

**ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Процына Зиновий Павлович

УДК 621.313.33

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ  
ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

05.09.01 – электрические машины и аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Рымша Виталий Викторович  
доктор технических наук,  
профессор

Одесса 2016 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ РАБОТЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	12
1.1. Структурная схема вентильно-реактивного двигателя.....	12
1.2. Конструктивные исполнения электромеханических преобразователей вентильно-реактивных двигателей.....	17
1.3. Системы компьютерного моделирования вентильно-реактивных двигателей.....	21
1.4. Методики анализа и синтеза вентильно-реактивных двигателей...	28
1.5. Выводы.....	31
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	33
2.1. Математическая модель электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя на базе уравнений магнитного поля.....	33
2.2. Проверка адекватности математической модели на базе уравнений магнитного поля.....	48
2.3. Математическое моделирование теплового поля вентильно-реактивного двигателя.....	53
2.4. Проверка адекватности математической модели на базе уравнений теплового поля.....	60
2.5. Выводы.....	63
3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ SRM-CAD.....	65
3.1. Структурная схема системы SRM-CAD.....	65
3.2. Основные подсистемы SRM-CAD.....	68
3.2.1. Подсистема предварительного расчета.....	68

3.2.2. Подсистема параметризации геометрии, расчета магнитных и тепловых полей.....	69
3.2.3. Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы.....	74
3.2.4. Подсистема оптимизации.....	79
3.2.5. Информационная подсистема.....	81
3.3. Выводы.....	83
4. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ..	84
4.1. Анализ и выбор конфигурации зубцовой зоны электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя.....	84
4.2. Анализ и выбор коэффициентов полюсного перекрытия ротора и статора электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя.....	94
4.3. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивных двигателей.....	102
4.3.1. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного двигателя SRM-130.....	103
4.3.2. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного двигателя SRM-115.....	112
4.4. Сопоставительный анализ трех и четырехфазных вентильно-реактивных двигателей.....	121
4.5. Синтез вентильно-реактивного двигателя для привода активатора маслобойки.....	125
4.5.1. Проектирование и моделирование.....	126
4.5.2. Экспериментальная проверка результатов моделирования...	132
4.5.3. Определение оптимальных углов коммутации.....	135
4.5.4. Тепловой расчет.....	138

4.6. Выводы.....	140
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	144
Приложение А. Материалы внедрения результатов диссертационной работы.....	157
Приложение Б. Руководство пользователя системы автоматизированно- го синтеза вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD.....	161
Приложение В. Листинги специализированного программного обеспечения.....	213
Приложение Г. Регрессионные математические модели .....	232
Приложение Д. Табличные данные вентильно-реактивного двигателя для привода активатора маслобойки.....	241

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВРД	Вентильно-реактивный двигатель
ДПР	Датчик положения ротора
КПД	Коэффициент полезного действия
МДС	Магнитодвижущая сила
МКЭ	Метод конечных элементов
ММ	Математическая модель
СУ	Система управления
ЭДС	Электродвижущая сила
ЭММ	Электромагнитный момент
ЭМП	Электромеханический преобразователь
SRM	Switched reluctance motor

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие и усовершенствование электромеханических преобразователей (ЭМП) в первую очередь связано с достижениями силовой электроники. В современных электромеханотронных устройствах аккумулируются успехи как электротехники, так и электроники. К электромеханотронным устройствам относится вентильно-реактивный двигатель (ВРД), который состоит из простого, дешевого и надежного ЭМП, электронной схемы управления (СУ) и датчика положения ротора (ДПР) [87].

По прогнозам большинства специалистов ВРД займет ведущие позиции в ближайшее время [30]. Сделать такое заключение позволяют его следующие положительные качества:

- простота, надежность, технологичность и дешевизна ЭМП благодаря отсутствию на роторе обмоток, постоянных магнитов и выполнению обмотки статора в виде отдельных катушек;
- возможность получения как низких, так и сверхвысоких частот вращения;
- высокая ремонтпригодность.

Вентильно-реактивный двигатель – это техническое устройство, в котором ЭМП конструктивно и функционально объединен с электронными компонентами, обеспечивающими его работу, диагностику и защиту. При этом ВРД нужно рассматривать как систему, в которой происходят сложные энергетические и информационные процессы.

Круг вопросов, связанных с решением задач параметрического синтеза ВРД при работе в динамических и квазиустановившихся режимах достаточно широк. Несмотря на три десятилетия активных исследований, ВРД представляет собой электромеханический преобразователь энергии, в теории и практике которого еще есть нерешенные вопросы. В имеющейся литературе предлагается широкий спектр решений и рекомендаций, которые касаются

проектирования, моделирования и диагностики ВРД, однако зачастую эта информация противоречива. Поэтому в данной работе даны рекомендации по синтезу ВРД с использованием современных математических моделей (ММ) высокой степени детализации.

**Актуальность темы.** Современное электромашиностроение характеризуется переходом от использования отдельной электрической машины к комплексным электромеханотронным системам. К одной из таких относится вентильно-реактивный двигатель.

ВРД имеет широкую область использования в электроприводе компрессоров, насосов, вентиляторов [112]. Перспективным также является применение ВРД в других механизмах бытовой техники. При этом возможно не только создавать механизмы с регулируемой частотой вращения и высоким коэффициентом полезного действия (КПД), но и улучшать характеристики всей системы. Даже при простой замене традиционного электродвигателя регулируемым в уже используемом механизме можно снизить затраты на электроэнергию [61]. Современный уровень развития силовой электроники позволяет создавать надежные ВРД с возможностью регулировки частоты вращения и момента на валу ЭМП. Это позволяет эффективно использовать ВРД в регулируемом электроприводе.

Поэтому разработка надежных и технологичных ВРД, которые должны удовлетворять не только требованиям к их статическим и динамическим характеристикам, но и к энергетической эффективности является важной и актуальной задачей. В свою очередь, выполнение большого объема научно-исследовательских работ требует создания систем автоматизированного синтеза ВРД.

Таким образом, научно-техническая задача автоматизированного синтеза ВРД является актуальной.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнялась в соответствии с научно-исследовательскими темами № 560-51

«Разработка математических моделей и исследование процессов в электрических машинах и трансформаторах» (номер государственной регистрации 0107U001962) [46] и № 625-51 «Разработка средств автоматизированного синтеза высокоэффективных электромагнитных и электромеханотронных устройств» (номер государственной регистрации 0106U0113174) [47].

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка высокоэффективных ВРД.

**Для достижения указанной цели нужно решить следующие задачи:**

- создать полевые математические модели для анализа электромагнитных и тепловых процессов в ВРД;
- разработать систему автоматизированного синтеза ВРД, позволяющую рассчитывать динамические и квазиустановившиеся режимы работы, на базе цепно-полевых математических моделей высокой степени детализации;
- выполнить экспериментальные исследования для идентификации параметров и верификации разработанных математических моделей;
- обосновать рекомендации для повышения эффективности работы и улучшения характеристик ВРД за счет оптимизации геометрии ЭМП ВРД и параметров коммутации.

**Объектом исследования** являются процессы преобразования энергии в ВРД посредством анализа магнитных и тепловых полей.

**Предметом исследования:** геометрические соотношения активной зоны, коммутационные процессы и характеристики ВРД.

**Методы исследований.** Решение поставленных в работе задач достигнуто с использованием численного моделирования магнитных и тепловых полей методом конечных элементов в двухмерной постановке задачи и численных методов решения дифференциальных уравнений математической модели ВРД. При проектном синтезе использовался метод полного перебора и оптимизация с использованием генетического алгоритма.



**Научная новизна полученных результатов:**

- усовершенствована математическую модель ВРД на базе цепно-полевого подхода с высокой степенью детализации для использования в системе автоматизированного синтеза ВРД, организация которой базируется на принципах системного подхода и обеспечивает эффективное решение проектных и исследовательских задач при проектировании ВРД;
- впервые на базе цепно-полевых математических моделей исследовано влияние коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора ВРД малой мощности на динамические и квазиустановившиеся режимы работы и разработаны рекомендации по увеличению КПД ВРД;
- впервые сформированы регрессионные модели среднего момента и коэффициента пульсаций момента на периоде коммутации для девяти вариантов полюсной зоны четырехфазных ВРД, которые позволили определить оптимальную форму полюсов статора и ротора ВРД.

**Практическое значение полученных результатов:**

- разработано и реализовано в виде программного комплекса специализированное программное обеспечение – система автоматизированного синтеза вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD, позволяющая осуществлять синтез и оптимизацию ВРД на основе полевых ММ;
- с использованием цепно-полевых ММ высокой степени детализации выполнено сравнительный анализ трех- и четырехфазных ВРД для динамических и квазиустановившихся режимов работы, который позволил разработать рекомендации по их эффективному применению;
- предложены рекомендации по выбору геометрии полюсной зоны ЭМП ВРД – формы пазов и величин полюсного перекрытия статора и ротора, которые позволяют получить максимальный средний электромагнитный момент в зоне коммутации;
- предложены и обоснованы рекомендации по улучшению энергетических и динамических характеристик ВРД за счет оптимизации углов коммутации фаз, что позволило увеличить КПД ВРД.

## **Внедрение научных результатов работы**

Полученные в диссертационной работе результаты и рекомендации, а также разработанные математические модели использованы при разработке, конструировании и практической реализации ВРД, которые внедрены в институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (г. Киев) в автомате для сварки, наплавки и резки металлов под водой, при разработке и практической реализации ВРД SRM-80-215-IE и SRM-80-162-IE, которые выпускает ООО “Электротехника – Новые технологии” [48]. По результатам работы подготовлены методические указания к выполнению расчетно-графических и практических работ по исследованию свойств ВРД на основе системы автоматизированного анализа и синтеза вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD, которая внедрена в учебный процесс на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета. Соответствующие документы о внедрении результатов работы приведены в приложении А.

**Личный вклад соискателя.** В научных трудах, которые опубликованы в соавторстве, диссертанту принадлежит: в [20] выполнено моделирование ЭМП ВРД; в работе [57] проведены расчетные исследования по оптимизации параметров коммутации ВРД; в [59] соискателем выполнены расчетные исследования коэффициентов полюсного перекрытия трехфазного ВРД; в [66] разработана структура системы автоматизированного анализа и синтеза ВРД; в [67] расчет двухмерного стационарного теплового поля ВРД методом конечных элементов в программах ELCUT и FEMM; в [73] моделирование исследуемых ВРД в динамических и квазиустановившихся режимах с помощью системы SRM-CAD; в [80] предложена подсистема геометрической параметризации ВРД.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 19 национальных и международных конференциях, симпозиумах и семинарах.

- Международный симпозиум SIEMA “Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов” (г. Харьков, 2006 – 2010 и 2015 г.г.).

- VIII международная конференция по математическому моделированию (г. Херсон, 2006).
- XIII международная научно-техническая конференция “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика” (г. Одесса, 2006).
- VIII международная научно-техническая конференция САИТ “Системный анализ и информационные технологии” (г. Киев, 2006)
- VIII международная научно-практическая конференция “Современные информационные и электронные технологии” (г. Одесса, 2007).
- Международная научная конференция ISDMIT “Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий” (Украина, Крым, г. Евпатория 2007).
- Научно-технический семинар АН Украины “Электромагнитные процессы и проектный синтез электрических машин и аппаратов”, Одесский национальный политехнический университет, 2006 – 2010, 2012, 2015 и 2016 г.г.

Разработанные ВРД демонстрировались на международной специализированной выставке «Elcom – 2006» (г. Киев), а также на 4-ой и 5-ой международных специализированных выставках «AISS-Автоматика-2008» (г. Киев) и «AISS-Автоматика-2009» (г. Киев).

**Публикации.** Основные положения диссертации представлены в восьми статьях, опубликованных в специализированных изданиях рекомендованных ВАК, двух отчетах по научно-исследовательской теме и одном методическом указании для студентов электромеханических специальностей.

Без соавторов опубликовано две работы [52] и [53]. Также получено свидетельство о регистрации авторского права на программное обеспечение [80].

## РАЗДЕЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ РАБОТЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

#### 1.1. Структурная схема вентильно-реактивного двигателя

В последнее три десятилетия внимание электромехаников, наряду с асинхронными и синхронными машинами, привлекает вентильно-реактивный двигатель, получивший в зарубежной литературе название *switched reluctance machine (SRM)*. Начало систематических исследований, посвященных этому двигателю, относятся к 80-м годам XX века [83]. ВРД – это типичный представитель электромеханотронного устройства [88], благодаря чему он может управлять технологическими процессами в соответствии с заданными требованиями: регулировать частоту вращения, поддерживать заданный момент и прочее.

