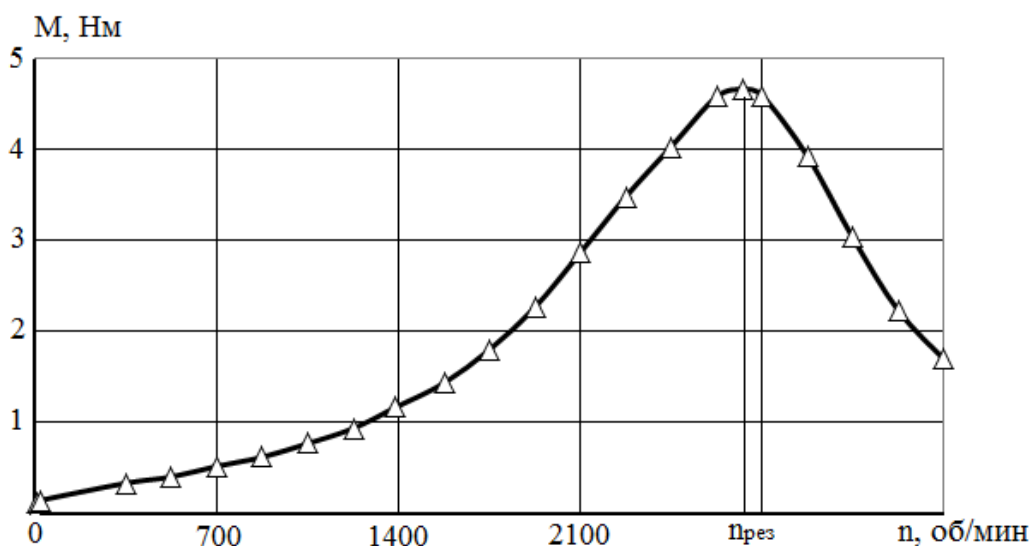
Марка магнитного материала	Остаточная индукция, Тл	Коэрцитивная сила, кА/м	Индукция поля в заготовке, Тл	Остаточный поток, Вб·10 <sup>-3</sup>
22БА220	0,36	215	1,507	0,175, не менее (измеренное значение 0,22)
28СА250	0,40	245	1,67	0,194, не менее (измеренное значение 0,22)

Сеточная модель генератора, обеспечивающего ограничение скорости опускания (торможение) регулирующего органа, которая позволяет рассчитать электромагнитный момент, показана на рис. 3.14 (четырёхфазный шестиполюсный вариант). Модель содержит элементы, относящиеся к областям магнитопровода и катушек обмотки якоря на статоре, ротора с постоянными магнитами, воздушного зазора между ними. Она позволяет точно рассчитать момент по известным значениям токов фаз обмотки в виде семейства угловых характеристик, построенных при различных значениях действующего тока в фазах, при симметричном их распределении.

Действующее значение токов предварительно рассчитывается из схемы замещения, содержащей цепь из ЭДС фазы, и её активного и индуктивного сопротивлений, и ёмкостного сопротивления нагрузки, которые являются функцией установившейся частоты вращения ротора. На ней момент от веса РО и электромагнитный момент генератора, совместно с силами трения в механизме, взаимно уравновешивают друг друга.

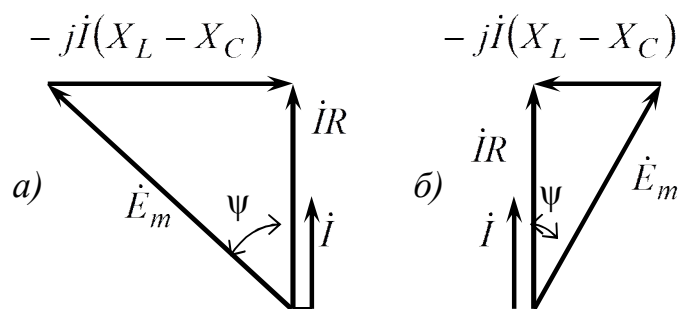
Для заданного значения установившейся частоты вращения ротора, по значению ЭДС рассчитывается ток, после чего определяется зависимость тормозного электромагнитного момента от частоты вращения ротора.

Режимы генератора с обмотками фаз, замкнутыми на ёмкостную нагрузку, можно определить из векторных диаграмм (рис. 3.19).



**Рис. 3.18. Генераторная характеристика**

На низкочастотном участке генераторной характеристики ток и электромагнитный момент линейно возрастают с ростом частоты вращения под влиянием роста ЭДС, реактивный ток в цепи является индуктивным (рис. 3.18). На более высоких частотах сказывается влияние компенсации поля реакции якоря конденсаторами, и момент возрастает более интенсивно, вплоть до максимума, при котором наступает резонанс напряжений. Этот участок характеристики является рабочим. На нём электромагнитный момент уравновешивает момент от веса регулирующего органа и последний опускается равномерно.



**Рис. 3.19. Векторные диаграммы**

При дальнейшем разгоне ротора реактивный ток в цепи становится ёмкостным (рис. 3.18), характеристика переходит на ниспадающую ветвь вследствие роста ёмкостного сопротивления. Эта ветвь соответствует неустойчивой работе: в теоретически возможном случае преодоления



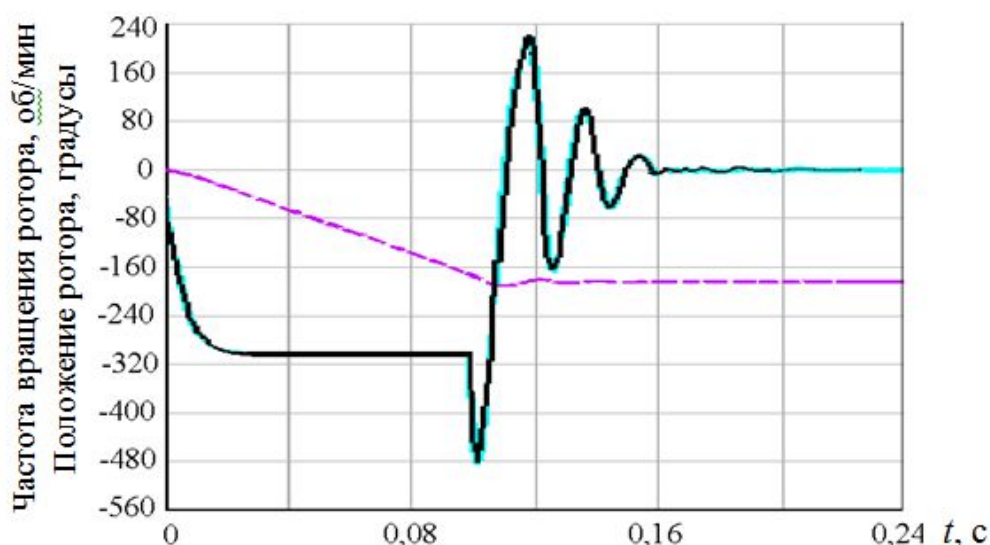
максимума электромагнитного момента под действием какого-либо случайного импульса нагрузки происходит неуправляемый разгон ротора.

Найденный ток подставляется в уравнение электромагнитного момента

$$M = \frac{mRI^2}{\Omega}, \quad (3.18)$$

где  $m$  – число фаз обмотки генератора,  $\Omega$  – частота вращения ротора в  $рад/с$ .

При обесточенном ШД ( $0 < t < 0,1$  с) ротор первоначально разгоняется под действием веса РО и поступательно перемещающихся частей преобразователя движения. По истечении около 0,03 с момент от веса подвижных масс уравнивается электромагнитным моментом УКД и РО опускается равномерно со скоростью, соответствующей частоте вращения ротора около 300 об/мин (сплошная кривая на рисунке 3.20).



**Рис. 3.20. Оциллограммы движения ротора привода в режиме АЗ с последующим подхватом (остановом) РО**

При  $t = 0,1$  с подаётся команда на останов РО в виде тока в одну из фаз обмотки ШД. При этом, вследствие неблагоприятных начальных условий по угловому положению ротора он первоначально получает дополнительный импульс на перемещение РО вниз, ускоряясь до 480 об/мин, после чего останавливается, совершив несколько колебаний скорости вокруг нулевого зна-

чения и пройдя перемещение половину оборота (пунктирная кривая на рисунке 3.20).

Таким образом, представленные модели обесточенного электропривода вертикального перемещения регулирующего органа позволяют определить установившуюся скорость его опускания на основе баланса момента нагрузки от веса регулирующего органа и генераторного момента синхронной машины. Они могут быть получены на основе как расчётных, так и экспериментальных данных.

Интегрируя уравнение движения, в котором электромагнитный момент машины представлен генераторной характеристикой, можно определить время аварийного сброса регулирующего органа – важнейший показатель работы привода в режиме аварийной защиты энергетической установки.

### **3.6 Выводы по результатам исследований**

На основе расчётов, выполненных точными (численными) методами и экспериментов, получены следующие основные результаты:

1) проведены расчётно-экспериментальные исследования, выполненные на модели шагового привода с инвертором тока. Они показали, что наилучшими пусковыми качествами в шаговом приводе индукторный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов на роторе обладает при треугольной форме импульсов с близким к линейному или с линейным фронтом нарастания и спадания тока.

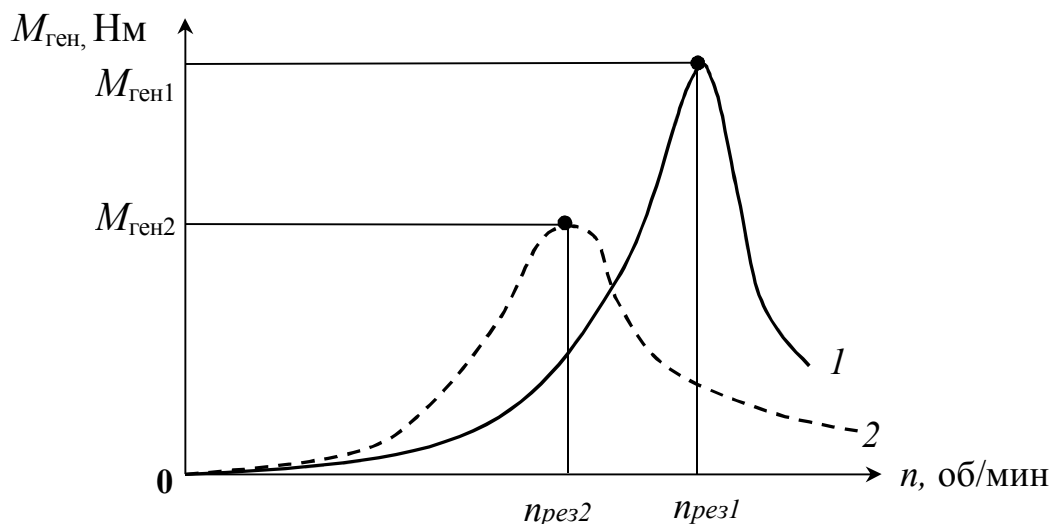
2) подтверждены характеристики двигателя, ожидаемые после выполнения проектировочного расчёта;

3) установлено преимущество разработанного электромеханического преобразователя по генераторному моменту перед прототипом, за счет меньшего сопротивления более коротких катушек обмотки генератора, расположенных на отдельном магнитопроводе;

4) в силу большей добротности резонансных контуров отдельный генератор обладает большим быстродействием и функциональной надежностью по сравнению с базовым образцом;

5) повышение функциональной надежности привода обеспечивается за счет более интенсивного разгона на участке разгона регулирующего органа, так как тормозной момент на начальном участке в предлагаемом устройстве меньше, чем у прототипа, а на участке ограничения скорости опускания РО этот момент больше, чем у прототипа на 30%.

Последний вывод подтверждён экспериментальными характеристиками (рис. 3.21, сплошная линия - характеристика предлагаемого устройства, пунктирная линия - характеристика прототипа).



1 – механическая характеристика предлагаемого генератора, 2 – механическая характеристика прототипа, совмещённого с ШД

**Рис. 3.21. Механические характеристики генераторов**

## 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ

### 4.1 Расширение области применения электромеханического преобразователя

Благодаря отсутствию общих магнитных цепей и электрических соединений с катушками обмотки статора генератора в составе нового электромеханического преобразователя, по которым протекает силовой ток, он может быть использован для целей индикации положения ротора, а с ним и положения регулирующего органа. Реализовать дополнительный канал индикации положения РО можно за счет преобразования сигнала ЭДС в фазах I и II генератора с помощью аналогово-цифрового преобразователя рис. 4.1

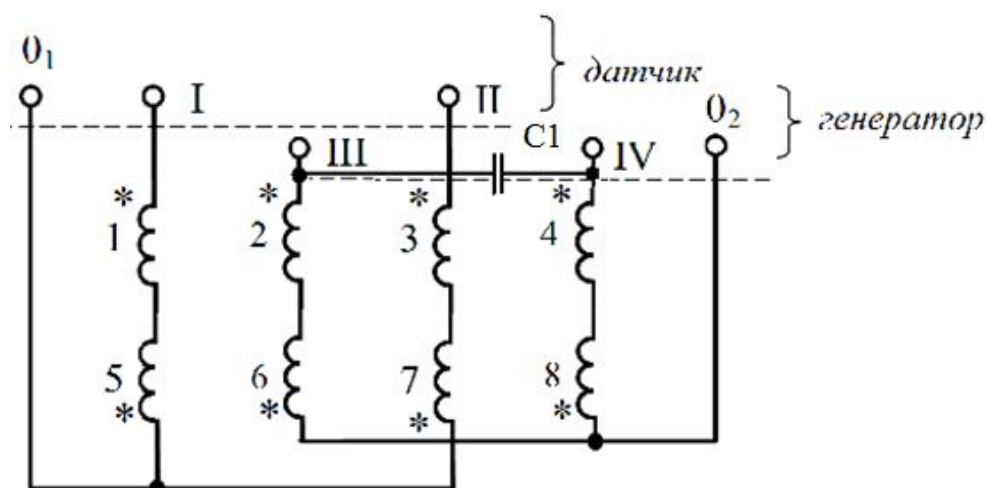


Рис. 4.1. Схема включения обмоток генератора и датчика

После преобразования аналогового сигнала, используя счетчик, можно отсчитать количество импульсов, соответствующее фактически отработанному угловому положению ротора, а значит, и перемещению регулирующего органа от исходного положения, например, от положения на нижнем упоре.

Направление вращения определяется по двум сигналам, сдвинутым на 90 градусов.

Безусловно, в приводе исполнительного механизма СУЗ используются датчики конечных положений, индуктивные датчики реперных точек, представляющие собой концевые выключатели, индуктивные катушки, магнитоуправляемые контакты, однако введение дополнительного канала индикации положения рейки с регулирующим органом позволяет повысить надёжность работы привода.