Структурная схема четырехфазного ВРД с восьмью полюсами статора и шестью полюсами на роторе приведена на рис. 1.1 [83].

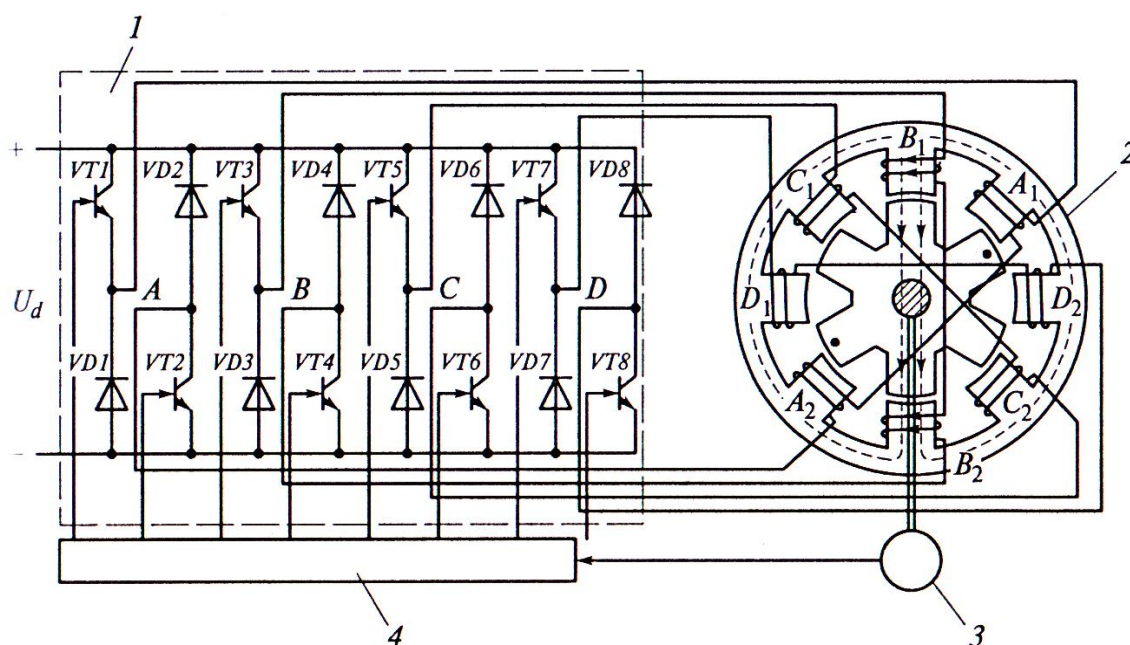


Рисунок 1.1 – Структурная схема ВРД:

- 1 – силовой коммутатор; 2 – электромеханический преобразователь;  
3 – датчик положения ротора; 4 – система управления

В ее состав входят: электромеханический преобразователь, электронная система управления с силовым коммутатором и датчик положения ротора. Функциональное назначение этих элементов: система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, которые поступают от ДПР, импульсами напряжения прямоугольной формы управляет питанием фаз ЭМП. При этом в ЭМП происходит преобразование электрической энергии в механическую.

Следует отметить, что ЭМП в ВРД принципиально не способен работать без силового коммутатора и системы управления.

Принцип действия ЭМП основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение. При этом несимметричный в магнитном отношении ротор при работе ЭМП в режиме двигателя двигается в сторону уменьшения магнитного сопротивления воздушного зазора, и увеличения индуктивности фазы [43, 89, 93, 107, 108, 112].

Ключевыми понятиями для ЭМП ВРД является согласованное и рассогласованное положение полюсов статора и ротора. Рассогласованным положением полюсов статора и ротора для какой-нибудь фазы ЭМП называется такое положение, при котором ось фазы статора располагается строго напротив оси паза ротора. Это положение характеризуется минимальным значением индуктивности фазы и магнитного потока, сцепленного с ней. Рассогласованное положение одной из фаз принимается за начало отсчета углового положения, такое положение ротора относительно статора для фазы *A* четырехфазного ЭМП ВРД с восьмью полюсами на статоре и шестью полюсами на роторе показано на рис. 1.2.

Если подать напряжение на фазу *A*, то ротор будет ориентироваться таким образом, чтобы магнитный поток, пронизывающий его, принял максимальное значение.

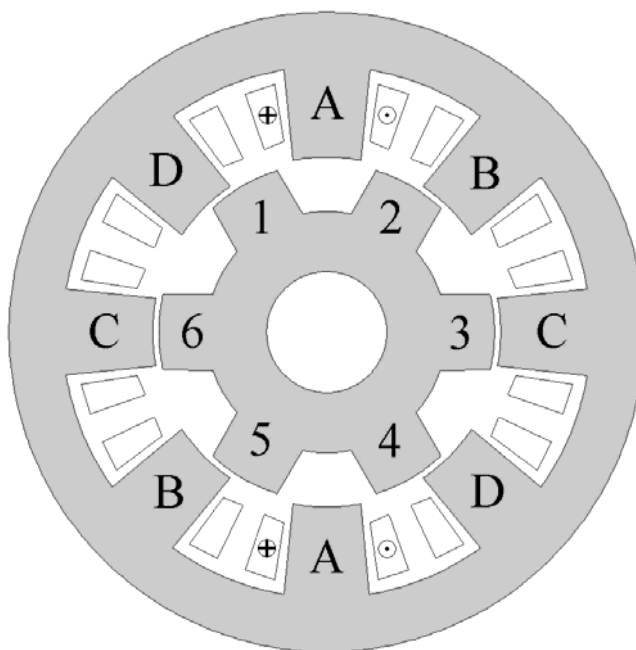


Рисунок 1.2 – Рассогласованное положение полюсов для фазы *A*

При этом на полюса статора и ротора будут действовать одинаковые по значению и противоположные по направлению пондеромоторные силы. Очевидно силы, которые действуют на первый и четвертый зубцы ротора, будут поворачивать его по часовой стрелке, а силы, которые действуют на второй и пятый зубцы – против. Благодаря тому, что ротор в данном положении симметричен относительно оси возбужденной фазы, равнодействующая этих сил будет равна нулю. Таким образом, в рассогласованном положении ЭМП ВРД не развивает электромагнитный момент [39].

Согласованное положение представляет собою точку устойчивого равновесия. При этом ось полюса фазы статора размещается строго напротив оси полюса ротора. Это положение характеризуется максимальным значением индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, что объясняется минимальной величиной магнитного сопротивления воздушного зазора между полюсами. В этом положении силы притяжения полюсов имеют только радиальные составляющие, поэтому электромагнитный момент ЭМП в этом положении равен нулю. Согласованное положение ротора относительно статора для фазы *A* показано на рис. 1.3.



ности  $2\pi/m$  вспомогательный транзистор. Когда этот транзистор закрывается, ток быстро падает до нуля, протекая через два диода [83].

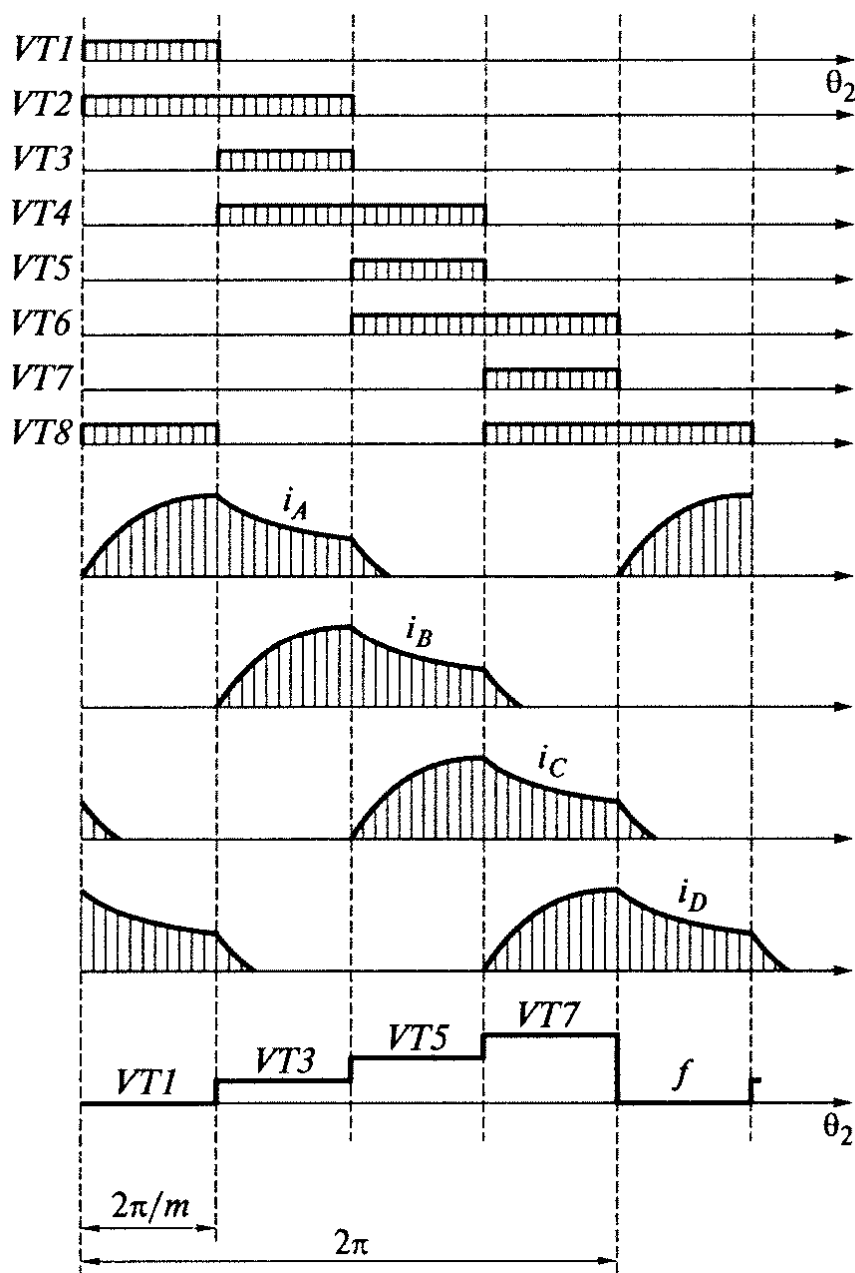


Рисунок 1.4 – Формирование токов в обмотках фаз ВРД

Описанный выше способ коммутации называется одиночным, так как в любой момент времени к источнику питания подключается только одна фаза ЭМП ВРД. Кроме одиночной, применяется парная коммутация, при которой к источнику всегда подключены две фазы двигателя, а также комбинированная коммутация [17]. Для обеспечения плавного вращения и уменьшения пульса-



ций момента при работе двигателя алгоритм формирования тока статора усложняется.

Как было сказано выше, ВРД – это электромеханотронное устройство, поэтому на его энергетические и рабочие характеристики влияют как конструктивные решения, так и информационные процессы в СУ. Под конструктивными решениями понимается конструкция ЭМП, силовой коммутатор и ДПР, а под информационными процессами – алгоритм формирования тока статора.

## 1.2. Конструктивные исполнения электромеханических преобразователей вентильно-реактивных двигателей

Рассматриваемые в данной работе электромеханические преобразователи ВРД отличаются многочисленностью сфер применения, многообразием конструктивных исполнений и особенностями замыкания магнитного потока. Удобно классифицировать вращающиеся ЭМП по числу полюсов на статоре  $Z_S$  и роторе  $Z_R$ , а также по числу фаз  $m$  обмотки статора, наиболее распространенные варианты приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Распространенные конструктивные исполнения ЭМП

Количество фаз, $m$	Число полюсов	
	статора, $Z_S$	ротора, $Z_R$
1	2	2
2	4	2
3	6	4
3	6	8
3	12	8
4	8	6
4	16	12

Число фаз  $m$  обмотки статора ЭМП определяет основные свойства ВРД. Увеличение  $m$  приводит к уменьшению пульсаций момента и скорости, при этом увеличивается число силовых ключей СУ, точность ДПР и количество соединительных проводов между СУ и ЭМП. Рекомендованные значения  $m$  – от 1 до 4. Увеличение  $m$  больше 4 не дает существенного результата в снижении пульсаций момента, а только усложняет ВРД.