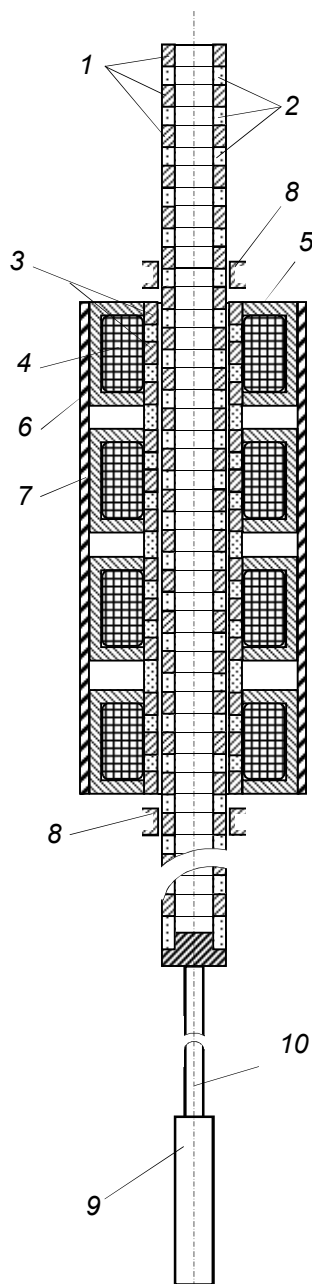
Появляется возможность получения чистого, без коммутационных помех, синусоидального сигнала о наличии вращения ротора, который может быть преобразован в сигнал о положении РО.

#### **4.2 Разработка линейного двигателя непосредственного привода РО**

С целью проверки альтернативного варианта привода, в том же внешнем диаметре, что и спроектированный, исследованный (результаты отражены в разделе 3.2) и изготовленный ШД, был рассчитан аналог электропривода без механического преобразователя вращательного движения в поступательное, на базе линейного ШД.

Наиболее эффективная конструкция линейного шагового двигателя, представляет собой индукторно-реактивную машину с изолированными в магнитном отношении фазами (рис. 4.2) [92, 105]. Его ротор набран из магнитомягких 1 и немагнитных 2 колец. Магнитомягкие кольца 1 ротора взаимодействуют с такими же кольцами 3 на статоре, ограничивающими воздушный зазор с противоположной стороны. Магнитный поток фазных обмоток статора 4 замыкается в аксиально-радиальном направлении через несколько колец 1 и 3, расположенных между цилиндрическими полюсами 5 магнитопроводов 6, несколько раз пересекая зазор. Фазные обмотки 4 с магнитопроводами 6 установлены в общем корпусе 7, со смещением колец 3

соседних магнитопроводов на  $1/4$  зубцового деления. Ротор перемещается в опорах 8 и связан с регулирующим органом 9 посредством штока 10.



**Рис. 4.2. Схема конструкции линейного для механизма вертикального перемещения регулирующего органа**

Благодаря неоднократному пересечению зазора рабочим магнитным потоком, достигается высокое использование активных материалов и уменьшенное, по сравнению другими аналогами, индуктивное сопротивление реакции якоря.

Таблица 4.1

**Характеристики линейного ШД  
непосредственного привода РО**

Наименование параметра	Значение
Масса рейки и РО, кг	50
Расчётная сила трения в механизме, кГ	5
Геометрические размеры	Рис.4.3
Диаметр расточки статора, мм	40,0
Число кольцеобразных магнитомягких вставок в пределах одного магнитопровода статора	4
Число фаз обмотки	4
Число магнитопроводов статора с катушками обмотки	2
Амплитуда плотности тока в катушках обмотки, А/мм <sup>2</sup>	25,0
Амплитуда тока в фазах обмотки, А	16,0
Форма тока в фазах	Треугольная, рис.4.4 и рис.4.5
Марка провода	ПНЭТ-имид
Диаметр обмоточного провода без изоляции/в изоляции, мм	0,9/0,959
Число витков одной катушки	1140
Материал магнитопровода статора и кольцевых вставок	09Х17Н
Скорость перемещения РО, мм/с	9,0
Перемещение РО вверх, мм	Рис.4.4
Перемещение РО вниз, мм	Рис.4.5
Потери в обмотке, Вт	Рис.4.6
Распределение потерь в динамическом режиме	Равномерное по сечению всех катушек

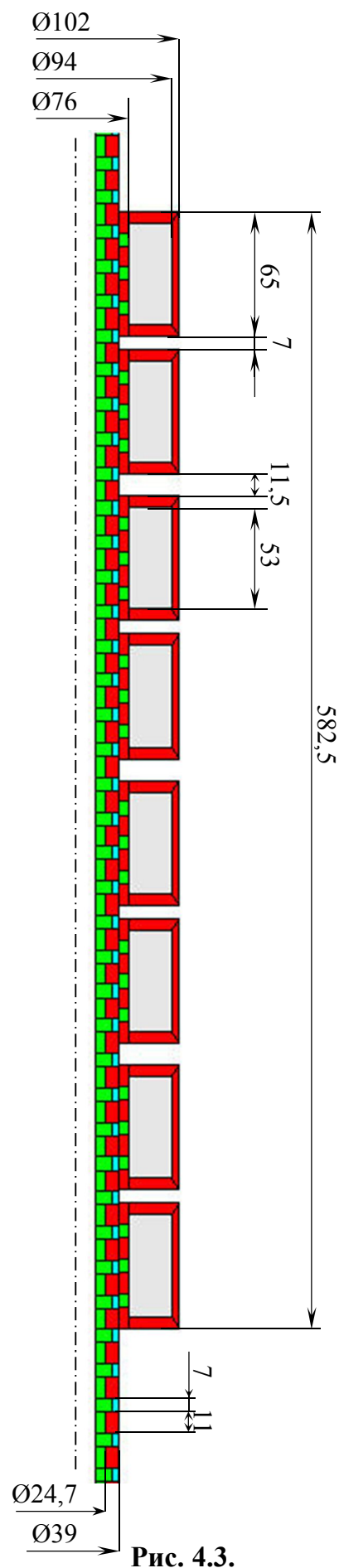
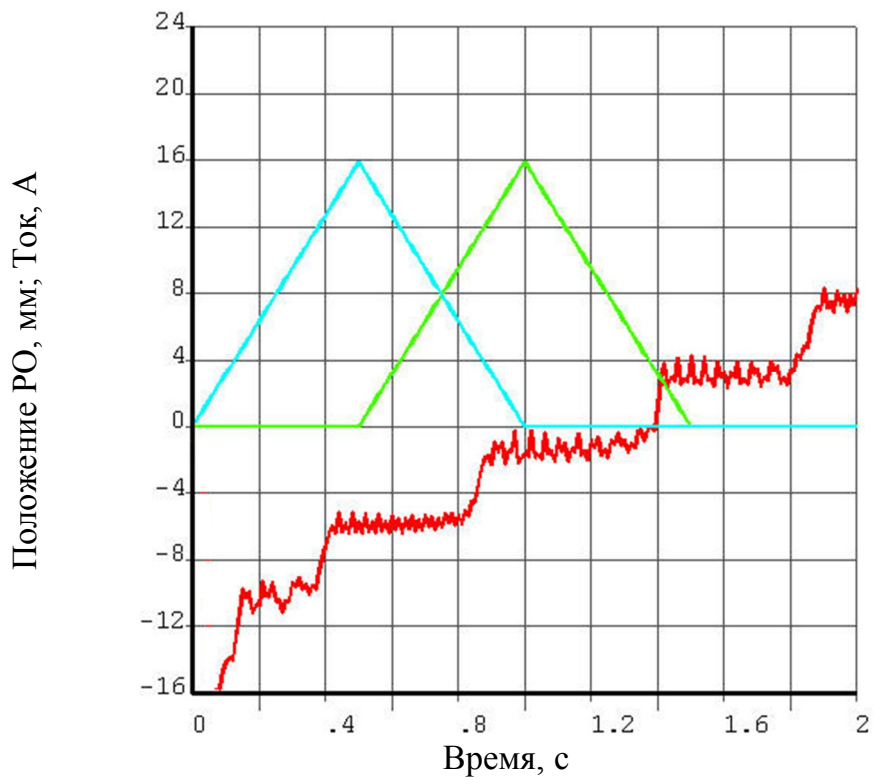
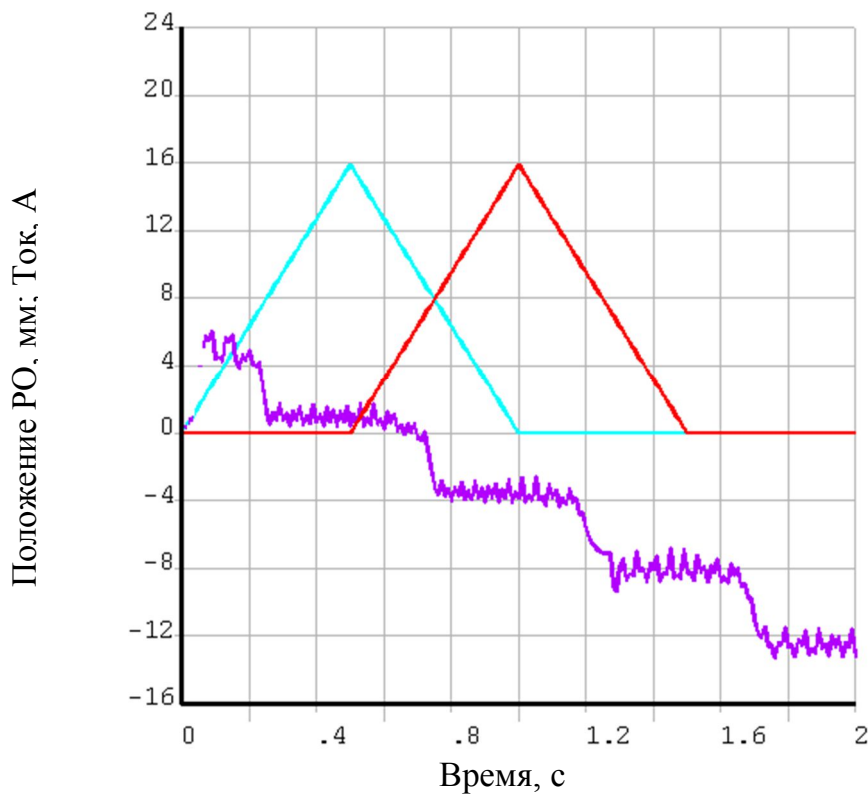


Рис. 4.3.

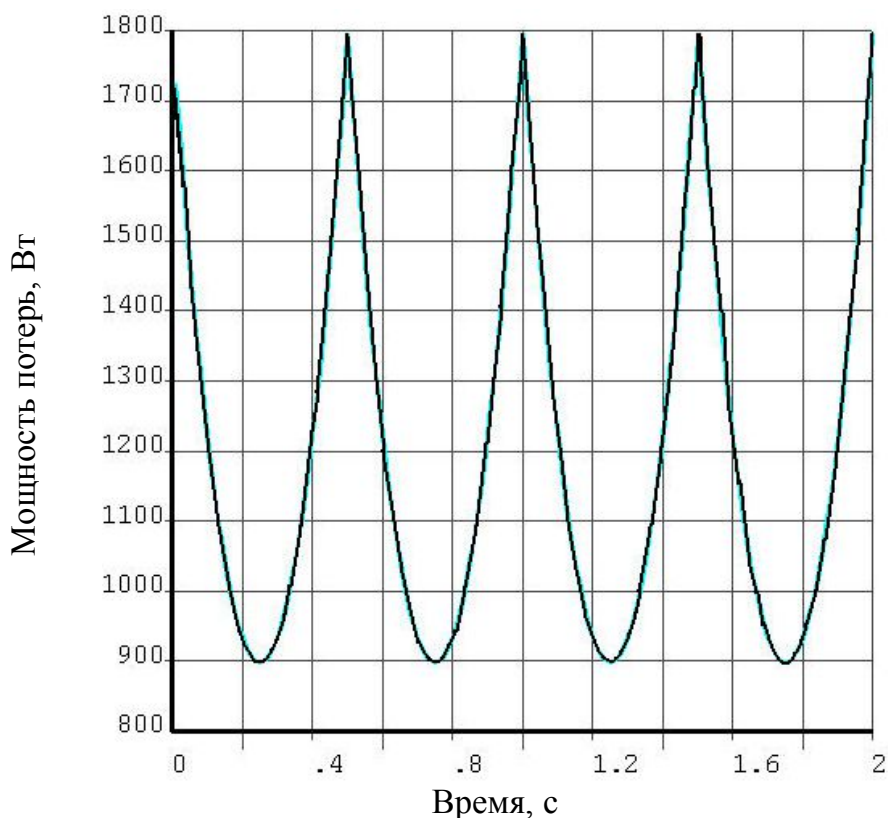


**Рис. 4.4. Перемещение РО вверх в приводе с линейным ШД**



**Рис. 4.5. Перемещение РО вниз в приводе с линейным ШД**





**Рис. 4.6. Потери в катушках обмотки статора**

При проведении проектировочных расчётов установлено, что при таком же, как и у вращающегося аналога, внешнем диаметре (рассмотрен вариант 102 мм) разместить катушки четырёхфазной обмотки в четырёх магнитопроводах и обеспечить при этом надёжное перемещение рейки и РО общей массой 50 кг не удаётся. Поэтому пришлось удвоить их количество, с соответствующим увеличением осевой длины машины.

Применение линейного ШД может оказаться перспективным, благодаря исключению редуктора и упрощению компоновки на крышке реактора.

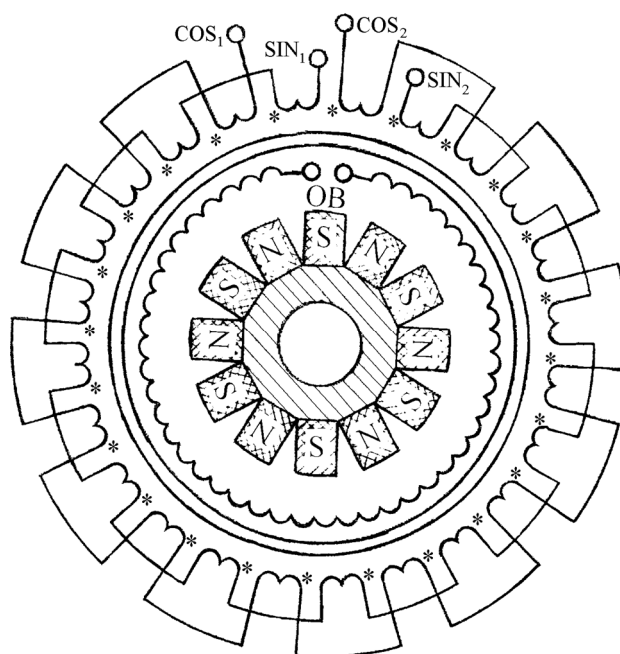
### **4.3 Разработка концептуального генератора для регулирования скорости сброса АЗ**

Для воздействия на скорость опускания РО при работе ЯЭУ в режиме АЗ можно использовать бесконтактную синхронную машину, поток возбуждения которой, созданный постоянными магнитами, регулируется путём под-

магничивания магнитопровода с обмоткой якоря (рис. 4.7) от автономного источника [106].

Путём изменения тока обмотки подмагничивания в этой машине можно изменять ЭДС и ток обмотки якоря, а значит и электромагнитный момент, воздействуя тем самым на скорость опускания РО.

На кольцеобразный сердечник такого генератора (рис. 4.7) намотаны катушки обмотки возбуждения (ОВ) и нескольких фаз обмотки якоря. Для двухфазной машины это может быть синусная (SIN) и косинусная (COS) обмотки. Сердечник навит из ленты ферромагнитного материала, обладающего прямоугольной петлёй гистерезиса (пермаллоя).



**Рис. 4.7. Схема конструкции синхронного генератора с регулированием напряжения подмагничиванием магнитопровода кольцевой обмотки якоря**

Обмотка подмагничивания получает питание от регулируемого источника выпрямленного напряжения. Катушки синусной и косинусной обмоток намотаны поверх обмотки подмагничивания, имеют одинаковые числа витков и чередуются между собой по окружности сердечника. Общее число катушек каждой из этих обмоток равно числу полюсов обмотки якоря. Такое

же число полюсов имеет и ротор, который представляет собой многополюсный постоянный магнит.

Однако наличие обмотки подмагничивания в этой машине усложняет её конструкцию и требует дополнительного расхода меди.

Данную конструкцию можно упростить и снизить расход обмоточной меди, за счёт исключения отдельной обмотки подмагничивания.

Для этого катушки обмотки якоря можно соединить в катушечные группы из  $2q$  рядом расположенных катушек, где  $q$  – число катушек на полюс и фазу, включенные в фазах согласно, собранные в звезду с выведенной нулевой точкой, к которой подключены начала катушечных групп, а к фазным зажимам подключены аноды диодов, по одному в каждой фазе, катоды которых замкнуты на дополнительную нулевую точку, снабжённую зажимом.

При таком соединении катушек поток подмагничивания, созданный постоянным током, протекающим через основную и дополнительную (образованную диодами) нулевые точки обмотки якоря, не ответвляется в зазор, а замыкается внутри магнитопровода статора.

Машина может быть изготовлена с гладким магнитопроводом статора (рис. 4.8) и с зубчатым магнитопроводом статора (рис. 4.9), и иметь число полюсов, большее, чем два (рис. 4.10).

Устройство содержит (рис. 4.8 и рис. 4.9) кольцевой магнитопровод статора  $1$ : гладкий (рис. 4.8) или зубчатый (рис. 4.9). На магнитопровод намотаны катушки  $2$ , одна сторона которых пропущена через отверстие магнитопровода  $1$ , а противоположная размещается на его наружной цилиндрической поверхности. Катушки объединены в катушечные группы  $3$  по  $2q$  рядом расположенных катушек, где  $q$  – число катушек на полюс и фазу, таким образом, что они занимают фазную зону  $\frac{360}{mp}$  градусов, что в представленных на рис. 4.8 и рис. 4.9 вариантах трёхфазной двухполюсной машины составляет 120 градусов. Катушки одной катушечной группы на рис. 4.8 выделены штриховкой. Внутри кольцевого магнитопровода статора  $1$  установлен ротор с

постоянными магнитами, образующими полюс 4 «южной»  $S$  и полюс 5 «северной» полярности.

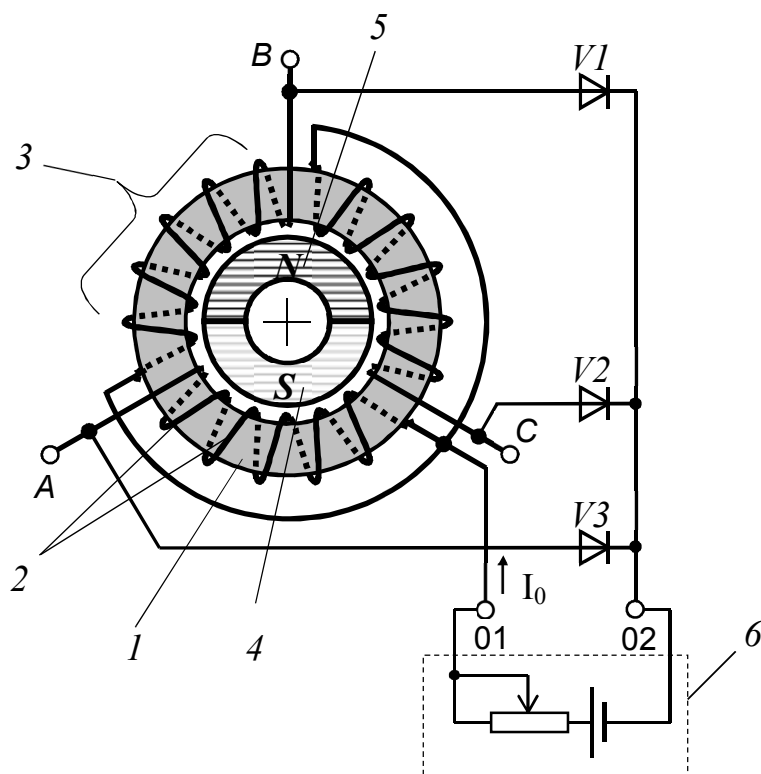


Рис. 4.8. Генератор с обмоткой якоря, совмещённой с обмоткой подмагничивания (двухполюсный вариант с гладким статором)

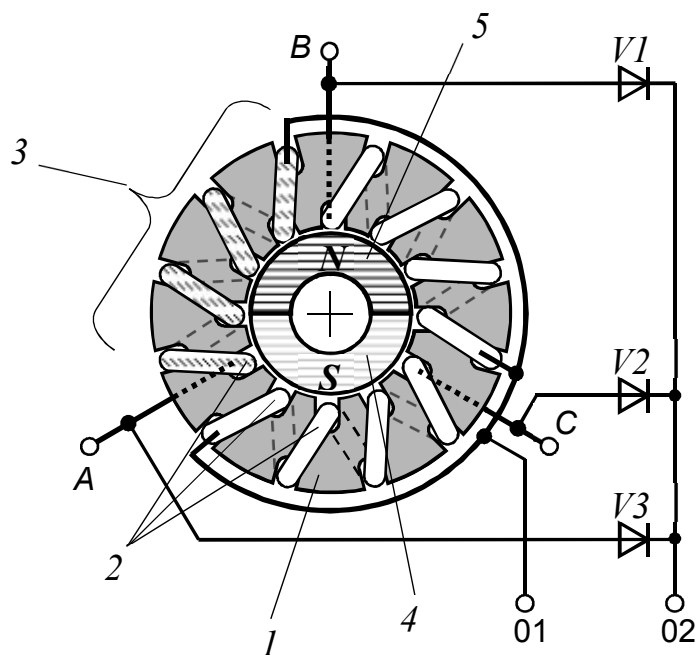
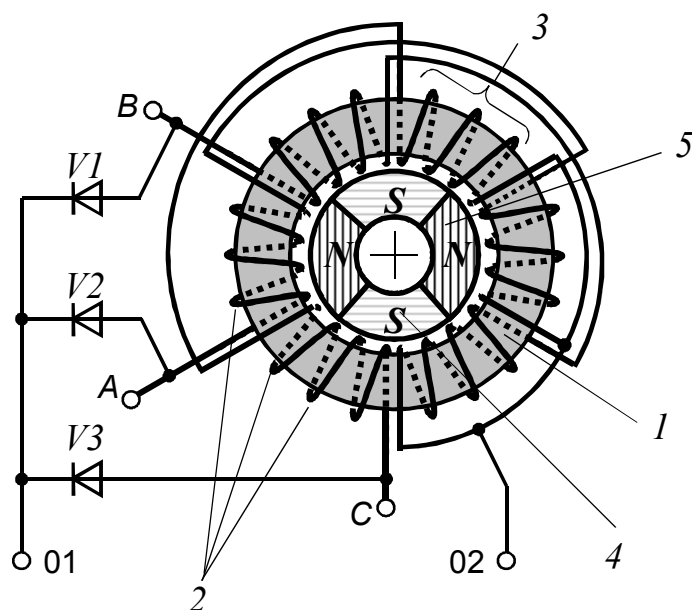


Рис. 4.9. Генератор с обмоткой якоря, совмещённой с обмоткой подмагничивания (двухполюсный вариант с зубчатым статором)



**Рис. 4.10. Генератор с обмоткой якоря, совмещённой с обмоткой подмагничивания четырехполюсный вариант с гладким статором)**

Все катушечные группы 3 намотаны в одном направлении (либо все по часовой стрелке, либо все против часовой стрелки) и соединены в многофазную (трёхфазную,  $m = 3$ ) обмотку. Общее число катушечных групп в каждой фазе равно числу пар полюсов  $2p$ . Катушечные группы разных фаз последовательно чередуются между собой при обходе вдоль окружности кольцеобразного магнитопровода.

При числе пар полюсов, превышающем одну (рис. 4.10), катушечные группы 3 соединяются в фазах согласно, т.е. конец катушечной группы, условно принятой за первую, имеет последовательное соединение с началом второй катушечной группы этой же фазы.

Ветви с катушечными группами каждой фазы соединены в звезду, подключенными к зажимам фаз A, B и C концами катушечных групп, а к выводу нулевой точки 02 началами катушечных групп.

С зажимами фаз соединены также аноды диодов V1 – V3, в фазах A, B и C, соответственно, по одному в каждой фазе. Катоды диодов V1 – V3, собраны в дополнительную нулевую точку, снабжённую зажимом 01.

Синхронная машина работает следующим образом. При вращении ротора, полем его магнитов в фазах обмотки якоря наводится переменная ЭДС.

При подключении нагрузки через зажимы фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (на рисунках не показана) ей будет передаваться электрическая мощность, пропорциональная напряжению на этих зажимах и потребляемому току.

Величину напряжения можно регулировать (стабилизировать) путём подмагничивания кольцеобразного магнитопровода статора. Для этого нулевая точка звезды обмотки якоря  $O_2$  и дополнительная нулевая точка  $O_1$ , образованная катодами диодов, подключаются к регулируемому источнику постоянного напряжения  $b$  (рис. 4.8), а именно к его положительной и отрицательной клеммам, «+» и «-», соответственно. Это напряжение вызывает ток  $I_0$ , равномерно распределяющийся по всем фазам обмотки якоря. Он создаёт магнитный поток, который замыкается внутри кольцеобразного магнитопровода 2 статора и подмагничивает его, т.е. увеличивает магнитное сопротивление. Вследствие возрастания магнитного сопротивления кольцеобразного магнитопровода статора величина ЭДС, наводимой постоянными магнитами 4 и 5 ротора при его вращении уменьшается, в соответствии с чем уменьшается и мощность, отдаваемая синхронной машиной нагрузке. Максимальная мощность будет генерироваться при нулевом токе подмагничивания, т.е. при отключенном источнике постоянного напряжения  $b$ .

Диоды  $V1-V3$  блокируют замыкание тока через источник постоянного напряжения, обусловленного переменным напряжением на зажимах фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

Предлагаемая синхронная машина может быть выполнена с числом фаз многофазной обмотки якоря  $m$ , большим, чем три. В этом случае в вариантах с чётным числом фаз  $m$ , например при  $m = 4$ , будет обеспечена полная симметрия полуволн кривой распределения МДС вдоль окружности зазора между статором и ротором. Минимальное число фаз, с которым может быть выполнена предлагаемая синхронная машина, составляет две,  $m = 2$ . При работе в генераторном режиме такая машина формирует однофазное линейное напряжение, равное удвоенному фазному напряжению, в результате действия двух фазных ЭДС, встречных по отношению друг к другу.

По сравнению с ближайшим аналогом в предлагаемой машине не требуется наматывать дополнительную обмотку – обмотку подмагничивания. Её функции выполняет обмотка якоря, за счёт чего достигаются экономия обмоточной меди и упрощение технологии изготовления.

Предполагается использовать рассмотренную машину в электроприводе управления и защиты регулирующих органов ядерных реакторов, для более строгого поддержания заданной скорости опускания РО, при условии возбуждения подмагничивающей обмотки от автономного источника б (рис. 4.8).

Следуя положениям классической электромеханики, диаметр и длину окружности якоря машины можно связать с её энергетическими или силовыми характеристиками, через машинную постоянную, из которых чаще других используется постоянная Арнольда [54-55]

$$C_A = \frac{D^3 \lambda}{0,1047M} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} B_{\delta m} A}. \quad (4.1)$$

Она позволяет установить зависимость между удельным, по отношению к расчётному моменту, объёмом ротора или расточки статора машины и принятыми электромагнитными нагрузками: амплитудой индукции в зазоре  $B_\delta$ , Тл и линейной токовой нагрузки  $A$ , А/м. Первая характеризует магнитный поток, создаваемой обмоткой возбуждения (индуктором) в зазоре в номинальном режиме. Вторая есть удельная, на единицу длины окружности зазора, МДС обмотки якоря. Здесь  $M$  – расчётный электромагнитный момент машины, Нм;  $D$  – диаметр окружности якоря со стороны рабочего зазора, м;  $\lambda$  – отношение активной длины (длины рабочего зазора в аксиальном направлении) к диаметру окружности якоря;  $m$  – число фаз;  $k_B$  – коэффициент формы индукции в зазоре;  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент, в кольцевой обмотке равен коэффициенту распределения и мало отличается от единицы при числе катушек в катушечных группах большим трёх;  $\alpha_\delta$  – длина полюсной дуги по отношению к полюсному делению.

В кольцевой обмотке линейная нагрузка в два раза меньше, чем в барабанной обмотке, и составляет

$$A = \frac{m w_{\phi} I}{\pi D}, \quad (4.2)$$

где  $w_{\phi}$  – число витков фазы обмотки. Разумные пределы выбора линейной нагрузки в машинах с различной интенсивностью охлаждения составляют от 20000 до 45000 А/м, при естественном охлаждении. При этом приходится иметь в виду, что, в силу размещения половины катушечных сторон на нерабочей стороне магнитопровода статора, могут иметь место определённые технологические сложности при укладке катушек в машинах с большими значениями  $\lambda$ .