Например, ЭМП, показаний на рис. 1.5, относится к трехфазным ЭМП с  $Z_S/Z_R=6/4$  [112].

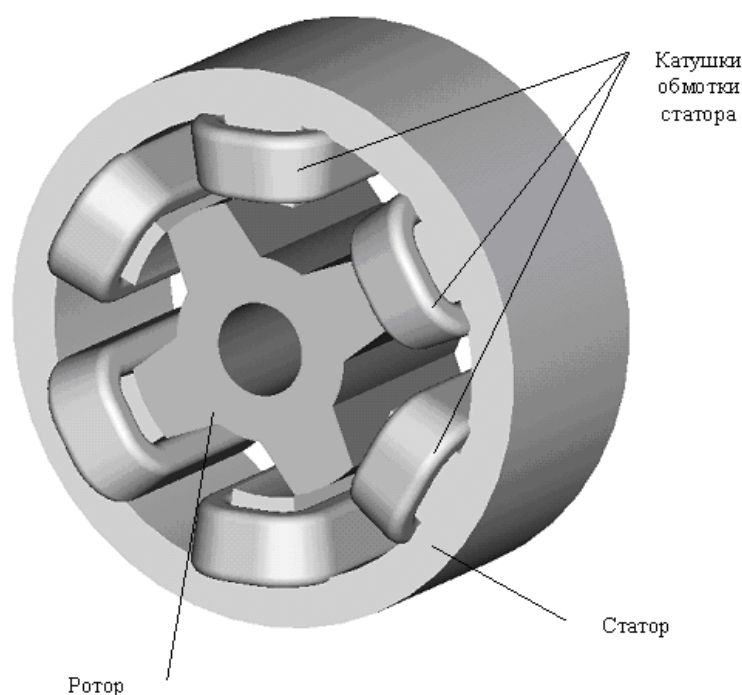


Рисунок 1.5 – Трехфазный ЭМП конструкции 6/4

Кроме трехфазных наибольшее распространение получили четырехфазные ЭМП конструкции 8/6 (рис. 1.6). Конструкции, приведенные на рис. 1.5 и рис. 1.6, можно отнести к классическим [87].

В некоторых случаях для увеличения электромагнитного момента может применяться конструкция с увеличенным числом полюсов статора и ротора (рис. 1.7). В такой конструкции, по сравнению с классической 8/6 (см. рис. 1.6), уменьшена высота спинки статора и вылет лобовых частей катушек обмотки статора, однако при этом конструкция датчика положения ротора сложнее.

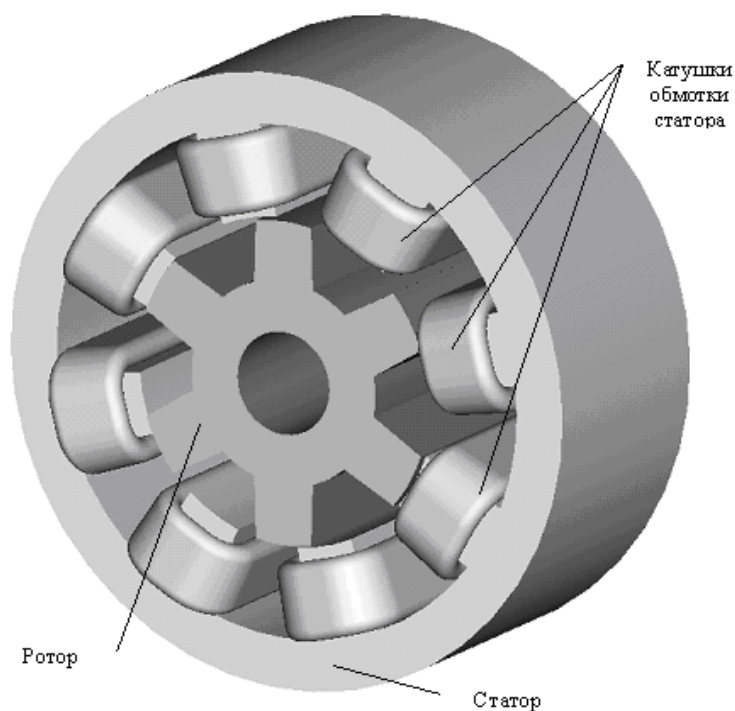


Рисунок 1.6 – Четырехфазный ЭМП конструкции 8/6

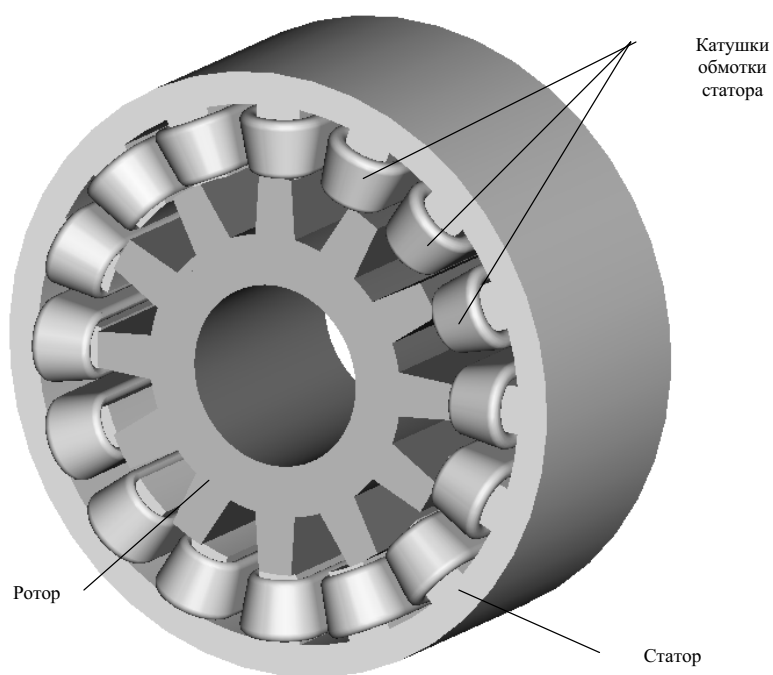


Рисунок 1.7 – Четырехфазный ЭМП конструкции 16/12

Увеличение электромагнитного момента, по сравнению с классической конструкцией, возможно также при исполнении статора с количеством зубцов на один полюс больше двух [109, 112].

Для уменьшения пульсаций момента и улучшения виброакустических характеристик в работе [114] предлагается новая конструкция ротора, который имеет две пары полюсов различной ширины.

При использовании ЭМП с достаточно большим диаметром и большим количеством полюсов на роторе целесообразно использовать конструкцию с псевдо U-подобными полюсами статора (рис. 1.8) [89]. В ней, по сравнению с классической конструкцией (см. рис. 1.6), значительно уменьшается длина магнитных силовых линий, и соответственно уменьшаются магнитные потери в стали.

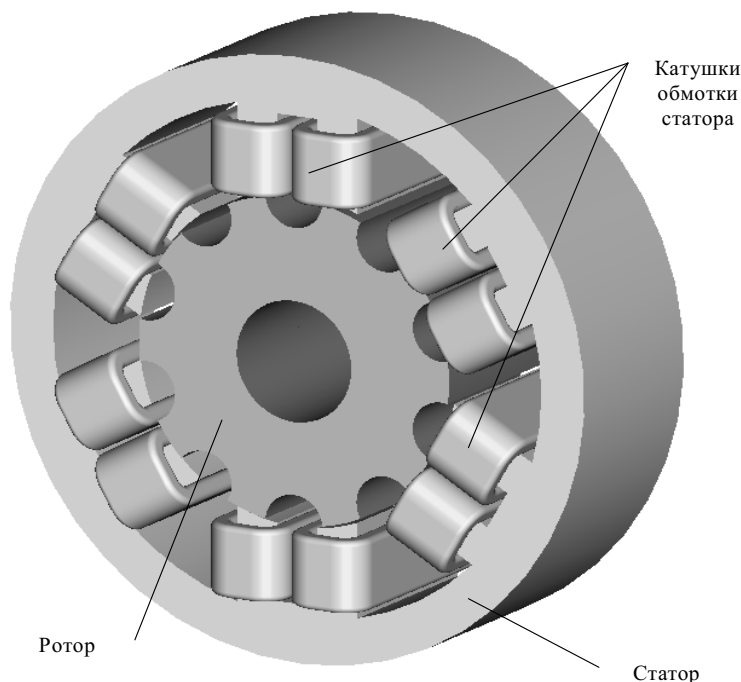


Рисунок 1.8 – Трехфазный ЭМП конструкции 12/10 с псевдо U-подобными полюсами статора

Для общепромышленного использования можно рекомендовать трех- и четырех фазные классические конструкции ЭМП ВРД с соотношением чисел полюсов статора к ротору 6/4 и 8/6, соответственно. В этом случае силовая часть системы управления будет включать в себя шесть транзисторов (для четырехфазного ВРД транзисторы включаются в мост Миллера [112]), а обмотка ЭМП состоит из сосредоточенных катушек.

По определению, конструкция – это инженерное решение относительно структуры и свойств элементов. Поэтому получение высоких энергетических и эксплуатационных характеристик ВРД зависит не только от выбора конструкции ЭМП, но и от оптимальных параметров самой конструкции.

### 1.3. Системы компьютерного моделирования вентильно-реактивных двигателей

В связи с тем, что ВРД – это электромеханотронная система, на этапе проектирования такой системы необходимо прогнозировать ее поведение в динамических и квазиустановившихся режимах работы. Это можно делать при помощи современных компьютерных моделей. При этом нужно получить полную и точную информацию о электрических, электромагнитных и электромеханических процессах в составных частях ВРД при разных режимах работы с учетом применяемых алгоритмов управления. Основными задачами моделирования ВРД являются определение в динамических режимах мгновенных значений токов и моментов, а в квазиустановившемся режиме скорости, потребляемой и полезной мощностей, потерь и КПД.

В настоящее время существуют различные системы компьютерного моделирования ВРД [28, 29, 36, 78, 87, 113, 115].

Представленная в [87] подсистема компьютерного моделирования ВРД – это комплекс программ для определения мгновенных значений токов, электромагнитного момента, частоты вращения, угла перемещения, напряжений и прочих параметров в динамических и квазиустановившихся режимах работы ВРД, средних значений некоторых из этих величин, а также мощностей (входной, полезной и составляющих потерь).

Подсистема реализована в виде пакета программ, написанных на алгоритмическом языке ФОРТРАН с использованием транслятора Microsoft Fortran v.5.1; ориентирована на пользователя-электромеханика, который не

имеет специальной подготовки в области программирования; предоставляет пользователю широкие вспомогательные возможности работы с входными данными, результатами расчета, а также визуализации "осциллограмм" токов, электромагнитного момента, частоты вращения и напряжения на накопительном конденсаторе. С целью максимального облегчения исследовательской работы входные данные для подсистемы автоматизированных исследований ВРД готовит автоматизированная подсистема проектирования ВРД в виде файла. Значения начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений подсистема предлагает нулевые, что позволяет исследовать переходной процесс пуска ВРД; при необходимости пользователь может задать другие значения начальных условий. Напряжение питания, нагрузочный момент и шаг интегрирования по времени пользователь задает в диалоговом режиме.

Подсистема содержит и предоставляет пользователю в интерактивном режиме необходимый справочный материал, создает соответствующие файлы результатов расчета, что позволяет использовать внешние программные пакеты для визуализации графических зависимостей с целью облегчения анализа.

Основное назначение подсистемы – исследование ЭМП с пассивным ротором при его питании от электронного коммутатора с последовательными или параллельными емкостными накопителями энергии при различных схемах их соединения. Выбор типа коммутатора, количества конденсаторов и схемы организации форсирования тока секции осуществляется пользователем в диалоговом режиме работы.

Математическая модель ВРД учитывает потери в силовых элементах коммутатора, для этого используется аппроксимация их вольтамперной характеристики. Подсистема предлагает значения коэффициентов аппроксимации для современных биполярных транзисторных ключей и силовых полупроводниковых диодов в виде справки.

Программный комплекс имеет открытый характер и легко может быть дополнен математическими моделями как на входе системы электропривода (первичные или вторичные источники питания с ограниченной мощностью, регуля-

торы напряжения любого из известных типов), так и на выходе (модели виду нагрузки: "сухое" трение, вентиляторная и так далее).