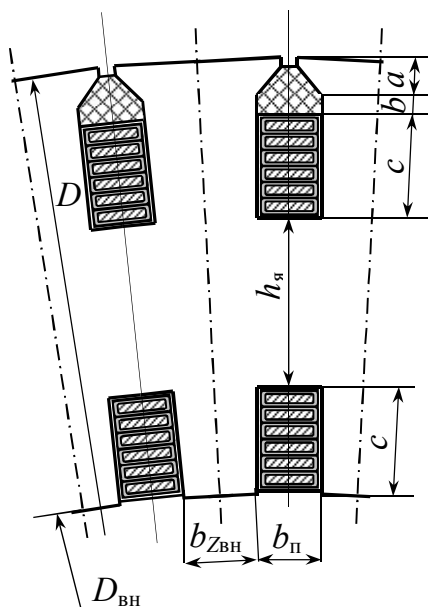
Для размещения обеих сторон катушек в микродвигателях приходится снижать нагрузку, начиная с 8000 А/м. Однако, например, в мощных машинах, предназначенных для работы в криогенной среде и в установках для сжижения газа (детандеры) этот уровень может быть выбран гораздо бóльшим, 100-120 кА/м и выше, т.к. тепло от обмотки отводится перекачиваемой жидкостью.

При создании поля возбуждения посредством высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе сплавов неодима или самария (а только так с приемлемыми удельными показателями можно обеспечить бесконтактное исполнение), в машине с радиально намагниченными магнитами и гладким статором будет создана индукция в зазоре  $B_{\delta}$  порядка 0,35-0,45 Тл. Выбор более высоких значений в двухполюсной конструкции с радиально намагниченными магнитами ограничен насыщением участков ярма ротора.

В двигателях и генераторах средней и большой мощности предпочтительнее схема с пазовым якорем и жёсткой обмоткой, намотанной проводом прямоугольного сечения. Катушки из нескольких витков наматываются в полузакрытые (со стороны рабочего зазора) пазы, с укладкой в один ряд вдоль меньшей стороны сечения. Такая схема обеспечивает высокую механическую прочность и надёжность конструкции в целом и бóльшие значения ин-



дукции в зазоре. В магнитных системах машин с радиально намагниченными магнитами амплитуда индукции под полюсом не превышает  $2/3$  от остаточной индукции магнитотвёрдого материала  $B_r$ , и при использовании магнитов из РЗМ в рассматриваемой магнитной системе, возможно создать индукцию в зазоре  $B_\delta$  до  $0,70 - 0,75$  Тл.



**Рис. 4.11. Схема размещения проводов и изоляции кольцевой обмотки в пазах якоря**

Для минимизации вылета лобовых частей обмотку целесообразно выполнять проводом максимально плоского сечения, имеющего большую разность размеров проволоки по большей и меньшей стороне (по ГОСТ 434-78). Технология укладки предусматривает увеличение высоты прямоугольной части пазов, необходимое для поворота проводов на  $90^\circ$  при намотке катушек (рис. 4.11, размер  $b$ ). Размер  $c$  включает общую высоту проводников секции, проводниковую и корпусную изоляцию, а также толщину прокладки на дно паза, если таковая устанавливается.

При формировании междукатушечных соединений в области лобовых частей применяется пайка или сварка продолжений катушечных сторон, под углом  $90$  градусов. В катушечные группы объединяются катушки, занимающие фазные зоны  $60^\circ$ , но возможно и формирование катушечных групп с

фазными зонами  $120^\circ$ . Монтаж внутрифазных соединений в этом случае заметно упрощается, при несколько худшем использовании меди.

Число витков катушек в пазах  $w_k$  связано с числом витков в фазе  $w_\phi$  через ЭДС фазы и количество пазов (зубцов)  $Z$ , в которое укладывается обмотка

$$E_\phi = (1,07 \div 1,15)U_H = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_\phi k_{об} B_\delta \frac{\pi D^2 \lambda}{2p}. \quad (4.3)$$

$$w_k = \frac{w_\phi}{maZ} = Ц.Ч. \left[ \frac{1}{maZ} \frac{\sqrt{2} E_\phi p}{\pi^2 f k_{об} B_\delta D^2 \lambda} \right] \quad (4.4)$$

(Ц.Ч. – целая часть),  $a$  – число параллельных ветвей.

После выбора параметров сечения прямоугольного провода  $a_{пр}$  и  $b_{пр}$ , соответственно по меньшей и по большей стороне, определяется высота катушечных сторон (размер  $c$  на рис. 4.11), который зависит от размера прямоугольного провода по меньшей стороне сечения  $a_{пр}$  и числа витков в пазу.

При определении величины внутреннего диаметра  $D_{вн}$  рассчитывается радиальный размер ярма  $h_я$ . Из баланса потока в зазоре и в ярме при индукции  $B_я=1,45-1,55$  Тл, радиальный размер ярма составит

$$h_я = \frac{\pi D \alpha_\delta}{(1,45 \div 1,55) \cdot 4p} B_\delta = \frac{(0,5 \div 0,54) D \alpha_\delta}{p} B_\delta. \quad (4.5)$$

Размер магнита в направлении намагничивания (в радиальном направлении, толщина) увязывается с его способностью создавать магнитное поле с индукцией  $B_\delta$  в рабочем зазоре, в нагретом до рабочей температуры состоянии машины.

Для определения толщины магнита используется примитивная модель, в схему замещения которой входят только последовательно соединённые линейные проводимости постоянного магнита, зазора с потоком рассеяния, учтённым посредством соответствующего коэффициента. В модели игнорируется влияние насыщения ферромагнитных участков магнитной цепи, поскольку магнитная проницаемость магнитов из РЗМ практически совпадает с магнитной проводимостью вакуума и составляет не более 1,2 относительных

единиц, тогда как относительная магнитная проницаемость даже самых насыщенных участков из магнитомягкой стали превышает несколько десятков единиц (20-30). Учёт насыщения стальных участков магнитной цепи целесообразно выполнять на стадии поверочного расчёта уже спроектированного двигателя. На стадии проектировочного расчёта влияние насыщения учитывается посредством соответствующего коэффициента, величину которого можно выбрать существенно меньшей, чем в машинах с электромагнитным возбуждением.

Из уравнения, вытекающего из закона полного тока для этой схемы

$$l_m H_{CB} = \frac{l_m H_{CB} B_\delta}{B_0} + \frac{4\delta B_\delta}{\mu_0 k_\sigma}, \quad (4.6)$$

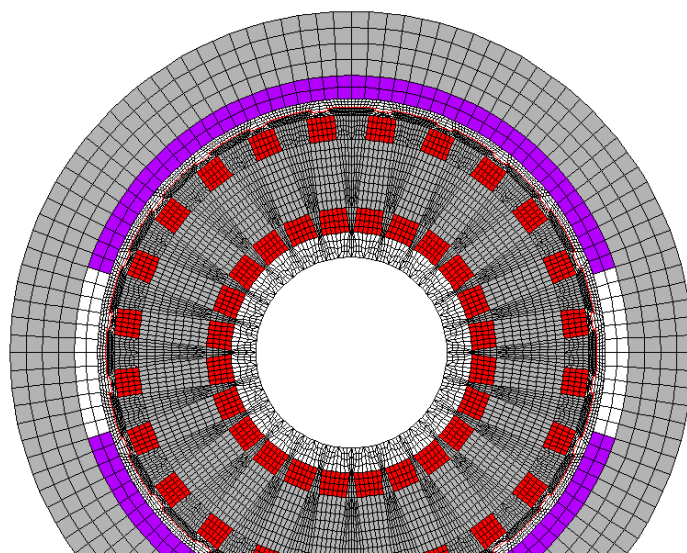
где  $k_\sigma$  – коэффициент рассеяния потока магнитов, можно определить размер зазора  $\delta$ , при котором создаётся принятое значение индукции в зазоре  $B_\delta$ , если приравнять с некоторым коэффициентом запаса  $K_{зап}$  ( $K_{зап} = 1,1 \div 1,15$ ) МДС магнитов и МДС обмотки

$$H_{CB} l_m = K_{зап} \frac{m\sqrt{2}}{\pi r} w_\phi k_{об} I_H, \quad (4.7)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $H_{CB}$  – коэрцитивная сила материала постоянного магнита на кривой размагничивания по индукции, определённая для заданной рабочей температуры, А/м.

Для уменьшения внешнего диаметра, момента инерции и массы внешнего ротора и машины в целом толщину его стенки следует выбирать минимальной. В связи с этим в (4.5) может оказаться целесообразной подстановка в знаменатель значений  $B_\delta$  до 2,0-2,1 Тл.

Результаты проектирования масштабной модели генератора, обращённая конструкция с внутренним статором и внешним ротором, предназначенного для автономного блока преобразования энергии, проведённого по настоящей методике, представлены в табл. 4.2 (приведены результаты одного из нескольких выполненных проектов).



**Рис. 4.12. Сеточная модель генератора с кольцевой обмоткой на внутреннем статоре, обращённая конструкция**

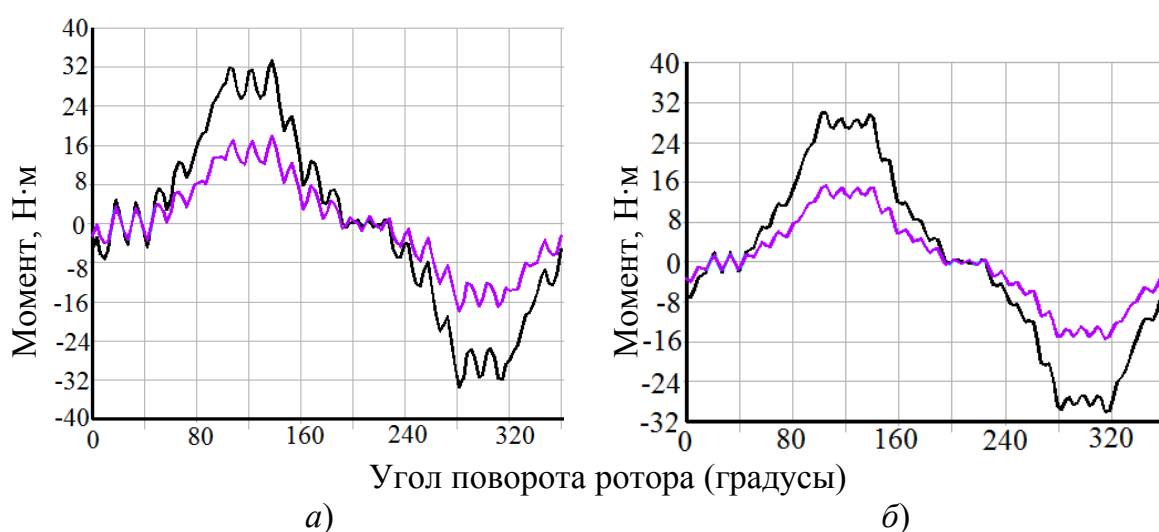
*Таблица 4.2.*

**Результаты проектировочного расчёта статора с обмоткой**

№ п.п.	Наименование параметра, ед.изм.	Обозначение	Величина
1	Номинальный (потребный) момент на валу, Н·м	$M$	20,0
2	Отношение активной длины к диаметру окружности якоря	$\lambda$	1,11
3	Линейная нагрузка, А/м	$A$	21000
4	Индукция в зазоре под полюсом, Тл	$B_{\delta}$	0,36
5	Число пазов (зубцов) магнитопровода якоря	$Z$	24
6	Число витков в фазе	$w_{\phi}$	64
7	Диаметр магнитопровода статора, м	$D$	0,180
8	Число витков в секции	$w_{\kappa}$	8
9	Провод ПММ, размеры сечения, мм	$a_{\text{пр}} \times b_{\text{пр}}$	6,7x0,9
10	Радиальный размер ярма статора, мм	$h_{\text{я}}$	24,5
11	Плотность тока в обмотке, А/мм <sup>2</sup>	$j$	8
12	Номинальный ток фазы, А	$I_{\text{н}}$	48
13	МДС обмотки, А	$F_{\text{обм}}$	3110
14	Коэрцитивная сила (сплав КС-25 ДЦ, ГОСТ 21559-76), А/мм	$H_{\text{CB}}$	680
15	Длина магнита в направлении намагничивания, мм	$l_{\text{м}}$	8,5
16	Воздушный зазор, мм	$\delta$	3,0
17	Наружный диаметр (внешнего ротора), мм	$D_{\text{р}}$	243

Методика проектирования проверена на сеточной модели (рис. 4.12), синтезированной в программной среде ANSYS/APDL. Модель позволяет оперативно изменять геометрические параметры осевого сечения и обмоточные данные. Её расчётная область охватывает также цилиндрическое пространство внутри зубцовой зоны с нерабочими сторонами катушек.

Характеристики поля, рассчитанного по модели, использовались для определения электромагнитного момента в виде статических характеристик на периоде изменения, при различных значениях плотности тока, при произвольной начальной фазе фазных токов (рис. 4.13, *a*). Характеристики (аналог угловых, но в них присутствуют составляющие момента, обусловленные зубчатостью статора) построены при отличающемся в два раза значении плотности тока в обмотке,  $8 \text{ А/мм}^2$  и  $4 \text{ А/мм}^2$ . Из первой можно определить, что при кратности максимального момента 1,7 машина развивает мощность до 9,5 кВт. При этом достигается плотное, в отличие от лобовых частей барабанной обмотки, прилегание катушек к магнитопроводу практически по всему их периметру, что существенно улучшает передачу тепла от обмотки на магнитопровод, снижая вероятность локального перегрева отдельных частей изоляции катушек (как правило, изоляции лобовых частей).



**Рис. 4.13. Угловые (статические) характеристики машины при  $Z = 24$  (а) и  $Z = 30$  (б) пазах обмотки якоря, при той же МДС**

Подавление влияния зубцовых гармоник обеспечивается подбором длины полюсной дуги  $\alpha_\delta$  коррекцией её в пределах одного зубцового деления статора, максимальным, по условию укладки проводников, сокращением относительной, по отношению к зазору, ширины открытия паза увеличением числа пазов. Увеличение их с 24 до 30 в машине с параметрами по табл. 4.2, при той же МДС, позволяет снизить амплитуду зубцовых гармоник в несколько раз (рис. 4.12, б, размеры пазов уменьшены под размещение шести проводов сечением 6,0x1,0 мм в каждом пазу). В большинстве ситуаций практического применения вынужденные колебания ротора, обусловленные знакопеременными моментами от действия зубцовых гармоник, поглощаются приводом при работе на номинальных оборотах и оказывают лишь кратковременное влияние в процессе пуска.