К недостаткам этой подсистемы можно отнести следующее:

1. Определение зависимостей потокосцепления и момента от тока и угла положения ротора выполняется без использования полевых методов расчета, что не позволяет достаточно точно учесть реальную геометрию и уровень насыщения ферромагнитных материалов.
2. Подсистема разработана для операционной системы Microsoft DOS, которая на сегодняшний день морально устарела.

Система [28] разработана в среде MatLab Simulink компании The MathWorks. Функционально модель ВРД учитывает нелинейность характеристик намагничивания, сложную зависимость потокосцепления фазы от пространственного положения ротора и амплитуды тока фазы, дискретность работы фаз и изменение электромагнитных параметров ВРД.

Для коммутации фаз ВРД в функциональной модели реализована схема Миллера [112], где на две фазы приходится один верхний MOSFET транзистор и два нижних, а количество обратных диодов три.

Для распределения управляющих импульсов по фазам обмотки создан субблок – датчик положения ротора, который имитирует работу двух оптодатчиков, смещенных на  $1/24$  полного оборота ротора (для 4-х фазного ВРД конструкции 8/6).

Управление ключами инвертора ВРД осуществляется моделью драйвера, который имитирует коммутацию ключей в функции сигналов датчика положения и компаратора, формирующего ширину петли гистерезиса в контуре регулирования тока. Разработан также субблок имитации дополнительной, высокочастотной коммутации ключей.

Модель ВРД предоставляет возможность не только изучить процессы коммутации в фазах электродвигателя, но и исследовать его поведение при разных настройках и параметрах системы управления.

К недостаткам этой системы можно отнести длительное время расчета переходного процесса, что не позволяет проводить многовариантные исследования (длительность расчета в среде MatLab Simulink приблизительно в 100 раз выше, чем при использовании языка Borland Paccal [35]).

Подсистема [36] реализована в среде MathCAD компании PTC. Для составления расчетных уравнений компьютерной модели используется схема замещения силовых цепей ВРД.

Пользуясь схемой замещения, соответственно теории электрических цепей, составлена система уравнений, которая описывает электромагнитные процессы в ВРД.

С использованием магнитных характеристик двигателя методами теории цепей выполняются расчеты таких величин, как мгновенные значения токов, напряжений и электромагнитного момента.

К недостаткам этой подсистемы относятся:

1. принято допущение о ненасыщенности магнитной системы;
2. в магнитопроводе не учитывается наличие вихревых токов и гистерезиса;
3. расчет переходного процесса в среде MathCAD выполняется длительное время.

Подсистема, приведенная в [113], использует среду моделирования LabView фирмы National Instruments.

Для проведения моделирования необходимо выполнить пять шагов:

1. сформулировать техническое задание: задать нагрузочный момент, скорость, напряжение питания, число фаз, число полюсов ротора и статора;
2. уточнить размеры ротора и статора;
3. задать длину ЭМП и параметры катушек;
4. рассчитать потребленную и полезную мощность, КПД, вес ЭМП и другие значения;
5. смоделировать динамические режимы работы.



К недостаткам подсистемы можно отнести следующее:

1. расчет зависимостей потокосцепления и момента от тока и угла положения ротора выполняется при помощи расчета параметров схемы замещения магнитной цепи, что не позволяет учитывать реальную геометрию ЭМП;
2. расчеты выполняются только для одной фазы ВРД.

Система SRDaS [115] разработана в среде программирования Borland Delphi 2.0 под 32-bit операционную систему семейства Microsoft Windows (95/98/2000/NT/XP). Разработка системы ведется с 1995 года.

Система имеет возможность выполнить параметризацию ЭМП ВРД по заданным геометрическим размерам, рис. 1.9.

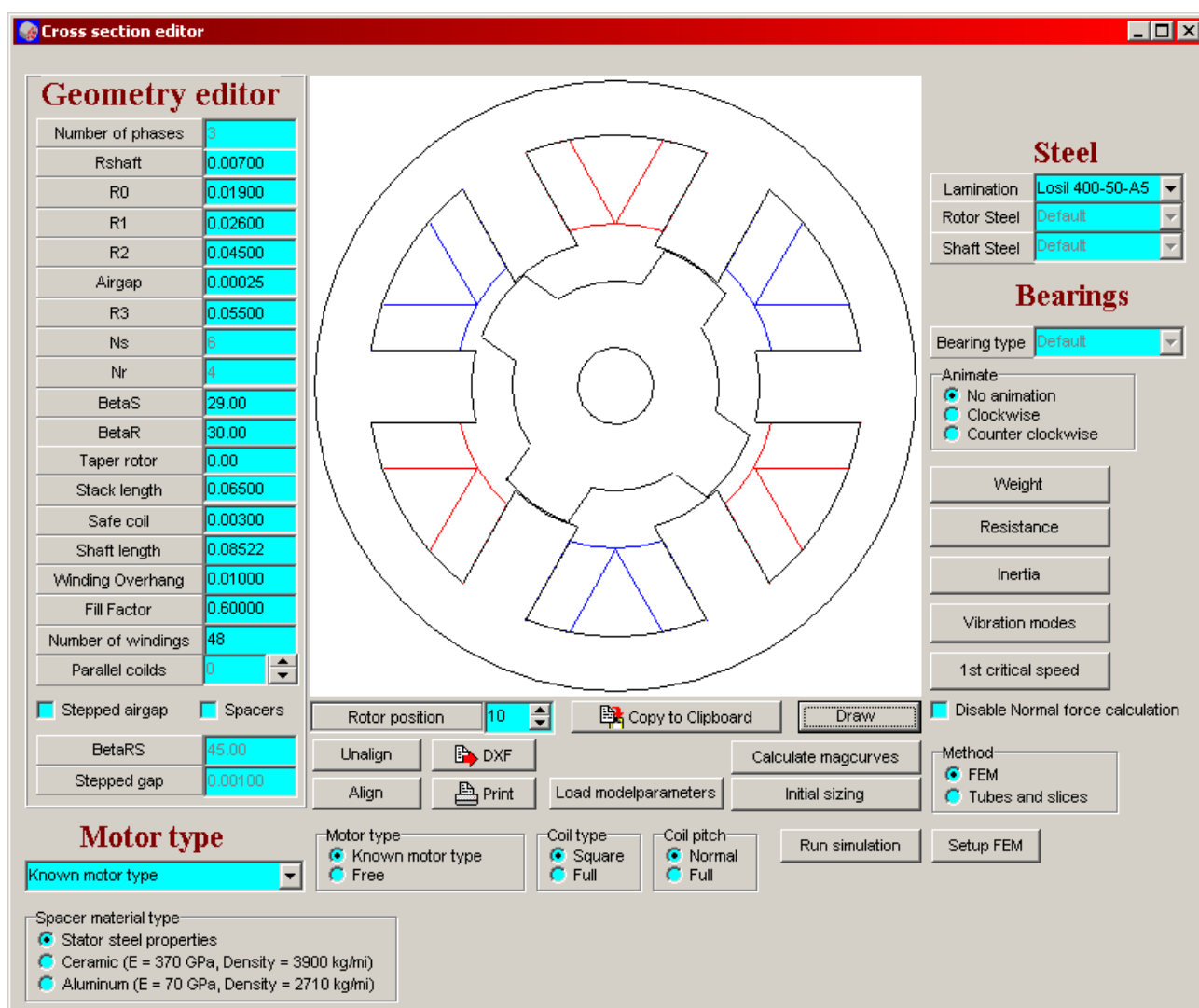


Рисунок 1.9 – Редактор геометрии системы SRDaS

Расчет зависимостей потокосцепления и момента от тока и угла положения ротора выполняется при помощи метода конечных элементов.

Задавшись параметрами схемы управления, источника питания, углов коммутации, можно рассчитать динамические и квазиустановившиеся режимы. Кроме того, рассчитываются вибрации и шумы.

К недостаткам можно отнести следующее:

1. отсутствие предварительного расчета геометрии ЭМП по заданному техническому заданию;
2. доступна только демоверсия программы с ограниченными возможностями.

Программное обеспечение SPEED [78] состоит из нескольких подсистем, среди них: PC-SRD – выполняет проектирование и расчет ВРД, PC-FEA – расчет магнитного поля с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Подсистема компьютерного моделирования имеет много возможностей, часть из которых приведена ниже:

- современный windows – ориентированный интерфейс;
- единая среда для получения теоретической информации, проектирования, расчетов МКЭ, просмотра/редактирования баз данных материалов, получения On-line помощи;
- наличие информационных и справочных материалов о ВРД;
- графический редактор геометрических размеров ВРД (рис. 1.10);
- возможность проектировать ЭМП ВРД как с внутренним, так и с внешним ротором;
- генерация отчета, который содержит более ста основных параметров;
- возможность выбора схемы включения силовых ключей и настройки системы управления;
- нестационарная тепловая модель;
- реализация МКЭ для расчета магнитного поля;
- расчет и вывод на графики мгновенных значений тока и момента;
- расчет потерь в квазиустановившемся режиме;

- возможность автоматизации с использованием языка программирования Microsoft Visual Basic for Application (VBA) для написания скриптов;
- обратная совместимость с предыдущими версиями на протяжении 10 лет;
- большое число форматов экспорта/импорта исходных данных и результатов расчета;

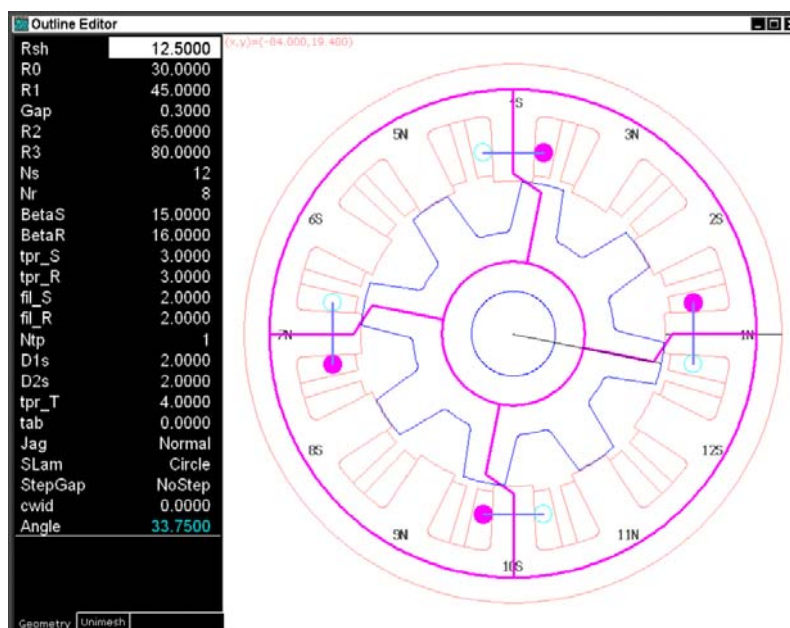


Рисунок 1.10 – Редактор геометрических размеров ВРД в системе SPEED

Систему PC-SRD можно считать лучшей, если бы не ограничения, которые связаны с коммерческой лицензией, а именно:

1. высокая стоимость системы;
2. закрытый исходный код, невозможность изменить программу в зависимости от текущих требований и накопленного опыта.

Анализ рассмотренных выше подсистем [36, 87, 113] показывает, что зависимости потокосцепления и момента от тока и положения ротора рассчитываются без учета реальной геометрии и насыщения.

Подсистемы [28, 36, 113] разработаны в средах MathCad, MatLab Simulink и LabView. Это приводит к длительному времени расчета переходного процесса и затрудняет выполнение оперативных исследований и многокритериальной оптимизации. Системы компьютерного моделирования [78] и [115] имеют весь

необходимый арсенал моделей и методов, но это закрытые проекты. Кроме того [78] – коммерческий проект. Поэтому важной задачей является разработка системы автоматизированного анализа и синтеза ВРД на основе цепно-полевой математической модели высокой степени детализации, с возможностью расчета динамических и квазиустановившихся режимах работы.

#### 1.4. Методики анализа и синтеза вентильно-реактивных двигателей

За время исследований ВРД накоплен определенный опыт их проектирования и оптимизации. При этом большинство работ по оптимизации можно разделить на две группы. Первая группа – это оптимизация геометрических размеров ЭМП. Ко второй относятся работы, в которых оптимизируются параметры СУ. В данном случае под параметрами СУ понимаются углы коммутации, то есть углы включения и выключения, а также форма токовой волны в обмотке статора ВРД.

В [31] предлагается для решения оптимизационных задач использовать упрощенную методику расчета ВРД. В этом случае повышается скорость оптимизации за счет принятия допущений о ненасыщенном магнитопроводе. Работы [9, 40] для выработки рекомендаций по определению числа витков обмотки фазы и для определения главных размеров также используют упрощенные математические модели.

Современный уровень развития компьютерной техники позволяет применять МКЭ не только для выполнения поверочных расчетов магнитного поля ЭМП, но и использовать МКЭ при оптимизации геометрических размеров. Работы [13, 55, 63, 100, 110, 119] посвящены оптимальному проектированию ЭМП ВРД с использованием МКЭ.

В частности, в работе [100] для минимизации коэффициента пульсаций момента предлагается выполнять расширение полюса статора на границе ра-

бочего воздушного зазора (рис. 1.11). Авторы работы рассчитали пять вариантов и выбрали из них лучший.

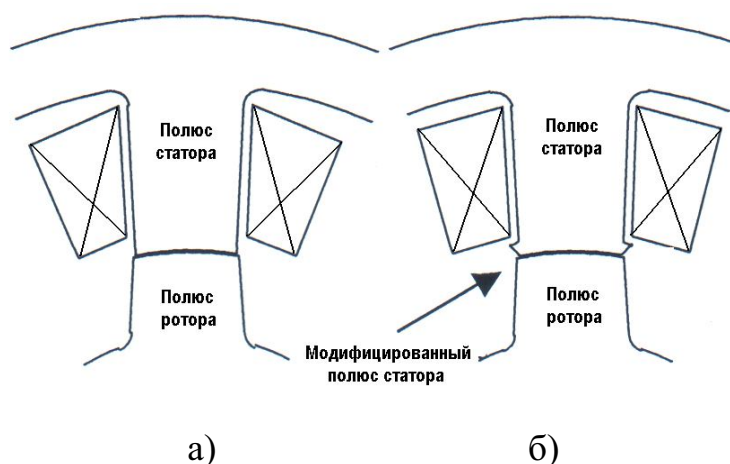


Рисунок 1.11 – Модификация полюса статора:

а – обычная форма полюса статора; б – модифицированный полюс статора

В работе [110] оптимизируется двухфазный ВРД конструкции 4/2 с расщепленным воздушным зазором. В качестве алгоритмов оптимизации используются две разновидности эволюционных алгоритмов. Варьированием размеров активной зоны ЭМП удалось уменьшить коэффициент пульсаций момента.

Определение оптимальной конфигурации зубцовой зоны и геометрических размеров активной зоны ЭМП выполнено в исследованиях [13, 55, 63]. При этом в работе [13] были использованы три варьируемых переменных: ширина полюсов статора и ротора, а также число витков обмотки статора, при этом рассчитано было шесть вариантов ЭМП.

МКЭ можно использовать не только для расчета магнитного поля в ЭМП, но и при решении тепловой задачи, по результатам которой можно проверять тот или иной вариант ВРД на ограничение по перегреву [119], а также анализировать вибрации в электрической машине [103].

Одна из проблем, с которой сталкиваются разработчики ВРД – это пульсации электромагнитного момента, которые вызваны различными при-

чинами: конструктивными особенностями, технологическими погрешностями, пульсациями напряжения в цепи питания и т.д.. Один из способов подавления пульсаций момента связан с выработкой определенных алгоритмов управления в СУ ВРД. В работах [37, 51, 92, 102, 117] предлагается уменьшить пульсации момента путем создания токовых волн заданной формы. В частности, в [102] для четырехфазного ВРД конструкции 8/6 изменение тока в фазе осуществляется по соотношению:

$$i_{\phi} = I_{\max} \sqrt{\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{m}\right)},$$

где:  $i_{\phi}$  – ток фазы,  $I_{\max}$  – максимальное значение тока фазы,  $m$  – число фаз ЭМП.

К недостаткам работы можно отнести отсутствие учета влияния насыщения магнитной цепи на характер электромагнитного момента. Кроме вышперечисленных способов в работе [37] предлагается вариант алгоритма управления с непосредственным формированием напряжений фаз.

Уменьшить пульсации электромагнитного момента можно также с помощью оптимизации углов включения/выключения фазы [24]. В работе [104] рассмотрен поиск оптимальных углов коммутации для двухфазного ВРД конструкции 4/2. Поиск оптимальных углов коммутации с использованием генетического алгоритма в среде Matlab выполнен в [105].

В работе [21] рассмотрены режимы торможения ВРД. Предложен комбинированный способ регулирования тормозного тока, который позволяет снизить потери энергии в динамических режимах работы двигателя.

Проведение исследований по оптимальному проектированию сопряжено с построением достаточно сложных математических моделей и их дальнейшим обчислением, для чего требуются большие затраты машинного времени. При этом исследователи для записи математических моделей используют среды моделирования типа Matlab или MathCAD, либо занимаются разработ-

кой собственных программных пакетов, написанных на языках высокого уровня таких как Microsoft Visual C++, Borland Delphi или Java.

Так как ВРД – электромеханотронное устройство, на его свойства и характеристики оказывают существенное влияние как основные геометрические размеры ЭМП, так и параметры системы управления. В связи с этим проведение исследований по выбору и оптимизации активной зоны ЭМП ВРД, а также определению оптимальных параметров и алгоритмов работы системы управления являются важными и необходимыми [50, 64].

В данной диссертационной работе предлагается три направления для получения оптимальной конструкции ВРД:

1. выбор конфигурации зубцов статора и ротора;
2. определение коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора;
3. оптимизация параметров коммутации (углов включения и выключения).

### 1.5. Выводы

Целью диссертационной работы является синтез высокоэффективных регулируемых ВРД малой мощности.

По теме диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать высокоточные полевые и цепно-полевые математические модели для исследования динамических и квазиустановившихся режимов работы ВРД, учитывающих реальную геометрию ЭМП и нелинейность процессов электромеханического преобразования энергии.

2. Разработать систему автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD на основе цепно-полевой математической модели высокой степени детализации, с учетом динамических и квазиустановившихся режимов, которая должна содержать следующие подсистемы: предварительного расчета, параметризации геометрии ЭМП ВРД и расчета магнитного поля МКЭ, расчета динамических и квазиустановившихся процессов и оптимизации. Также система SRM-CAD

должна обеспечивать синтез различных конструктивных исполнений ЭМП ВРД.

3. Выполнить идентификацию ММ параметров и проверку адекватности разработанных математических моделей и программного обеспечения на основании экспериментальных исследований.

4. Применить численное моделирование тепловых полей методом конечных элементов в двухмерной постановке задачи для определения температурного поля ВРД с учетом реальной геометрии ЭМП.

5. Выполнить синтез геометрии электромеханического преобразователя малой мощности, а также параметров системы управления ВРД.



## РАЗДЕЛ 2

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1. Математическая модель электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя на базе уравнений магнитного поля

Успешное решение задач анализа и синтеза вентильно-реактивных двигателей в значительной степени зависит от адекватности математических моделей электромеханических и тепловых процессов в таких системах. Поэтому актуальной задачей является разработка новых и усовершенствование существующих математических моделей ВРД [87].

Математическая модель является приближенным представлением реальных объектов, процессов или систем, выраженным в математических терминах и сохраняющим существенные черты оригинала [18]. В применении к электрической машине, математическая модель должна описывать процессы преобразования электрической энергии в механическую.

Рассмотрим условия, при выполнении которых осуществляется преобразование электрической энергии в механическую во вращающихся электрических машинах [25]:

- при непрерывном вращении ротора двигателя, через вал которого передается механическая энергия;
- при протекании по обмоткам машины токов, частоты которых определенным образом связаны между собой и с угловой скоростью ротора;
- при периодическом изменении тех магнитных потоков, которые сцеплены с обмотками, преобразующими энергию.

А это означает, что в двигателе часть энергии будет рассеиваться в виде механических, электрических и магнитных потерь.

Рассмотрим преобразование энергии в ЭМП ВРД для двигательного режима, представленное в виде диаграммы мощностей (рис. 2.1).

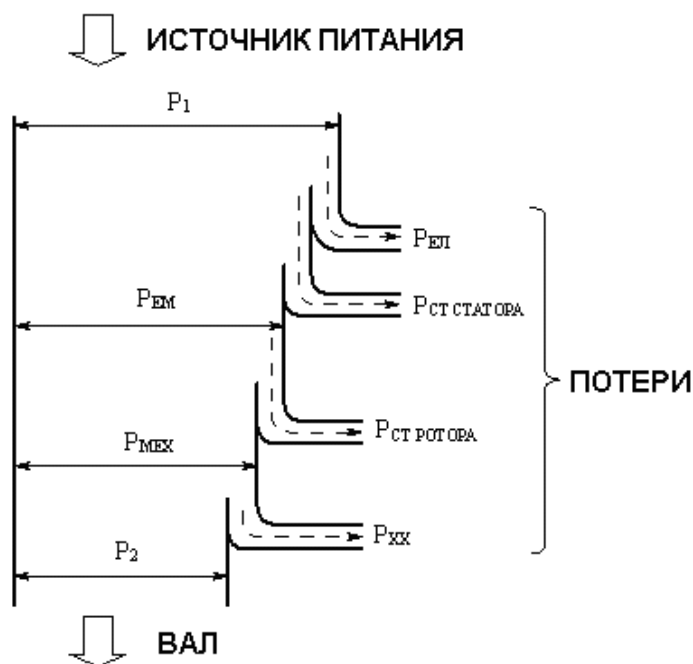


Рисунок 2.1 – Диаграмма мощностей для ВРД в режиме двигателя

где  $P_1$  – потребляемая мощность;

$\Delta P_{ЭЛ} = I^2 \cdot R$  – электрические потери;

$\Delta P_{СТ\_СТАТОРА}$ , – магнитные потери в статоре;

$P_{ЕМ}$  – электромагнитная мощность;

$\Delta P_{СТ\_РОТОРА}$  – магнитные потери в роторе;

$P_{МЕХ}$  – механическая мощность;

$\Delta P_{ХХ} = \omega \cdot M_{ХХ}$  – механические потери холостого хода;

$P_2 = \omega \cdot M_H$  – полезная мощность.

В этом случае КПД определяется по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P_{ХХ} + P_2 + \Delta P_{ЭЛ} + \Delta P_{СТ}}$$

Магнитные потери в стали статора и ротора ЭМП ВРД возникают в результате периодического изменения во времени магнитного потока. При этом магнитные потери состоят из потерь на перемагничивание (гистерезис) и потерь на вихревые токи (токи Фуко). На сегодня применяется отработанная методика для расчета магнитных потерь в общепромышленных электрических

машинах. Эта методика заключается в определении удельных магнитных потерь для 1 кг массы листовой стали при пульсационном перемагничивании частотой 50 Гц и индукции 1 Тл (в некоторых случаях используется частота 400 Гц и другие значения индукции), измеряемых экспериментально с помощью аппарата Эпштейна. Зная удельные магнитные потери можно определить потери при других частотах и индукциях по формуле Штейнмеца:

$$\Delta p_i = \varepsilon \frac{f}{50} B^2 + \sigma \left( \frac{f}{50} \right)^2 B^2,$$

где  $\varepsilon$  – удельные потери от гистерезиса при  $B=1$  Тл и  $f=50$  Гц, Вт/кг;

$\sigma$  – удельные потери от вихревых токов при  $B=1$  Тл и  $f=50$  Гц, Вт/кг.

Значения  $\varepsilon$  и  $\sigma$  зависят от марки электротехнической стали и определяются по справочнику.

Удельные магнитные потери в листах электротехнической стали измеряются в определенных условиях: при идеальной изоляции между листами, с обязательным отжигом стали после механической обработки (резки стали с помощью ножниц или штамповки), при синусоидальном изменении индукции. Следует отметить, что при промышленном производстве электрических машин технология изготовления магнитопровода менее совершенна. Поэтому увеличение потерь в элементах магнитопровода вследствие несовершенства технологии учитывается технологическими коэффициентами повышения потерь. При расчете потерь в отдельных элементах магнитопровода приходится считаться также и с тем, что индукция при пульсационном перемагничивании изменяется несинусоидально [25]. Кроме несинусоидального изменения индукции, нужно учитывать широкий диапазон изменения частоты перемагничивания. На высоких скоростях вращения магнитные потери оказывают значительное влияние на энергетические и эксплуатационные показатели ВРД. Поэтому при моделировании динамических и квазиустановившихся режимов работы двигателя учет этого вида потерь очень важен.