Максимальный момент и его кратность определяются из уравнения для амплитуды мощности машины по угловой характеристике и синхронной частоте  $\Omega$  [103],

$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi n}{60}, \quad (4.8)$$

$$K_M = \frac{m U_H E_\Phi}{\Omega X_d} \frac{1}{M_{\text{нагр}}}, \quad (4.9)$$

где  $X_d$  – полное индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря, Ом, обусловленное потокоцеплением через зазор и потокоцеплением рассеяния. Последнее учитывается введением увеличивающего коэффициента  $k_{\text{сп}}$ , найденного по известным из теории проектирования уравнениям для проводимости пазового рассеяния. Тогда

$$X_d = \frac{1}{2} \pi^2 f k_{\text{об}}^2 w_\Phi^2 \mu_0 \frac{\lambda(D + l_M + \delta)^2}{\delta + l_M} \frac{1}{p} k_{\text{сп}} \quad (4.10)$$

$$\Omega X_d = \pi^3 f^2 k_{\text{об}}^2 w_\Phi^2 \mu_0 \frac{\lambda(D + l_M + \delta)^2}{\delta + l_M} \frac{1}{p} k_{\text{сп}} \quad (4.11)$$

Если найденное по (4.9) значение кратности максимального момента меньше рекомендуемых стандартных пределов,  $K_m < 1,65$ , следует уменьшить число витков фазы, перейдя к проводу большего сечения.

Были выполнены многочисленные поверочные расчёты машин с кольцевой обмоткой и сопоставление их с экспериментальными и расчётными (в пакете Motor-CAD) результатами классических аналогов с барабанной обмоткой.

Расчёты показали, что в исполнении с зубчатым магнитопроводом, последние имеют однозначное преимущество по удельным моменту и мощности, поскольку альтернативный вариант требует отведения дополнительного обмоточного пространства под нерабочие стороны катушек кольцевой обмотки.

Несмотря на это, в мощных высоковольтных генераторах конструкция с кольцевой обмоткой является более надёжной вследствие высокой механической прочности при воздействии ударных токов короткого замыкания и меньшей вероятности междофазных замыканий, благодаря исключению размещения проводов разных фаз в одних и тех же пазах. При этом установка охладителей под лобовыми частями и в области нерабочих сторон катушек позволяет максимально сократить пути отведения тепловой мощности, повысить плотность тока в проводах в 1,5-1,8 раза. При несколько большей кратности максимальной мощности и момента у классической конструкции (1,9 против 1,75 в рассчитанных вариантах) удалось практически уравнивать энергетические характеристики обоих исполнений.

В микромашинах с гладким якорем (рис.4.8) применение кольцевой обмотки позволяет получить ряд полезных конструктивных и технологических качеств:

- повышается надёжность крепления катушечных сторон на поверхности сердечника и значительно сокращается длина лобовых частей;

- упрощаются технология изготовления и подготовка к серийному производству за счёт возможности изготовления статора на готовом промыш-

ленном оборудовании, используемом для намотки тороидальных трансформаторов и дросселей.

Уже при естественном охлаждении в таких микромашинах удаётся обеспечить приблизительно одинаковые моментные характеристики, что и в машине с барабанной обмоткой, за счёт большей плотности тока в проводах, допускаемой, благодаря лучшему теплоотводу и фактическому отсутствию лобовых частей.

Возможная область применения магнитоэлектрических генераторов с кольцевой обмоткой, перед традиционными с барабанной обмоткой ограничена высокооборотным приводом с двухполюсной обмоткой якоря с развитым диаметром, при интенсивном её охлаждении внешним хладагентом, а также в микромашинах с гладким якорем. По технологическим причинам, а также по условию достижения существенного преимущества перед аналогами с барабанной обмоткой, относительная, по отношению к диаметру рашотки длина воздушного зазора  $l_8/D$  спроектированной машины не должна превышать значения 0,8-1,0.

При использовании кольцевой обмотки, становится возможной конструктивная реализация генераторов с регулированием потока возбуждения подмагничиванием магнитопровода, без какого-либо усложнения его геометрии под обмотку намагничивания [105-107].

#### **4.4 Вывод к главе 4**

Выбор и применение решений, отличающихся от традиционных, в части конструкции электромеханического преобразователя для привода ИМ СУЗ, в рассмотренном в работе случае, позволяет улучшить его основные характеристики. А именно: расширить функциональные возможности, упростить конструкцию механической передачи, обеспечить активное воздействие на скорость опускания РО для точной её настройки.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проделанной работы, посвящённой разработке и исследованию электромеханических устройств для привода регулирующих органов ядерных энергетических установок, решены следующие важные задачи:

1) Проведён анализ существующих конструкций электроприводов СУЗ, на его основании определён состав устройств электропривода с расширенными возможностями, позволяющими наиболее гибко осуществлять силовое воздействие на регулирующий орган с целью обеспечения его движения по заданному закону.

2) Выявлены перспективные конструкции электромеханических преобразователей, состав которых подтверждён патентами на изобретения, использование которых обеспечивает более широкие возможности по обеспечению заданного закона движения регулирующего органа при обесточивании привода СУЗ в режиме аварийной защиты; в частности, предложена концептуальная схема электромеханического преобразователя, состоящего из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, обеспечивающая лучшие энергетические показатели и обладающая более широкими возможностями при настройке режима торможения РО за счёт электромагнитного разделения функций двигателя и генератора в приводе ИМ СУЗ;

3) Для каждого из устройств: двигателя и генератора, обеспечивающих выполнение разделённых функций в приводах КГ и АЗ, разработаны методики проектирования и предложено математическое описание и специальное ПО, позволяющее выполнять проектирование, моделирование и численный анализ с использованием расширенных возможностей современной вычислительной техники и пакетов прикладных программ;

4) Проведены численные и натурные исследования компонентов электромеханического преобразователя с разделением функций двигателя и генератора (тормоза) в одном приводе ИМ СУЗ;

5) На основании проведённых исследований подтверждена достоверность разработанных методик проектирования и численного анализа двигателя и генератора составляющих основу конструкции перспективного электромеханического преобразователя для привода ИМ СУЗ;

6) Предложены технические решения, в том числе одно из них на уровне изобретения, которые позволяют расширить область применения электромеханических преобразователей в приводах КГ и АЗ, упростить кинематическую схему этих приводов и обеспечить дополнительные возможности по настройке заданной скорости опускания РО в режиме АЗ.

После испытаний изготовленных образцов компоненты электромеханического преобразователя вошли в комплект поставочных изделий для ИМ СУЗ промышленной ЯЭУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интернет-ресурс [https://www.ng.ru/energy/2021-12-24/08\\_8335\\_energ3.html](https://www.ng.ru/energy/2021-12-24/08_8335_energ3.html)
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 – М.: Ростехнадзор. – 2007. – 26 с.
3. Исполнительные механизмы органов управления и защиты для натриевых реакторов на быстрых нейтронах. Под ред. Ф.М. Митенкова / Ф.М. Митенков, И.И. Жучков, Б.И. Зайцев, И.А. Подтележников – М.: Атомиздат, 1980, 176с.
4. Электроприводы регулирующих органов ядерных реакторов: Основы проектирования / Г.П. Юркевич, Л.М. Мерлин, Г.И. Курахтанов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 240с.
5. ГОСТ 17137-87. Системы управления и защиты ядерных реакторов. Термины и определения. – Стандартиформ, 2005.
6. Шульц М.А. Регулирование энергетических ядерных реакторов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
7. Карпов Р.Н., Масленок Б.Л., Цыганко, О.Л. Приводы регулирующих органов судовых энергетических реакторов. Л.: Судостроение, 1965, 252с.
8. Масленок Б.А., Воскобойников В.В. Типовые конструкции механизмов управления для энергетических реакторов с водой под давлением – Атомная техника за рубежом, 1973, №12.
9. Бамдас, А.М. Исполнительные электродвигатели и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов / А.М. Бамдас, А.И. Леонтьев, Е.Г. Титов, А.И. Юрченко – М.: Атомиздат, 1971, 237с.
10. Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок Б.А. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов / М.: Энергоатомиздат, 1987, 232 с.
11. Юркевич, Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. Под ред. акад. РАН Н.С. Хлопкина / М.: ЭЛЕКС–КМ. 2001, 344 с.

12. Ратмиров В.А., Ивоботенко Б.А. Шаговые двигатели систем автоматического управления. М.: Госэнергоиздат, 1962.
13. Чиликин М.Г., Ивоботенко Б.А. Современное состояние и перспективы дискретного привода с шаговыми двигателями. – Труды МЭИ, 1966, вып. LXVI (66), ч.1.
14. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями /под ред. М.Г.Чиликина. М.: Энергия, 1971, 624с.
15. Лабзин, М.Д. Судовые электроприводы с шаговыми двигателями. Л.: Судостроение, 1971, 280с.
16. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники / Ю.К. Розанов – М.: Энергоатомиздат, 1992, 296 с.
17. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин – М.: Техносфера, 2005, 632 с.
18. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: Учебник / Г.С. Зиновьев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000, ч.2, 197 с.
19. Липай, Б.Р. Электромеханические системы / Б.Р. Липай, А.Н. Соломин, П.А.Тыричев – М.: Издательский дом МЭИ, 2011, 351 с.
20. Фрейден, Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
21. Смирнов, А.Ю. Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов систем управления и защиты ядерных реакторов // А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов – Изв. ВУЗов. Электромеханика. 2016 №5 (47), с.25-30.
22. Клоков, Б.К. Расчёт электромагнитного тягового усилия в линейном двигателе возвратно-поступательного движения/ Б.К. Клоков, В.И. Цуканов Д.И. Ковган – Электричество, 1989, №9.
23. Цуканов, В.И. Математическое моделирование электромеханического переходного процесса линейного шагового двигателя / В.И. Цуканов, Н.А. Серихин – Электричество, 1992, №12

24. Смирнов, А.Ю. Применение сеточных моделей для исследования линейного шагового электропривода вертикального перемещения регулирующего органа // А.Ю. Смирнов, Е.А. Ершова, Т.Н. Уснунц-Кригер – Электричество, 2016, №11, с. 30-34.

25. Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Линева А.Ф. Электромагнитные линейные приводы регулирующих стержней ядерных реакторов. Атомная техника за рубежом, 1975, №5.

26. Смирнов, А.Ю. Разработка подтормаживающего устройства для шагового привода исполнительных механизмов вертикального перемещения // А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов – Электричество, 2022, №5, с. 43-50.

27. Балагуров, В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев – М.: Электрические генераторы с постоянными магнитами – М.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.

28. Вавилов, В.Е. Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук / В.Е. Вавилов – Уфа, Изд-во УГАТУ, 2019, 40с.

29. Исмагилов, Ф.Р. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайрулин, В.Е. Вавилов – М.: Машиностроение, 2014, 262с.

30. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А.Н. Ледовский – М.: Энергоатомиздат, 1985, 169 с.

31. Авт. свидетельство №350104 СССР. Электрический шаговый двигатель / С.Д. Истомин, Е.Г. Титов, В.С. Пронин, И.И. Жучков / Открытия. Изобретения. 1972, №26.

32. Авт. свидетельство №738061 СССР. Электрический шаговый двигатель / С.Д. Истомин, Е.Г. Титов и С.Л. Шашкин / Открытия. Изобретения.

33. Авт. свидетельство №1412552 СССР, МПК<sup>7</sup> H02P 8/00, H02K 37/00. Шаговый электропривод для вертикального перемещения / С.Д. Истомин, С.Л. Шашкин, А.Ю. Смирнов. Оpubл.20.11.99, Бюл. №32 (II ч.).

34. Авт. Свидетельство №1454208 СССР, МПК<sup>7</sup> H02K 37/00. Шаговый двигатель / А.Ю. Смирнов, С.Д. Истомин, С.Л. Шашкин, М.А. Москаленко. Опубл.20.11.99 , Бюл. №32 (II ч.).
35. Смирнов А.Ю. Подразделенные обмотки и их применение в электрических машинах переменного тока // А.Ю. Смирнов – Электричество 1995, №7, с.24-28.
36. Смирнов А.Ю. Совершенствование индукторной машины для исполнительных механизмов вертикального перемещения // А.Ю. Смирнов – Электротехника, 2003, №10, с. 10-15.
37. Попов, В.И. Трёхфазно-однофазные обмотки для совмещённых электрических машин // В.И. Попов – Электричество, 1992, №4.
38. Смирнов, А.Ю. Применение совмещённых обмоток в одноимённо-полюсных индукторных двигателях // А.Ю. Смирнов – Электричество, 2019, №9, с.61-65.
39. Пат. №2410519 РФ, МПК<sup>7</sup> H02K 19/24, H02K 19/22, H02K 1/06. Реактивная машина / А.Ю. Смирнов, В.М. Крюков, Р.П. Темнов; заявл.25.01.2010, опубл. 20.02.2011, Бюл. №5.
40. Пат. №2533177 РФ, МПК<sup>7</sup> H02K 29/00, H02K 7/00. Электропривод для вертикального перемещения регулирующего органа / А.Ю. Смирнов, В.И. Будцин, Р.П. Темнов.
41. Fukami, T. A Multipole Synchronous Machine With Nonoverlapping Concentrated Armature and Field Windings on the Stator / T. Fukami, Y. Matsuura, K. Matsuura and oth. – IEEE Trans. On Industrial Electronic, 2012, No 59 (6) p.p. 2583-2591.
42. Балагуров, В.А. Электрические машины с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев, А.Н. Ларионов – М.Л.: Энергия, 1964, 480с.
43. Арменский, Е.В. Электрические микромашины: Учеб. пособие для студ. электротехн. спец. Вузов / Е.В. Арменский, Г.Б. Фалк – М.: Высшая школа, 1985, 231 с.

44. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут – М.: Высшая школа, 1985, 255 с.
45. Пат. №2207575 РФ, МПК<sup>7</sup> G01P 3/488, G21B 7/30, G01B 7/14. Датчик положения зуба зубчатого колеса/ Е.Н. Тарасов и др., опубл. 17.06.2003.
46. Смирнов, А.Ю. Синхронные машины для перемещения регулирующих органов ядерных реакторов и методы проверки их состояния / А.Ю.Смирнов, П.А.Доронин, А.Ю.Зимин, Э.А.Смирнов // Изв. ВУЗов. Электромеханика – 2014 №6, С. 22-27.
47. Смирнов А.Ю. Силовые электрические машины систем автоматизации энергетических установок. Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук – М.-Нижний Новгород: МЭИ (защита), 2007, 287 с.
48. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П.Копылов, Ф.А.Горяинов, Б.К.Клоков и др. Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980, 496 с.
49. Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д.Гольдберг, Я.С.Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984, 431с.
50. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалёв и др.; под ред. В.М.Петрова и А.Э. Кравчика – М.: Энергия, 1980, 488 с.
51. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов – М.: Энергия, 1978, 480 с.
52. Электротехнический справочник: В 3 т. / Под ред. профессоров МЭИ. – М.: Энергоатомиздат, т.2. Электротехнические изделия и устройства, 1986, 712 с.
53. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989, Т.2, 688с.
54. Попов, Д.А. Проектирование шаговых электродвигателей (ШД) методом синтеза // Д.А. Попов, К.В. Капелько – Труды третьей всесоюзной

конференции по бесконтактным электрическим машинам, Рига.: Зинатне, 1966, с. 266-270.