В литературе [8, 14, 15, 26, 87, 109, 112, 118] приведены методики и алгоритмы расчета потерь в стали ЭМП ВРД, которые не позволяют прийти к однозначному решению. В [8, 14, 15] расчет потерь в стали ЭМП выполняется заменой несинусоидальной формы индукции эквивалентной синусоидальной, либо несколькими синусоидальными гармониками, что позволяет применить при расчете стандартную методику [26]. Данный подход требует громоздких преобразований, что приводит к усложнению модели для расчета динамических режимов работы ВРД и кроме того, точность расчета зависит от числа учитываемых гармоник. В [118] предложена методика расчета потерь в стали при помощи электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в отдельно взятой пластине пакета ротора или статора. Этот метод учитывает потери при условии полной изоляции пластин друг от друга, однако в реальных условиях достичь этого практически невозможно. В [87, 109, 112] расчет производится по стандартной методике, когда общие потери в стали электрической машины будут состоять из суммы потерь на отдельных участках ее магнитной системы.

При моделировании ЭМП ВРД возникает вопрос учета магнитных потерь. Однозначной методики учета при этом не существует. Учет потерь в магнитопроводе при моделировании по [87] сводится к определению параметров ветви, характеризующей магнитные потери в схеме замещения для одной из фаз ЭМП. Определение активного сопротивления ветви основывается на величине ЭДС, полученной при допущении о ее синусоидальности, что не позволяет с достаточной степенью точности судить о влиянии потерь в стали на динамические характеристики ЭМП. В работе [19] предлагается ввести в ММ фиктивную величину – мгновенное падение электромагнитного момента за счет ослабления потокосцепления при наличии потерь в стали. При этом магнитные потери определяются для четырех участков магнитопровода, перемагничивание в зубцах и ярме статора не учитывается. Значение средней индукции определяется для реальной геометрии с использованием МКЭ.

Магнитные потери в магнитопроводе ЭМП ВРД зависят от соединения катушек фаз, т.к. от этого зависит частота перемагничивания ярма статора. Ес-

ли все фазы имеют противоположные по отношению друг к другу направления создаваемого магнитного потока, то частота перемагничивания участков ярма ротора будет в  $1.5 \div 2$  раза выше, чем при одинаковом направлении создаваемого магнитного потока катушками фаз [19].

Рассмотрим магнитную систему трехфазного ВРД классической конструкции с шестью полюсами на статоре и четырьмя полюсами на роторе, для которого рассмотрим распределение магнитной индукции в 12 участках, обозначенных на рис. 2.2 цифрами [109].

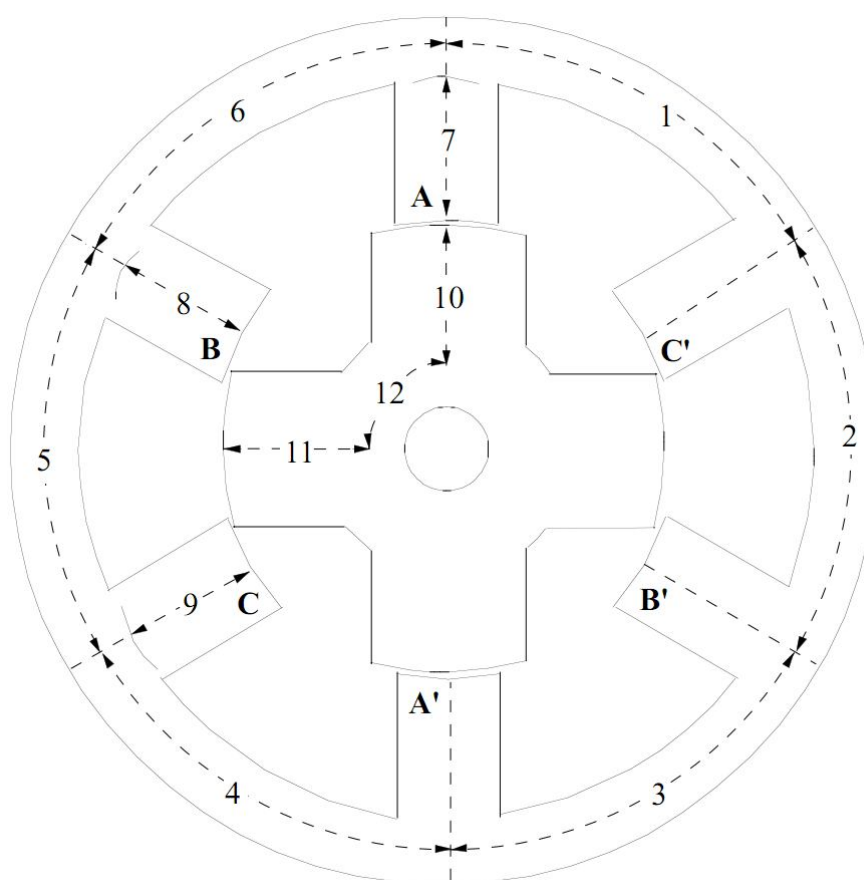


Рисунок 2.2 – Магнитная система трехфазного ЭМП ВРД конструкции 6/4

На рисунках 2.3 и 2.4 показаны диаграммы изменения магнитной индукции от угла положения ротора для различных участков магнитной системы трехфазного ВРД конструкции 6/4 [109].

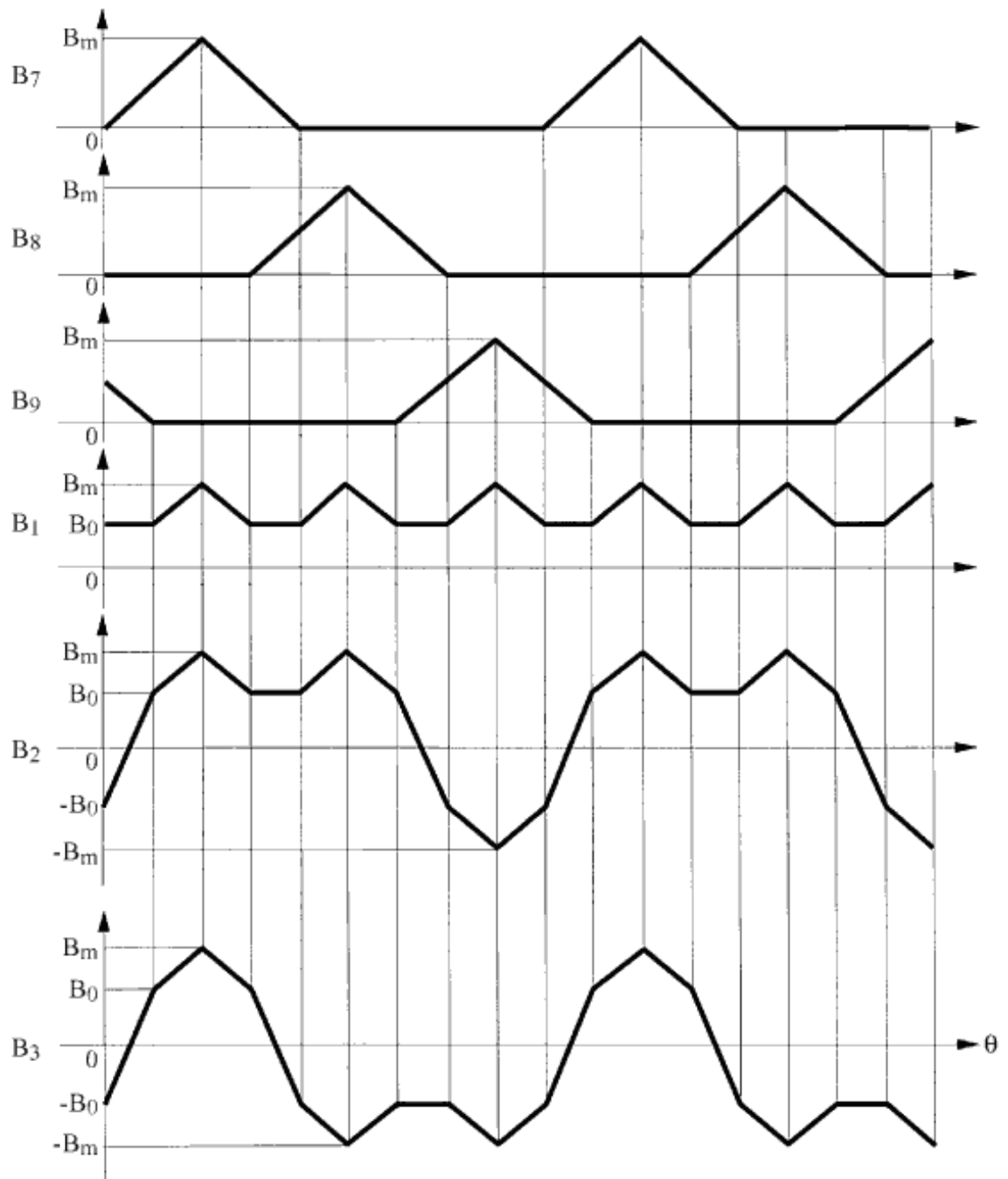


Рисунок 2.3 – Диаграммы изменения магнитной индукции в статоре ЭМП ВРД от угла положения ротора в различных участках магнитной системы

где:

- $B_7, B_8, B_9$  – магнитная индукция в полюсах статора;
- $B_1, B_2, B_3$  – магнитная индукция в различных участках спинки статора.

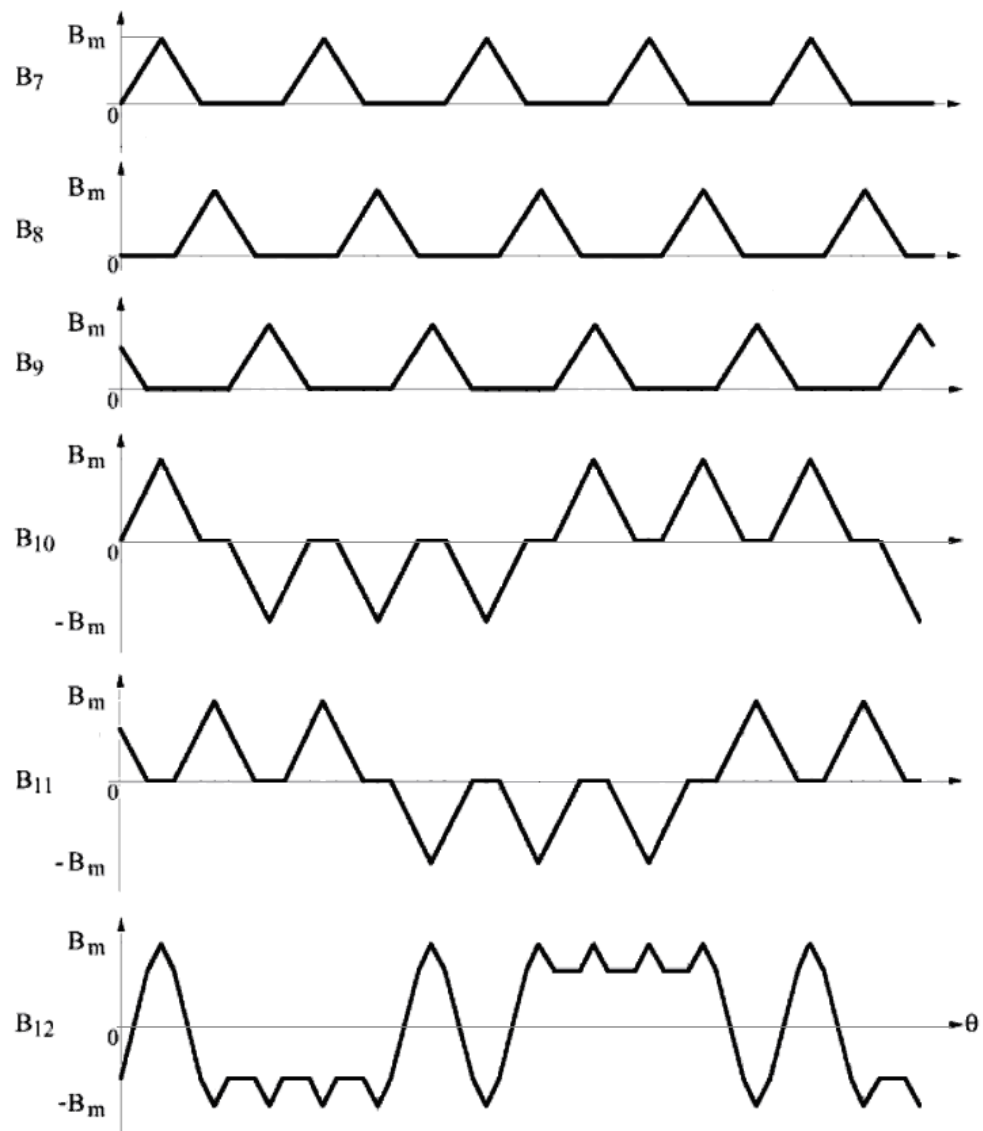


Рисунок 2.4 – Диаграммы изменения магнитной индукции в статоре и роторе ЭМП ВРД от угла положения ротора в различных участках магнитной системы

где:

- $B_7, B_8, B_9$  – магнитная индукция в полюсах статора;
- $B_{10}, B_{11}$  – магнитная индукция в полюсах ротора;
- $B_{12}$  – магнитная индукция в спинке ротора.