55. Смирнов, А.Ю. Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода. //А.Ю.Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер – Электричество, 2012, №5, с. 50-56.

56. Смирнов, А.Ю. Вопросы проектирования двигателей для синхронного привода систем автоматизации ядерных энергетических установок // А.Ю. Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер – Электротехника, 2013, №11, с.28-32.

57. Смирнов, А.Ю. Проектирование одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе // А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин – Электричество, 2015, №2, с.54-59.

58. Huang, S. A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines // S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and oth. – IEEE Trans. On Industry Appl. 1998, Jan/Feb., vol. 34, No 1, pp. 116-121.

59. Honsinger, V.B. Sizing equations for electrical machinery // V.B. Honsinger – IEEE Trans. On Energy Conv. 1987, March, vol. EC-2, No 1, pp. 92-97.

60. Cheng, M. Design and analysis of a new double salient permanent magnet motots // M. Cheng, K.T. Chau and C.C. Chan – IEEE Trans. On Magnetics. 2001, Jul., vol.37, No 4, pp. 3012-3020.

61. Lipo, T.A. Introduction to AC machine design / T.A. Lipo – IEEE Press, Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2017.

62. Honsinger, V.B. Sizing equations for electrical machinery // V.B. Honsinger – IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. EC-2, No 1, pp. 116-121.

63. Chen, J.T. Optimal combination of stator and rotor pole numbers in flux-switching PM brushless ac machines // J.T. Chen, Z.Q. Zhu, A.S. Thomas and oth., in Proc. Int. Conf. Elec. Math. Syst., 2008, pp. 2905-2910.

64. Wang, Y. Comparison and study of 6/5 and 12/10-pole permanent magnet flux-switching motors considering flux-weakening capability // Y. Wang, Z.W.



Huang, J.X. Shen and oth., in Proc. Int. Conf. Elec. Math. Syst., 2008, pp. 3262-3265.

65. Sebastian, T. Modeling of permanent magnet synchronous motors // T. Sebastian, G.R. Slemon and M.A. Rahman – IEEE Trans. On Magnetics. 1986, Sept., vol. MAG-22, No 5, pp. 3012-3020.

66. Hendershot, J.R. Design of brushless permanent-magnet machines / J.R. Hendershot and T.J.E. Miller. Motor design books, 2010.

67. Nasar, S.A. Permanent magnet, reluctance and self-synchronous motors / S.A. Nasar, I. Boldea, L.E. Unnewehr – CRC Press, Boca Ration, 1993.

68. Cros, J. Synthesis of high-performance PM motors with concentrated windings // J. Cros, P. Viarouge – IEEE Trans. On Energy Conv. 2002, June., vol.17, No 2, pp. 248-253.

69. Gieras, J.C. Permanent magnet motor technology – Design and applications / J.C. Gieras and M. Wing – Marcel Dekker, New York, 1997.

70. Hanselman, D.C. Brushless permanent-magnet motor design / D.C. Hanselman – McGraw Hill, New York, 1994.

71. Бинс, К. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. Пер. с англ. – М.: Энергия, 1970, 376с.

72. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский – Л.: Энергоатомиздат, 1983, 256 с.

73. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах /А.В.Иванов-Смоленский – М.: Высшая школа, 1989, 312 с.

74. Ulaby, F.T. Fundamentals of applied electromagnetics / F.T. Ulaby – US, NJ, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.

75. Nagel, N.J. Modeling of a saturated switched reluctance motor using an operating point analysis and the unsaturated torque equation // J.N. Nagel, R.D. Lorenz – IEEE Trans. On Industry Appl. 2000, May/June., vol. 36, No 3, pp. 714-722.

76. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах/ А.В.Иванов-Смоленский, Ю.И.Абрамкин, А.И.Власов, В.А.Кузнецов; Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986, 216с.

77. Фисенко, В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. Учебное пособие по курсу «Электромагнитные расчеты», по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / В.Г. Фисенко – М.: Изд-во МЭИ, 2002, 44 с.

78. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари – М.: Мир, 1986, 229 с.

79. Зинкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зинкевич – М.: Мир, 1975, 115 с.

80. Смирнов, А.Ю. Применение сеточных моделей для исследования электропривода на базе индукторной машины // А.Ю.Смирнов – Электротехника, 2009, №2, с. 28-32.

81. Zaïm, M.E. Application of a Non Linear complex finite element method to the design of solid rotor reluctance machines // M.E. Zaïm – IEEE Trans. On Magnetics. 1998, Sep., vol. 34, No 5, pp. 3592-3629.

82. Silvester, P. Finite elements for electrical engineers / P. Silvester, R.L. Ferrari – Cambridge, Cambridge University Press, 1988.

83. Alberti, L. Finite-element analysis of electrical machines for sensorless drives with high-frequency signal injection / L. Alberti, N. Bianchi, M. Morandin and J. Gyselinck – IEEE Trans. On Industry Appl. 2014, May., vol. 50, No 3, pp. 1871-1879.

84. Bottesi, O. Finite-element signal simulation of electromagnetic devices considering eddy current in the laminations / O. Bottesi, L. Alberti, R.V. Sabariego and J. Gyselinck – IEEE Trans. On Magn. 2017, May., vol. 53, No 5, pp. 1-8.

85. Chabu, I.E. A new design technique based on a suitable choice of rotor geometrical parameters to maximize torque and power factor in synchronous reluc-

tance motors: Part II - Finite-element analysis and measurements / I.E. Chabu, V.S. Silva and oth. – IEEE Trans. On Energy Conv. 1999, Sept., vol. 14, No 3, pp. 605-609.

86. Yan, J. Magnetic field analysis of a novel flux switching permanent magnet wind generator with 3-D FEM // J. Yan, Y. Lin, H. Huang and oth. – in Proc. Int. Conf. PEDS, 2009, pp. 332-225.

87. Копылов, И.П. Электромеханические преобразователи энергии / И.П. Копылов – М.: Энергия, 1973, 400 с.

88. Копылов, И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчётах (Электрические машины) / И.П. Копылов – М.: Высшая школа, 1980, 256 с.

89. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов – М.: Высшая школа, 1987, 248 с.

90. Копылов, И.П. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях / И.П. Копылов, В.П. Фрумин – М.: Энергоатомиздат, 1986, 168с.

91. Пронин, М.В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчёт, применение). Под ред. Крутякова Е.А. / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов – Санкт-Петербург, Силовые машины, Электро-сила, 2004, 252 с.

92. Смирнов, А.Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями / А.Ю. Смирнов – М.: Инфра-М, 2021, 200 с.

93. Постников, И.М. Обобщённая теория и переходные процессы электрических машин / И.М. Постников – М.: Высшая школа, 1975, 319с.

94. Уснунц-Кригер, Т.Н. Повышение качества функционирования электротехнического комплекса СУЗ ядерных энергетических установок. Автореферат на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016, 20 с.

95. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А.Ивоботенко, Н.Ф.Ильинский, И.П.Копылов – М.: Энергия, 1975, 184 с.
96. Павлейно, М.А. Моделирование работы электрических схем в Simulink. Применение операционных усилителей для фильтрации, усиления и генерации сигналов / М.А. Павлейно, В.М. Ромоданов, Ю.Ф. Сафронова – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, 2007.
97. Голубева, Л.Л. Компьютерная математика. Пакет имитационного моделирования Simulink: лаб. Практикум / Л.Л. Голубева, А.Э. Малевич, Н.Л. Щеглова – Минск: БГУ, 2010, 151 с.
98. Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов – М.: ДМК-Прогресс, 2008, 784с.
99. Смирнов, А.Ю. Уточнение моделей расчёта момента при проектировании индукторных двигателей // А.Ю. Смирнов, Е.Н. Александрова, А.Ю. Зимин – Электричество, 2020, №11, с. 54-59.
100. Попов В.И., Петров Ю.Н. Трёхфазные, специальные и совмещённые обмотки электрических машин переменного тока (основы теории и расчётов): Монография. Нижний Новгород. Изд-во “ВИПИ”, 1995г., 339с.
101. Жерве, Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989, 400с.
102. Смирнов, А.Ю. Вопросы классификации бесконтактных синхронных машин // А.Ю. Смирнов – Электротехника, 2012, №2.
103. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов / А.В.Иванов-Смоленский – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
104. Смирнов, А.Ю. Исследование влияния формы импульсов на процесс пуска шаговых двигателей в шаговом приводе с инвертором тока / А.Ю.Смирнов, А.О. Кашканов, Т.Н. Уснунц-Кригер // Изв. ВУЗов. Электромеханика – 2019 №2 (62), С. 29-36.
105. Смирнов, А.Ю. Проектирование магнитоэлектрических машин с кольцевой обмоткой якоря // А.Ю. Смирнов – Электричество, 2021, №2, с.60-65.

106. Смирнов, А.Ю. Опыт проектирования магнитоэлектрических машин с кольцевой обмоткой якоря // А.Ю. Смирнов – Электротехника, 2021, №12, с.13-19.

107. Smirnov, A.Y. Experience in designing magneto electric machines with ring armature winding / A.Y. Smirnov – Russian Electrical Engineering, 2021, vol.92, No12, pp. 732-737.

## Перечень сокращений

PM	- permanent magnet
A3	- аварийная защита
ИМ	- исполнительный механизм
КГ	- компенсирующая группа
КПД	- коэффициент полезного действия
МДС	- магнитодвижущая сила
МКЭ	- метод конечных элементов
ПО	- программное обеспечение
РО	- регулирующий орган
СУЗ	- система управления и защиты (ядерного реактора)
ШД	- шаговый двигатель
ШИМ	- широтно-импульсный модулятор
ЭДС	- электродвижущая сила
ЭМП	- электромеханический преобразователь
ЭТК	- электротехнический комплекс
ЯР	- ядерный реактор
ЯЭУ	- ядерная энергетическая установка

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Проектировочный расчёт электродвигателя привода СУЗ

Двигатель содержит зубчатый статор с расположенной на нём многофазной (четырёхфазной) обмоткой и зубчатый ротор. В силу неизменности направления тока в фазах, эта же обмотка образует и поле возбуждения.

В расточку статора вставлена герметизирующая труба, отделяющая полость ротора от полости статора. Для уменьшения магнитного сопротивления в местах примыкания к статорным полюсам в герметизирующую трубу вварены магнитомягкие вставки из нержавеющей стали.

Ротор двигателя представляет собой зубчатый магнитопровод, выполненный из магнитомягкой стали. Число зубцов на роторе находится в определённом соответствии с числом зубцов на статоре, определяемом конструктивными соотношениями, приемлемыми для машин данного типа.

Результаты проектировочного расчёта двигателя выполненного в соответствии с пунктами методики табл. 2.2 представлены в табл. П.1.

Расчётная (проектировочная) схема двигателя и обозначения на ней представлены на рис. 2.1.

Таблица П.1

**Результаты проектировочного расчета двигателя**

Наименование параметра	Значение
1. Соотношение размеров «Длина/Диаметр» ротора	3,55
2. Число фаз обмотки статора	4
3. Число зубцов на статоре	8
4. Число полюсов обмотки якоря	4
5. Число зубцов на роторе	6
6. Обмоточный коэффициент	0,707
7. Относительная длина полюсных дуг зубцов статора	0,43
8. Линейная токовая нагрузка, А/м	18000
9. Индукция в зазоре, Тл	0,72
10. Диаметр расточки статора, м	0,095
11. Осевая длина пакета с учётом толщины нажимных листов, мм	355
12. Осевая длина ротора, мм	355
13. Ширина полюсных наконечников статора, мм	16
14. Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	4,0

Наименование параметра	Значение
15. Коэффициент насыщения	1,63
16. Площадь меди обмоточных проводов, мм <sup>2</sup>	136,8
17. Коэффициент заполнения паза медью катушек	0,70
18. Припуск на сборку магнитопровода, мм	0,1
19. Обмоточный провод (ТУ 16-505.489-78) с номинальными данными: - диаметр без изоляции, мм - площадь сечения проволоки, мм <sup>2</sup>	ПНЭД- имид 0,75 0,442
20. Диаметр изолированного провода, мм	0,804
21. Площадь, занятая проводами обмотки в пазу, мм <sup>2</sup>	308,0
22. Число витков катушек на одном зубце (полюсе) статора	309
23. Ток катушек, расположенных на одном зубце, А	1,767
24. МДС катушек одного зубца, А	1092
25. Общая толщина изоляции, мм	1,03
26. Высота полюсного наконечника, мм	5
27. Ширина зубца статора, мм	13,5
28. Толщина пазового клина, мм	1
29. Площадь, занимаемая изоляцией вне зависимости от высоты паза, мм <sup>2</sup> :	120,134
30. Площадь изоляции, линейно зависящей от высоты паза, мм	4,736
31. Коэффициенты квадратного уравнения для определения высоты паза	0,393 / 2,773 / -455,86
32. Высота паза и зубца статора, мм	30,7
33. Радиальный размер спинки статора, мм	7
34. Наружный диаметр статора, мм	185
35. Средний радиус закругления лобовых частей катушек, мм	19,9
36. Средняя длина витка, м	0,81
37. Активное сопротивление одной катушки при 20°C, Ом	9,9
38. Активное сопротивление фазы при 20°C, Ом	9,9
39. Активное сопротивление фазы обмотки при рабочей температуре, Ом	16,64
40. Воздушный зазор, мм	0,25
41. Диаметр ротора, мм	94,5
42. Ширина зубца ротора, мм	16,5



Наименование параметра	Значение
43. Высота зубца ротора, мм	11,5
44. Номинальный ток при параллельном включении катушек в фазах, действующее значение, А	3,53
45. Амплитуда тока при треугольной форме импульсов, А	6,12
46. Проводимость рассеяния магнитного потока по полюсным наконечникам, Гн	$1,047 \cdot 10^{-7}$
47. Проводимость пазового рассеяния (на один паз), Гн	$3,327 \cdot 10^{-7}$
48. Кривая намагничивания зубца статора	Рис. П.1.1
49. Кривая намагничивания ярма статора	Рис. П.1.2
50. Кривая намагничивания зубца и ярма	Рис. П.1.3
51. Кривая намагничивания полюсных наконечников статора	Рис. П.1.4
52. Кривая намагничивания полюса статора	Рис. П.1.5
53. Кривая намагничивания зубца ротора	Рис. П.1.6
54. Кривая намагничивания полюса статора и зубца ротора	Рис. П.1.7
55. Проводимость воздушного зазора под полюсом при совпадении осей зубцов с осью фазы, Гн	$2,9 \cdot 10^{-5}$
56. Амплитуда магнитного потока в зазоре, Вб	$7,915 \cdot 10^{-3}$
57. МДС зазора, А	819,1
58. Падение магнитного напряжения на ферромагнитных участках, А	603,9
59. Коэффициент насыщения, окончательно	1,726
60. Относительная длина полюсного деления ротора	199,0
61. Коэффициент уменьшения проводимости зазора под пазом ротора	0,048
62. Средний электромагнитный момент, обеспечиваемый катушками одной фазы на полупериоде изменения, Н·м	11,59
63. Динамический момент при одновременном возбуждении половины фаз, Н·м	23,18
Соответствие динамического момента требуемому значению	соответствует
64. Амплитуда индукции в зазоре, Тл	1,34
65. Амплитуда индуктивности фазы, Гн	1,478
66. Электромагнитная постоянная времени, максимальное значение, с	0,14
67. Минимальное значение индуктивности фазы, Гн	0,191

Наименование параметра	Значение
68. Электрические потери в меди, Вт	399,7
69. Момент инерции ротора кг·м <sup>2</sup>	0,012
70. Частота приемистости при идеальном холостом ходе, об/мин	317,5
71. Наибольшая частота перемагничивания магнитопровода статора, Гц	15
72. Номинальная частота вращения, об/мин	150
73. Масса спинки (ярма) магнитопровода статора, кг	10,6
74. Масса зубцов магнитопровода статора, кг	8,926
75. Магнитные потери в спинке (ярме), Вт	6,1
76. Масса полюсных наконечников, кг	1,772
77. Магнитные потери в зубцах статора: - на частоте приемистости, Вт - на наибольшей частоте вращения привода, Вт	66,55 14,842
78. Магнитные потери в полюсных наконечниках статора: - на частоте приемистости, Вт - на номинальной частоте вращения привода, Вт	13,21 2,95
79. Масса зубцов ротора, кг	3,153
80. Магнитные потери в роторе, Вт	0,082
81. Сумма магнитных потерь на номинальной частоте вращения привода, Вт	34,27
82. Длина статора с учётом вылета лобовых частей, мм	400
83. Полезная мощность на номинальной частоте, Вт	323,6
84. Электрический КПД на наибольшей частоте вращения привода	0,427
85. Постоянная Арнольда (расчет через электрические параметры), м <sup>2</sup> /Н	$1,555 \cdot 10^{-4}$
86. Постоянная Арнольда (расчет через механические параметры), м <sup>2</sup> /Н	$1,62 \cdot 10^{-4}$
87. Масса меди обмоточных проводов, кг	8,397
88. Общая масса ферромагнитных материалов статора и ротора, кг	32,847
89. Общая масса активных частей, кг	41,244
90. Удельная тепловая нагрузка от электрических потерь в обмотке, А <sup>2</sup> /(м·мм <sup>2</sup> ), при допустимой не более 1500-2000, для класса изоляции F	$1,24 \cdot 10^3$

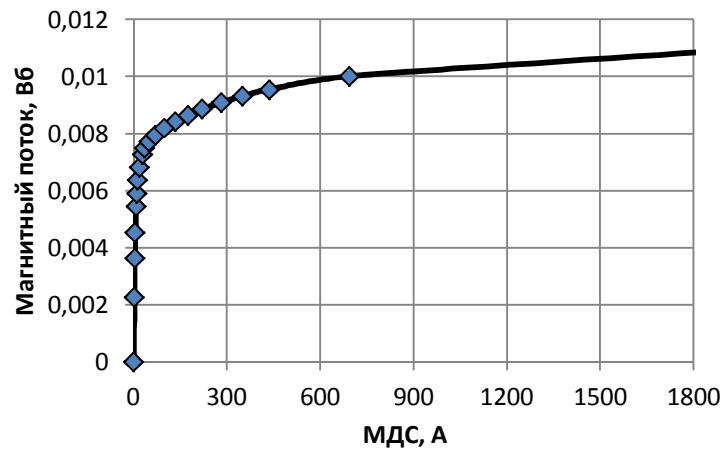


Рис. П.1.1. Кривая намагничивания зубца статора

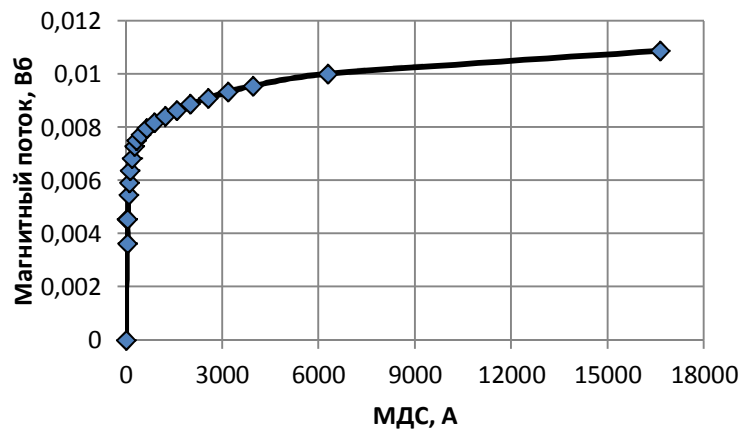


Рис. П.1.2. Кривая намагничивания ярма статора

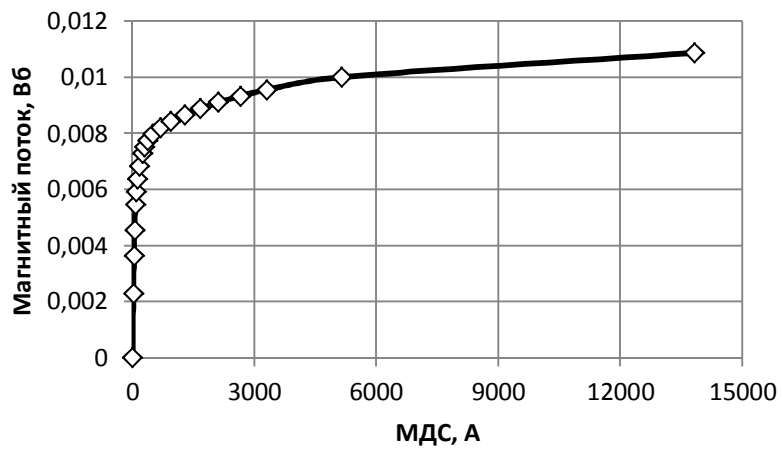


Рис. П.1.3 Кривая намагничивания зубцов и ярма

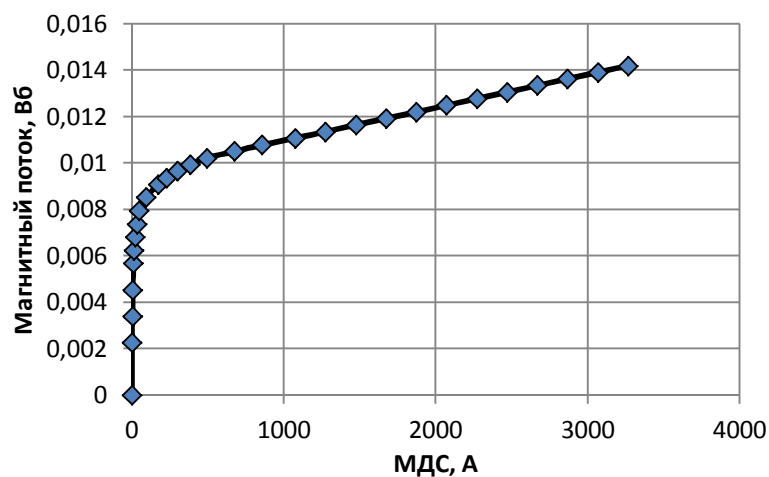


Рис. П.1.4 Кривая намагничивания полюсных наконечников статора

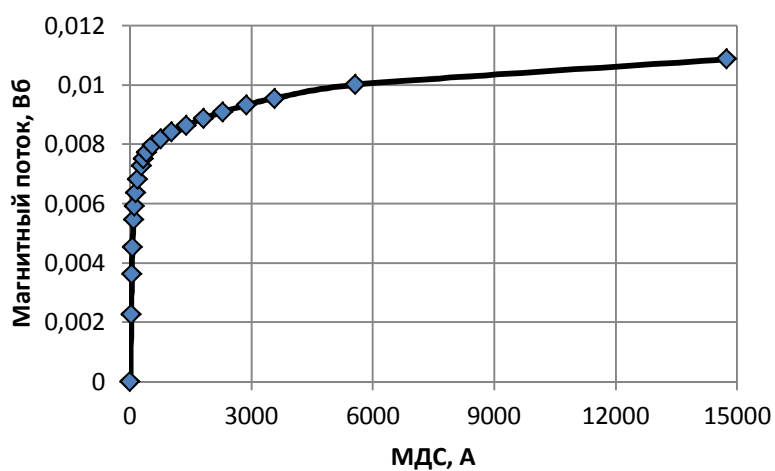


Рис. П.1.5 Кривая намагничивания полюса статора

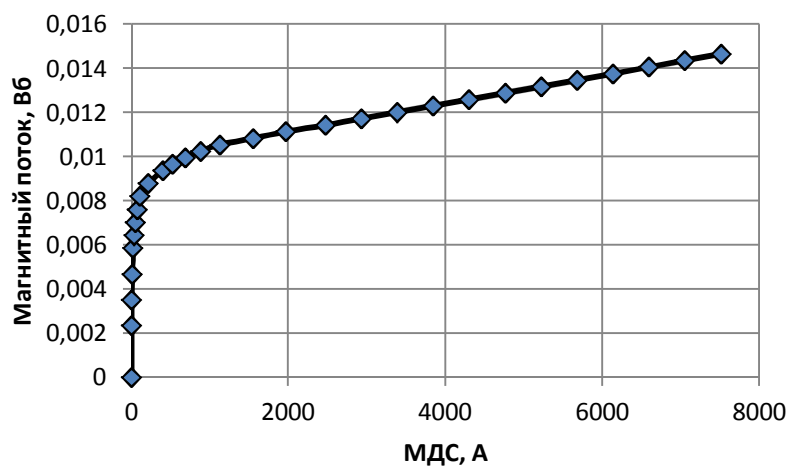


Рис. П.1.6 Кривая намагничивания зубцов ротора

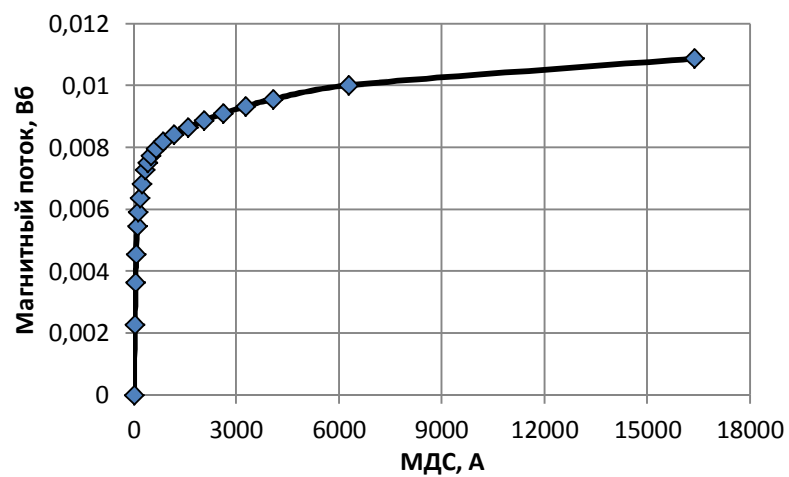


Рис. П.1.7 Кривая намагничивания полюса статора и зубца ротора

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### APDL-программы расчёта характеристик двигателя и генератора

#### П.2.1. Расчёт статических характеристик

```
/NOLIST
/NOPR

MOVE_NAME='INSIDE'
TORQUE_NAME='ROTOR'
  *DIM,WIND,CHAR,2,4,1, , ,
    WIND(1,1)='FAZA1'      ! компоненты из областей
    WIND(1,2)='FAZA1_'    ! _ знак верхнего слоя
    WIND(1,3)='FAZA1-'    ! - знак отрицательной плотности тока
    WIND(1,4)='FAZA1_-'
    WIND(2,1)='FAZA2'
    WIND(2,2)='FAZA2_'
    WIND(2,3)='FAZA2-'
    WIND(2,4)='FAZA2_-'

LSTATORA=.23
kkG=100/9.81*LSTATORA

S1=.10369E-3              ! площадь катушечной стороны нижнего слоя
S2=.10207E-3              ! площадь катушечной стороны верхнего слоя

Kzap=0.354      ! коэффициент заполнения паза медью =FILL

PI=3.141592654
Z=6
npoint=40
*DIM,REZULTS,TABLE,npoint+1,4,1, , , ! формирование массива - таблицы результатов
dangl=360/Z/npoint      ! приращение угла нагрузки

J=6.e6      ! действующее значение плотности тока в проводах обмотки, А/мм2
deltaJ=1.e6

*DO,n,1,1,1
I=(S1+S2)*Kzap/2*J ! действующая МДС катушечной стороны
Jm1=I/S1
Jm2=I/S2

*DO,k,1,2,1
  CMSEL,S,%WIND(k,1)%, ! присвоение тока областям обмотки
                        ! двух смежных фаз
  BFA,ALL,JS,0,0,Jm1,0
  CMSEL,S,%WIND(k,2)%,
  BFA,ALL,JS,0,0,Jm2,0
  CMSEL,S,%WIND(k,3)%,
  BFA,ALL,JS,0,0,-Jm1,0
```

```

CMSEL,S,%WIND(k,4)%,
BFA,ALL,JS,0,0,-Jm2,0
ALLSEL
*ENDDO

CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
CEINTF,0.25,AZ, , , , ,0.05
NSEL,ALL
ESEL,ALL
APLOT

TET=.0 ! Угол нагрузки

*DO,1,1,npoint+1,1 !начало цикла расчёта угловой характеристики

/PREP7

! Значения токов фаз
*IF,n,LT,1.5,THEN
RESULTS(1,0,1)=TET
*ENDIF

/SOLU

SOLVE

/POST1 ! запись результатов шага счёта в таблицу
TORQSUM,%TORQUE_NAME%
RESULTS(1,n,1)=TORQVW*LSTATORA*100/9.81 ! Момент кГс*см
/PREP7

! поворачиваем ротор
CEDELE,ALL
CSYS,1 !
AGEN, ,MOVE_NAME, , , ,dangl, , , ,1

CSYS,0
CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
CEINTF,0.25,AZ, , , , ,0.05
NSEL,ALL
ESEL,ALL
APLOT

/REPLOT
TET=TET+dangl

*ENDDO ! конец цикла расчёта угловой характеристики
J=J-deltaJ
! поворачиваем ротор
CEDELE,ALL
CSYS,1 !