Из рисунков 2.3 и 2.4 видно, что индукция изменяется несинусоидально и с большой частотой (например, при частоте вращения ротора 3000 об/мин частота перемагничивания составляет 600 Гц). Для учета магнитных потерь пред-

лагается разбить ЭМП ВРД на участки. Для каждого из участков рассчитывать индукцию и частоту перемагничивания. Индукцию принимать равной половине от ее максимального значения, которое определяется с использованием численных методов расчета магнитного поля.

Математическая модель, которая описывает режимы работы реактивного ЭМП с учетом потерь в стали, представляет собой систему дифференциальных и линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_{\phi} = i_{\phi} \cdot R_{\phi} + \frac{d\Psi_{\phi}}{dt} \\ M_{EM} = (M_H + M_{XX}) + (J_{ДВ} + J_M) \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ i_{СТ} = \frac{\Delta P_{СТ}}{U_{\phi}} \\ i_D = i_{СТ} + i_{\phi} \end{cases} \quad (2.1)$$

где:  $U_{\phi}$  – напряжение фазы ВРД,

$i_D$  – ток потребляемый ВРД,

$i_{\phi}$  – ток фазы,

$R_{\phi}$  – сопротивление фазы,

$\Psi_{\phi}$  – потокосцепление фазы,

$M_{EM}$  – результирующий электромагнитный момент от действия всех фаз,

$M_H$  – момент сопротивления,

$M_{XX}$  – момент сопротивления холостого хода,

$J_{ДВ}$  – момент инерции ротора,

$J_M$  – приведенный момент инерции механизма,

$\omega$  – угловая скорость ротора,

$t$  – время,

$i_{СТ}$  – эквивалентный ток, учитывающий потери в стали,

$\Delta P_{СТ}$  – потери в стали.



Первое уравнение системы (2.1) – дифференциальное уравнение электрического равновесия, записанное для каждой из фаз ЭМП при допущении о том, что фазы независимы в магнитном отношении, а сама магнитная система – симметрична относительно фаз. Второе уравнение системы (2.1) – дифференциальное уравнение механического равновесия движущихся частей ЭМП. Третье уравнение системы – расчет тока, соответствующий потерям в стали, и четвертое уравнение – определение потребляемого ВРД тока с учетом потерь в стали.

Решение системы (2.1) позволяет получить динамические характеристики ЭМП  $I_\phi, M_{EM}, \omega = f(t)$ , а также построить его механическую характеристику  $\omega = \varphi(M)$ . Очевидно, что для решения системы (2.1) вначале нужно получить зависимости:

$$\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta), \quad (2.2)$$

$$M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta). \quad (2.3)$$

Зависимости (2.2)÷(2.3) существенно нелинейные, что определяется принципом работы и геометрическими особенностями ЭМП. Наиболее быстро и точно их можно получить путем численного расчета магнитного поля методом конечных элементов, на базе полевой математической модели. Для получения этих зависимостей необходимо рассчитать магнитное поле для ряда положений ротора относительно статора [82].

Теория электромагнетизма предлагает несколько способов определения электромагнитного момента (ЭММ)  $M_{EM}$  [26]: через изменение энергии или ко-энергии при малом перемещении, через тензор натяжений и через объемную и поверхностную плотность электромагнитных сил. При расчете магнитного поля ЭМП ВРД численным методом предпочтительно использовать второй и третий способы, как более точные и менее трудоемкие [68]. Через натяжения в магнитном поле ЭММ определяется следующим образом:

$$\bar{M} = \oint_S \left[ \bar{r} \cdot \bar{T}_n \right] dS ,$$

где  $S$  – поверхность, охватывающая объем  $V$ , на который действует электромагнитная сила;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, связывающий начало системы координат с элементом  $dS$  поверхности  $S$ ;  $\vec{T}_n$  – сила натяжения, действующая извне на единицу поверхности  $S$ , внешняя нормаль к которой направлена по вектору  $\vec{n}$ .

Выражение для силы натяжения на произвольно ориентированной в магнитном поле поверхности можно представить как:

$$\vec{T}_n = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left( \vec{B} B_n - \frac{1}{2} B^2 \vec{n} \right),$$

где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции в рассматриваемой точке поверхности  $S$ ;  $\mu_0 \mu_r$  – магнитная проницаемость среды в этой точке;  $B_n$  – нормальная составляющая магнитной индукции.

Точность расчета ЭММ методом натяжений существенно зависит от пространственного положения поверхности интегрирования и степени дискретизации расчетной области [32, 42, 70]. С целью устранения влияния указанных факторов на результаты расчета ЭММ в [68, 99] предложена модификация метода натяжений, названная в англоязычной литературе методом “eggshell”, идея которого состоит в построении семейства концентрических эквивалентных поверхностей для оценки ЭММ через тензор натяжений с последующим их усреднением [106].

В общей постановке задача расчета двумерного стационарного магнитного поля с учетом нелинейных магнитных свойств сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных [3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta, \quad (2.4)$$

где  $A_z$  – составляющая векторного магнитного потенциала по оси  $z$ ,

$\nu = 1/\mu$  – величина, обратная магнитной проницаемости среды.

Решить уравнение (2.4) можно, используя метод конечных разностей [22] и МКЭ [38, 81]. Преимущество МКЭ над методом конечных разностей состоит в возможности произвольного расположения расчетных точек и конечных элементов, что позволяет с более высокой точностью описывать сложную геометрию электрической машины. Это привело к появлению различного программного обеспечения на основе МКЭ как коммерческого характера, так и некоммерческого.

К популярным программам расчета полей можно отнести ANSYS [7, 74], FEMLAB [94] и COSMOSWorks [2]. Однако высокая стоимость этих систем является сдерживающим фактором при их распространении в Украине.

Из некоммерческого программного обеспечения по решению двумерных задач расчета магнитного поля можно выделить пакет FEMM [6, 101]. FEMM – это решатель задач магнитостатики, электростатики и теплостатики, который мало в чем уступает многим коммерческим продуктам. Пакет состоит из препроцессора, генератора сетки конечных элементов, решателя и постпроцессора. В препроцессоре осуществляется подготовка геометрии исследуемой области, присвоение расчетным областям признаков сред и задание граничных условий. Кроме встроенного редактора геометрии модели программа позволяет импортировать уже готовую геометрию в формате dxf, подготовить который можно в распространенной программе AutoCAD [90] фирмы Autodesk. Разбиение расчетной области на конечные элементы выполняется встроенной программой triangle, при этом не накладывается никаких ограничений на количество расчетных узлов и элементов. Ограничение связано только с объемом оперативной памяти на используемом компьютере. Решение задачи расчета полей выполняется внешней программой-решателем, для решения системы линейных алгебраических уравнений используется метод сопряженных градиентов. Постпроцессор выполняет обработку результатов решения задачи и их визуализацию. В частности, можно определить электромагнитные силы и моменты, в том числе рассчитать ЭММ с использованием метода “eggshell”, энергии и коэнергии

магнитного поля, индуктивности и взаимоиндуктивности контуров, определить потокосцепление, момент инерции и т.д. FEMM – это инструмент исследователя, поэтому особенно важна возможность автоматизации взаимодействия с ним. Для этого в него встроен скриптовый язык Lua [116], организована возможность взаимодействия со средой MatLab посредством библиотеки OctaveFEMM, а для межпрограммного взаимодействия используется технология ActiveX. Применение скриптового языка Lua позволяет автоматизировать процесс решения задачи с выдачей результатов в текстовый файл, либо в виде графических зависимостей. Все вышеперечисленное позволяет проводить оптимизационные расчеты ЭМП, базируясь на полевой математической модели объекта проектирования и, тем самым, существенно повысить точность проектных расчетов [65]. Программа расчета FEMM постоянно развивается и обновляется, на сегодняшний день на сайте разработчика [79] доступна версия 4.2, в которую, по сравнению с предыдущей версией, добавлена возможность расчета тепловых полей.

На рис. 2.5 показана конечно-элементная аппроксимация поперечной геометрии и распределение магнитного поля 4-х фазного ЭМП классической конструкции 8/6 с внешним диаметром статора 80 мм. Данный ВРД выпускается под обозначением SRM-80-110-LA [48] и относится к малым электрическим машинам.

Число узлов конечно-элементной сетки в среднем составляет 16000, число треугольных элементов – 31000, что позволяет достаточно подробно аппроксимировать поперечную геометрию ЭМП ВРД. При расчете смещение ротора осуществляется от полностью рассогласованного положения к согласованному. Как иллюстрация результатов решения полевой задачи представлено распределение магнитного поля в ЭМП (рис. 2.5), что соответствует полностью согласованному положению, при этом угол смещения оси ротора относительно оси возбужденной фазы статора  $\Theta = 30^\circ$ .