```

```
AGEN, ,MOVE_NAME, , , , -dangl, , , , 1
```

```
CSYS,0
```

```
CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
```

```
CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
```

```
CEINTF,0.25,AZ, , , , , 0.05
```

```
NSEL,ALL
```

```
ESEL,ALL
```

```
APLOT
```

```
/REPLOT
```

```
*ENDDO
```

## П.2.2. Расчёт осциллограмм пуска ШД под нагрузкой из неподвижного состояния

```
/NOLIST
```

```
/NOPR
```

```
MOVE_NAME='INSIDE'
```

```
TORQUE_NAME='ROTOR'
```

```
*DIM,WIND,CHAR,2,4,1, , ,
```

```
WIND(1,1)='FAZA_1'
```

```
WIND(2,1)='FAZA_1_'
```

```
WIND(1,2)='FAZA_2'
```

```
WIND(2,2)='FAZA_2_'
```

```
WIND(1,3)='FAZA_3'
```

```
WIND(2,3)='FAZA_3_'
```

```
WIND(1,4)='FAZA_4'
```

```
WIND(2,4)='FAZA_4_'
```

```
LSTATORA=.23
```

```
kkG=100/9.81*LSTATORA
```

```
S=S1+S2 ! сторона сечения двух катушек
```

```
w=152
```

```
n=197
```

```
!
```

```
IMAX=9.5
```

```
! ток одной катушки (ветви) обмотки
```

```
*DIM,tok,TABLE,4,1,1, , , ! задание формы импульса тока
```

```
tok(1)=0,IMAX,IMAX,0
```

```
tok(1,0)=0,1.57,1.5708,PI
```

```
! определение времени счёта
```

```
dt=.002
```

```
! шаг счёта по времени
```

```
tc=60/(Z*n)
```

```
! с, время одного цикла
```

```
!
```

```
npoint=200
```

```
! число расчётных точек
```



```

f=1/tc          ! Гц, частота

J=.00105+.00136      ! момент инерции ротора
MN=0                ! кг*с*см - момент нагрузки от веса РО
MN=MN*.0981
mtr=3.43           ! Н*м

! Начальные значения переменных: время, угол и скорость
t=0.
angle=0            ! отсчитывается против часовой стрелки
v=0.0             ! относительно оси первой фазы (вертикальной)
ti=t

*DIM,REZULTS,TABLE,npoint,7,1,, ! формирование
массива - таблицы

! результатов расчёта
m=4
*DIM,I,,m

ALLSEL,ALL
ANTYPE,STATIC
TCURR=2*PI
*DO,1,1,npoint,1 !начало цикла запуска ШД

/PREP7
CEDELE,ALL
CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
CEINTF,0.25,AZ,,,,,0.05
NSSEL,ALL
ESEL,ALL
APLOT

fi=TCURR*ti/tc ! фазовое время для вычисления тока

! Значения токов фаз, вычисленные путём интерполяции

*DO,k,1,m,1
x=fi+TCURR/m*(k-1)
*IF,x,GT,TCURR,THEN
b=x
x=b-TCURR
*ENDIF
I(k)=tok(x)*w/S
CMSEL,S,%WIND(1,k)%, ! присвоение тока областям об-
мотки

BFA,ALL,JS,0,0,I(k),0
ALLSEL
CMSEL,S,%WIND(2,k)%,

```

```

BFA,ALL,JS,0,0,-I(k),0
ALLSEL
*ENDDO
/SOLU

SOLVE

/POST1 ! запись результатов шага счёта в таблицу
RESULTS(1,0,1)=t
TORQSUM,%TORQUE_NAME%
RESULTS(1,1,1)=TORQVW*kkG
b=0.
*IF,v,LT,0,THEN
b=mtr
*ENDIF
*IF,v,GT,0,THEN
b=-mtr
*ENDIF
*IF,v,EQ,0,THEN
b=0.
*ENDIF
acceler=(TORQVW*LSTATORA+b-MN)/J
v=v+acceler*dt ! рад/с
RESULTS(1,2,1)=v*30/PI ! об/мин
angle=angle+v*dt*180/PI ! град
RESULTS(1,3,1)=angle
RESULTS(1,4,1)=I(1)/1000000
RESULTS(1,5,1)=I(2)/1000000
RESULTS(1,6,1)=I(3)/1000000
RESULTS(1,7,1)=I(4)/1000000

/PREP7 ! поворачиваем ротор
CSYS,1 !
AGEN, ,MOVE_NAME, , , ,v*dt*180/PI, , , ,1
CSYS,0
/REPLOT

t=t+dt
ti=ti+dt
*IF,ti,GT,tc,THEN
b=ti
ti=b-tc
*ENDIF

*ENDDO ! конец цикла запуска ШД

```

### П.2.3. Расчёт угловых характеристик генератора

```

/NOLIST

```

/NOPR

```
MOVE_NAME='INSIDE'  
TORQUE_NAME='ROTOR'  
  *DIM,WIND,CHAR,3,2,1, , ,  
    WIND(1,1)='FAZA1'      ! компоненты из областей  
    WIND(1,2)='FAZA1-'    !  
    WIND(2,1)='FAZA2'      ! - знак отрицательной плотности тока  
    WIND(2,2)='FAZA2-'  
    WIND(3,1)='FAZA3'  
    WIND(3,2)='FAZA3-'
```

LSTATORA=.008

S1=0.26434E-4 ! площадь катушечной стороны

Kzap=0.4 ! коэффициент заполнения паза медью =FILL

PI=3.141592654

FI=90 ! Фаза тока

npoint=20

```
*DIM,REZULTS,TABLE,npoint+1,4,1, , , ! формирование массива - таблицы результатов  
dangl=360/p/npoint      ! приращение угла нагрузки
```

J=6.e6 ! действующее значение плотности тока в проводах обмотки, А/мм<sup>2</sup>  
deltaJ=1.e6

```
*DO,n,1,1,1
```

I= S1\* Kzap /2\*J ! действующая МДС катушечной стороны

Fm=1.414214\*I

Jm1= Fm/S1

```
*DO,k,1,3,1
```

CMSEL,S,%WIND(k,1)%, ! присвоение тока областям обмотки

BFA,ALL,JS,0,0,Jm1\*SIN(FI+PI/3\*(k-1)),0

CMSEL,S,%WIND(k,2)%,

BFA,ALL,JS,0,0,-Jm1\*SIN(FI+PI/3\*(k-1)),0

ALLSEL

```
*ENDDO
```

CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора

CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области

CEINTF,0.25,AZ, , , , ,0.05

NSEL,ALL

ESEL,ALL

APLOT

TET=.0 ! Угол нагрузки

```
*DO,1,1,npoint+1,1      !начало цикла расчёта угловой характеристики
```

```

/PREP7

                ! Значения токов фаз
*IF,n,LT,1.5,THEN
RESULTS(1,0,1)=TET
*ENDIF

/SOLU

                                SOLVE

/POST1 ! запись результатов шага счёта в таблицу
                                TORQSUM,%TORQUE_NAME%
RESULTS(1,n,1)=TORQVW*LSTATORA    ! Момент N*м
/PREP7

                                ! поворачиваем ротор
CEDELE,ALL
CSYS,1 !
AGEN, ,MOVE_NAME, , , ,dangl, , , ,1

CSYS,0
  CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
  CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
  CEINTF,0.25,AZ, , , , ,0.05
  NSEL,ALL
  ESEL,ALL
  APLOT

/REPLOT
TET=TET+dangl

*ENDDO                                ! конец цикла расчёта угловой характеристики
  J=J-deltaJ                            ! приращение плотности тока вычитается
! поворачиваем ротор
CEDELE,ALL
CSYS,1 !
AGEN, ,MOVE_NAME, , , , -dangl, , , ,1

CSYS,0
  CMSEL,S,'NODES' ! связывание узлов и элементов статора и ротора
  CMSEL,S,'ELEMENTS' ! через смежные области
  CEINTF,0.25,AZ, , , , ,0.05
  NSEL,ALL
  ESEL,ALL
  APLOT

/REPLOT

*ENDDO

```

Копии патентов на изобретения, полученных при выполнении работы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2693935

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА**

Патентообладатель: *Российская Федерация, от имени которой  
выступает Государственная корпорация по атомной энергии  
"Росатом" (Госкорпорация "Росатом") (RU)*

Авторы: *Смирнов Александр Юрьевич (RU), Веллер Владимир  
Владимирович (RU), Кифоренко Александр Валерьевич (RU),  
Кудряшов Дмитрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2018125200


Приоритет изобретения 09 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 08 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 09 июля 2038 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2693935

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА**

Патентообладатель: *Российская Федерация, от имени которой  
выступает Государственная корпорация по атомной энергии  
"Росатом" (Госкорпорация "Росатом") (RU)*

Авторы: *Смирнов Александр Юрьевич (RU), Веллер Владимир  
Владимирович (RU), Кифоренко Александр Валерьевич (RU),  
Кудряшов Дмитрий Андреевич (RU)*

Заявка № 2018125200

Приоритет изобретения 09 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 08 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 июля 2038 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Сведения об использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ



Первый заместитель директора - генерального  
конструктора АО «ОКБМ Африкантов», д.т.н.

В.В. Петрунин

2023 г.

Заключение

Об использовании результатов диссертации Кудряшова Д.А.

«Разработка и исследование электромеханических устройств для привода регулируемых органов ядерных энергетических установок», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – электротехнические комплексы и системы.

Специалисты в составе: Веллер Владимир Владимирович – начальник отдела конструирования механизмов СУЗ, Друмов Игорь Васильевич – начальник лаборатории измерительных систем.

Рассмотрели диссертационную работу соискателя Кудряшова Дмитрия Андреевича «Разработка и исследование электромеханических устройств для привода регулируемых органов ядерных энергетических установок», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – электротехнические комплексы и системы. Диссертационная работа написана под руководством специалиста АО «ОКБМ Африкантов», ведущего инженера-конструктора д.т.н. доцента Смирнова А.Ю.

В результате рассмотрения установлено.

1. Актуальность темы обусловлена требованием по повышению безотказности электромеханических устройств, предназначенных для привода регулируемых органов ядерных энергетических установок (ЯЭУ), надёжности их работы во всех режимах эксплуатации, а также требованиями к качеству регулирования мощности ядерных энергетических установок.

Несомненный приоритет в области создания исполнительных механизмов, предназначенных для перемещения регулируемых органов систем автоматики, созданных на основе шаговых двигателей с вращательным движением ротора, который подтверждён значительным количеством авторских свидетельств и патентов на изобретения, принадлежит АО «ОКБМ Африкантов».

Несмотря на накопленный опыт, повышение качества регулирования ЯЭУ на основе разработки и применения перспективных конструкций электромеханических преобразователей продолжает оставаться актуальной задачей.

2. Цель работы состоит в совершенствовании характеристик и расширении области применения электромеханических устройств, предназначенных для силового воздействия на регулирующие органы, которые обеспечивают защиту и сопровождение эксплуатационного цикла ЯЭУ.

3. Научная новизна и личный вклад автора.

1) предложено использовать отдельный электромеханический преобразователь с постоянными магнитами на роторе, работающий на третьей гармонике поля якоря. На данный электромеханический преобразователь получен патент на изобретение;

2) разработаны усовершенствованные методики проектирования и компьютерного моделирования электромеханических преобразователей индукторного типа и с постоянными магнитами на роторе, работающих на третьей гармонике поля якоря;

3) в программной среде ANSYS (APDL) создана компьютерная программа, которая предназначена для генерации сеточных моделей электромеханических преобразователей методом конечных элементов; расчёты по ней позволили проверить и подтвердить правильность разработанных методов проектирования и математического моделирования;

4) предложены и проанализированы дополнительные конструкции электромеханических преобразователей, использование которых обеспечивает расширенные возможности по достижению заданного закона движения РО.

Личный вклад автора состоит в:

- разработке конструкции части узлов шагового электропривода, включающей двигатель и генератор;

- проведении расчётов электромеханических преобразователей по разработанным методикам проектирования, включая определение размеров и электромагнитных параметров;

- исследовании сеточных моделей для углублённого анализа работы двигателя и магнитоэлектрического генератора из состава электропривода для перемещения регулирующего органа;

- выполнении расчётов параметров привода;

- участии в проведении исследований и вычислительных экспериментов.

4. Практическая ценность диссертационной работы заключается в обосновании и разработке устройств и математических моделей, которые позволяют:

- усовершенствовать характеристики электропривода вертикального перемещения регулирующего органа при переходе в режим аварийной защиты путём отсоединения от источника электрической энергии;



- выполнять проектирование и математическое моделирование устройств, применение которых позволяет обеспечить требуемый закон вертикального перемещения РО в режиме аварийной защиты;

- осуществлять построение сеточных моделей спроектированных двигателей для последующего проведения поверочного расчёта методом конечных элементов;

- создать задел для опытно-конструкторских работ по исследованию других перспективных типов электрических машин, обеспечивающих достижение заданного закона движения РО при обесточенном двигателе.

5. Реализация результатов работы. Основные положения и рекомендации диссертационной работы использованы в АО «ОКБМ «Африкантов» при выполнении проектных и конструкторских работ, результаты которых воплощены в реально изготовленных изделиях. Также использованы научным руководителем при разработке учебных пособий по дисциплине «Электропривод» и в преподавательской практике соискателя и руководителя при чтении лекций в образовательных учреждениях высшего образования НГТУ и МИСиС.

6. Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы были доложены на международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях.

7. Полнота публикации полученных результатов. Основные положения диссертации опубликованы в четырёх статьях, в журналах «Электричество» «Электромеханика. Известия вузов» и «Интеллектуальная электротехника» – реферируемых изданиях ВАК.

Работа имеет важное практическое значение, а её автор – Кудряшов Дмитрий Андреевич достоин присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Начальник отдела конструирования  
механизмов СУЗ

В.В. Веллер

Начальник лаборатории  
измерительных систем, к.т.н.

И.В. Друмов