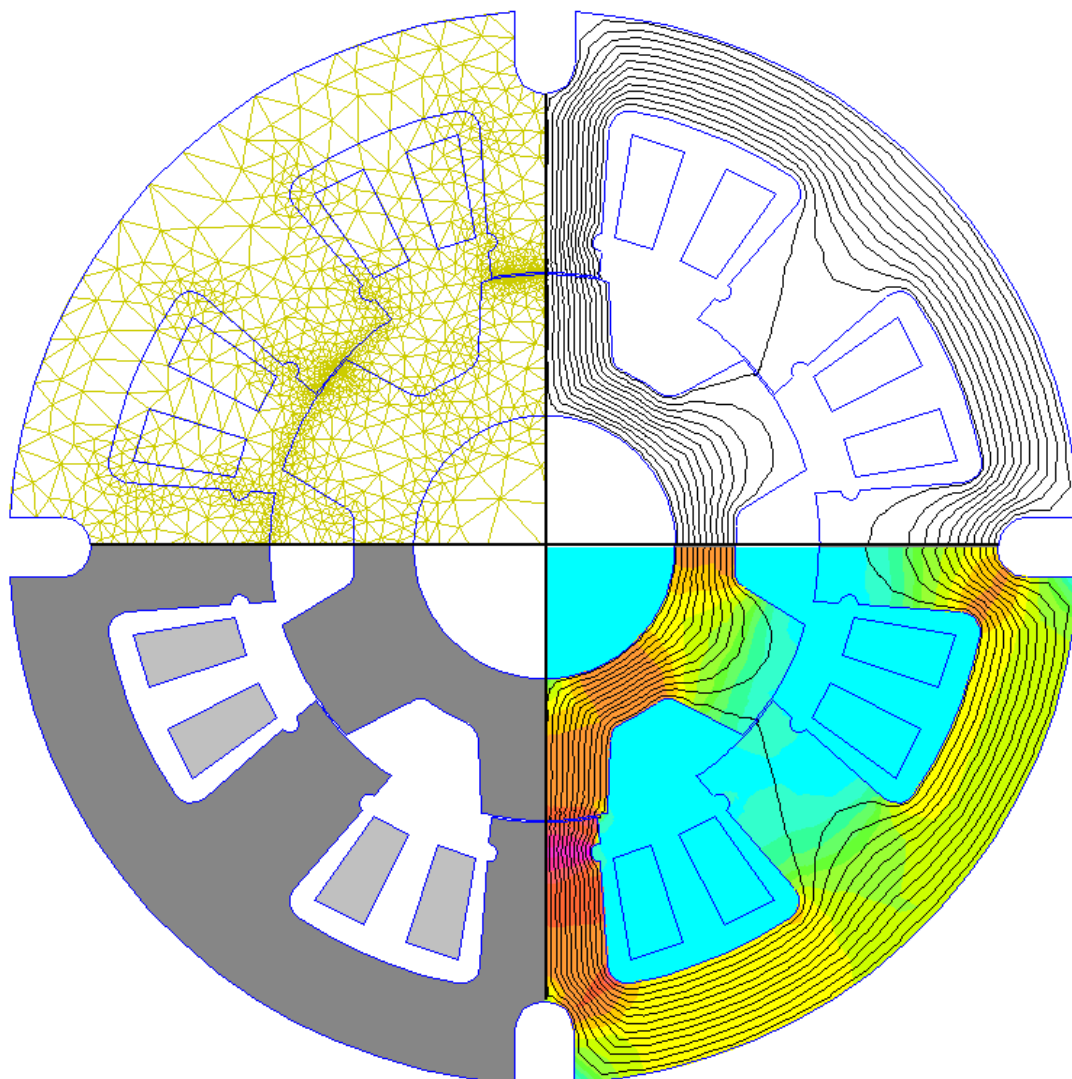
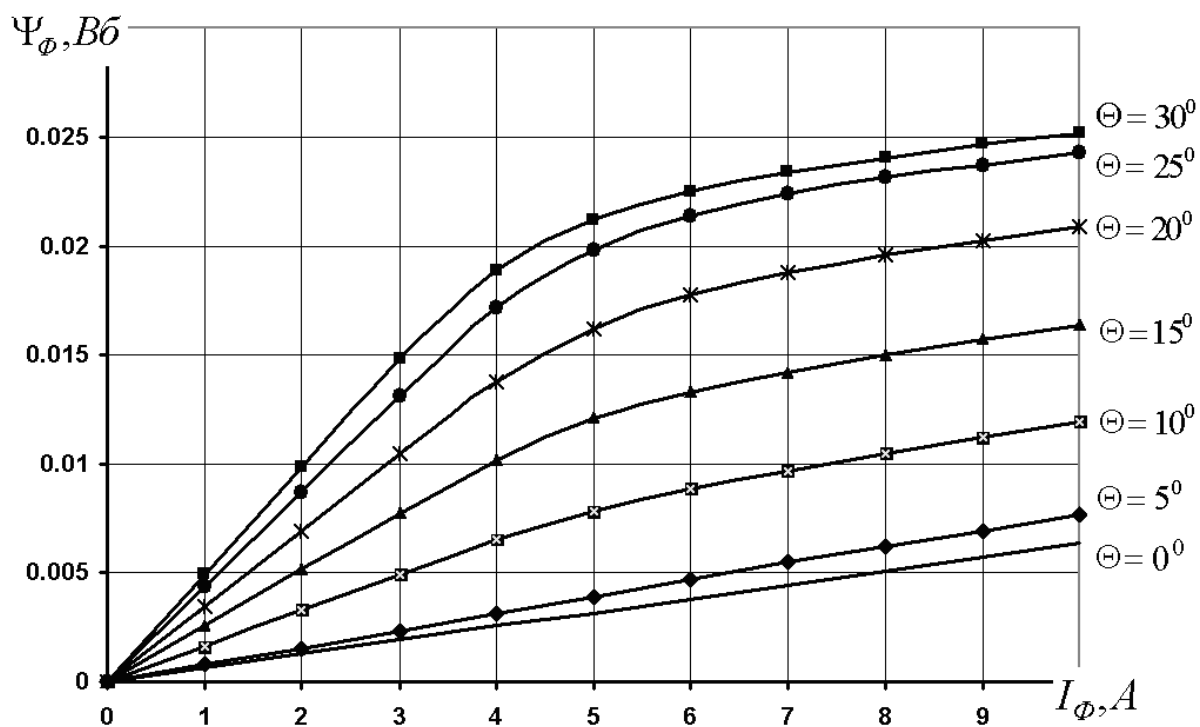
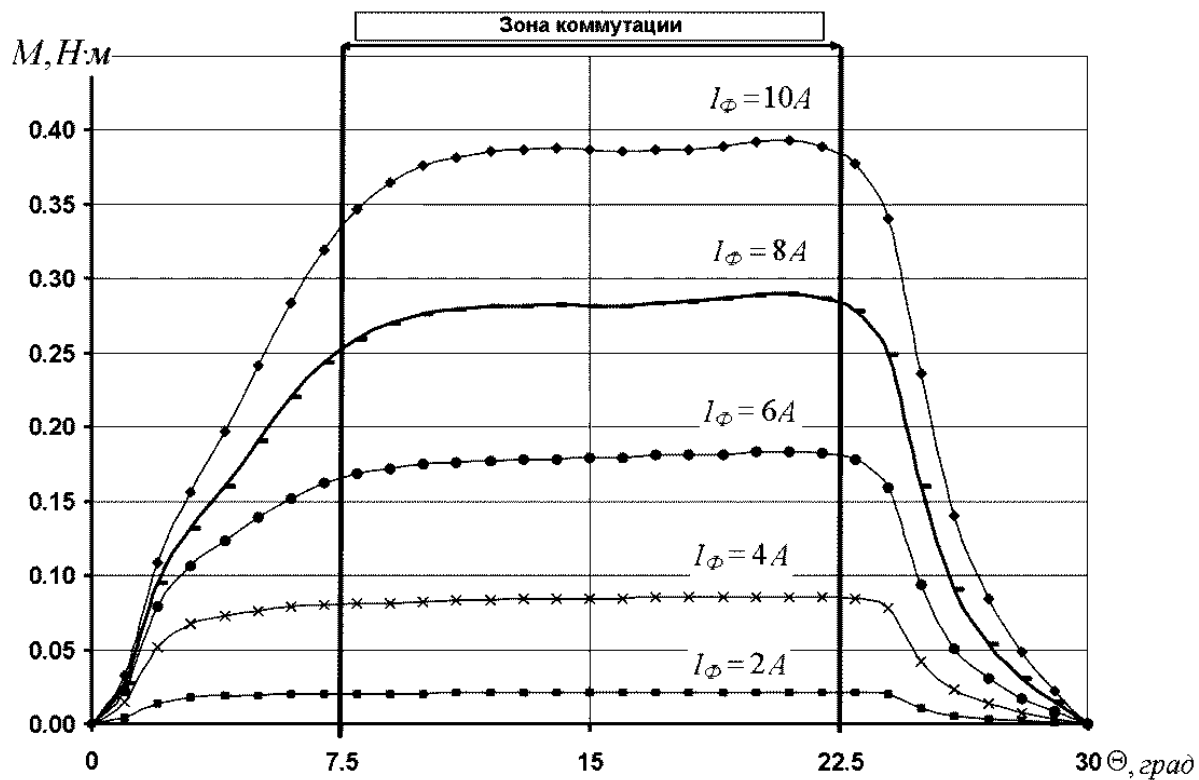


Рисунок 2.5 – Конечно-элементная аппроксимация поперечной геометрии и распределение магнитного поля и индукции в ЭМП ВРД

По результатам расчета магнитного поля определяются зависимости (2.2) (рис. 2.6) и (2.3) (рис. 2.7).

Среди зависимостей  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta)$  особое значение имеют те, которые соответствуют полностью согласованному и рассогласованному положению полюсов статора и ротора.

Рисунок 2.6 – Зависимости  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta)$ Рисунок 2.7 – Зависимости  $M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta)$

Зависимость, которая соответствует полностью рассогласованному положению полюсов, имеет линейный характер. Это объясняется относительно большим воздушным зазором между статором и ротором и, как следствие этого, ненасыщенностью магнитной системы во всем рабочем диапазоне токов. При согласованном положении зазор небольшой и увеличение магнитодвижущей силы катушек приводит к быстрому насыщению полюсов, после которого рост тока уже не приводит к значительному изменению потокосцепления. Зависимость, соответствующая какому-нибудь другому положению ротора, занимает на плоскости  $(\Psi, i)$  промежуточное положение между описанными зависимостями.

В результате решения системы уравнений (2.1) с использованием зависимостей (2.2) и (2.3) можно выполнить анализ переходных процессов в ВРД и определить следующие зависимости от времени:

- напряжений и токов фаз, а также тока источника;
- потокосцепления фаз;
- моментов фаз и суммарного момента двигателя;
- скорости двигателя;
- полезной и потребляемой мощности, а также мощности потерь;
- потребленной энергии от источника за время пуска и отдаваемой энергии источнику при торможении.

При моделировании квазиустановившихся режимов работы ВРД можно определить:

- установившуюся скорость;
- значения потребляемой и полезной мощностей;
- электрических и механических потерь;
- величину КПД ВРД;
- средний момент с оценкой величины пульсаций момента;
- механическую характеристику;
- рабочие характеристики ВРД.

## 2.2. Проверка адекватности математической модели на базе уравнений магнитного поля

Для проверки адекватности приведенной выше математической модели (2.1 – 2.3), был выполнен сравнительный анализ результатов моделирования и эксперимента.

В качестве объекта исследования выступает ВРД SRM-80-200 производства ООО “Электротехника – Новые технологии” [48]. Это четырехфазный ВРД классической конструкции. Соотношение чисел полюсов статора к ротору – 8/6. В качестве листов статора и ротора была применена электротехническая сталь марки 2211 с толщиной листа 0.5 мм. Обмотка ЭМП состоит из восьми сосредоточенных катушек. Каждая фаза состоит из двух последовательно соединенных катушек. Для определения текущего положения ротора используется магнитный двухканальный датчик положения. Зона коммутации составляет 15 градусов с углами включения  $\theta_{ON} = 7.5^\circ$  и выключения  $\theta_{OFF} = 22.5^\circ$  (см. рис. 2.7). Внешний вид ЭМП и опытный образец системы управления SRM-80-200 представлен на рис. 2.8. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.1.



Рисунок 2.8 – Опытный образец ВРД SRM-80-45



Таблица 2.1 – Основные технические характеристики SRM-80-200

Технические данные	Значения
Внешний диаметр ЭМП, мм	82
Длина активной части ЭМП, мм	45
Величина воздушного зазора ЭМП, мм	0.15
Номинальный момент, Н·м	0.3
Номинальное напряжение, В	220
Номинальная частота вращения, об/мин.	6000
Масса ЭМП ВРД, кг	2
Способ охлаждения	IC0040
Степень защиты двигателя	IP54

Сравнительный анализ результатов математического моделирования и эксперимента выполнялся по рабочим характеристикам, которые получены при работе на естественной механической характеристике. Сравнивались такие величины, как: скорость ( $n$ ), ток источника питания ( $I$ ) и КПД ( $\eta$ ). Для математического моделирования приведены два типа значений – с учетом потерь в стали и без. Результаты сравнения скоростей приведены в таблице 2.2, токов в таблице 2.3 и КПД в таблице 2.4. Также в таблицах приведено отличие, в процентах, между результатами эксперимента и моделирования (отдельно для результатов с учетом потерь в стали и без).

Графическая интерпретация сопоставления результатов моделирования с учетом потерь в стали и эксперимента приведена ниже. На рис. 2.9. приведено сравнение механических характеристик, на рис. 2.10 сопоставление тока, потребляемого от источника, на рис. 2.11 – сравнение КПД.

Таблица 2.2 – Сравнение механических характеристик при моделировании и эксперименте

$M, Н\cdot м$	$n$ эксп. об/мин	$n$ мод., об/мин (с учетом. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta n, \%$	$n$ мод., об/мин (без учета. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta n, \%$
0.31	6040	5872	3	5633	7
0.35	5878	5763	2	5537	6
0.42	5620	5523	2	5363	5
0.51	5210	5182	1	4986	4
0.67	4700	4720	1	4498	4
0.80	4350	4406	1	4196	4

Таблица 2.3 – Сравнение токов при моделировании и эксперименте

$M, Н\cdot м$	$I$ эксп., $A$	$I$ мод., $A$ (с учетом. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta I, \%$	$I$ мод., $A$ (без учета. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta I, \%$
0.31	3.20	2.90	9	2.7	16
0.35	3.35	3.05	9	2.76	18
0.42	3.70	3.43	7	2.92	21
0.51	4.10	3.92	4	3.15	23
0.67	4.70	4.53	4	3.95	16
0.80	5.10	4.96	3	4.66	9

Таблица 2.4 – Сравнение КПД при моделировании и эксперименте

$M, Н\cdot м$	$\eta$ эксп., %	$\eta$ мод., о.е. (с учетом. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta \eta, \%$	$\eta$ мод., о.е. (без учета. $\Delta P_{CT}$ )	$\Delta \eta, \%$
0.31	0.50	0.54	7	0.56	12
0.35	0.54	0.58	7	0.61	13
0.42	0.56	0.59	5	0.67	20
0.51	0.57	0.59	3	0.70	23
0.67	0.58	0.61	5	0.67	16
0.80	0.6	0.62	3	0.63	5

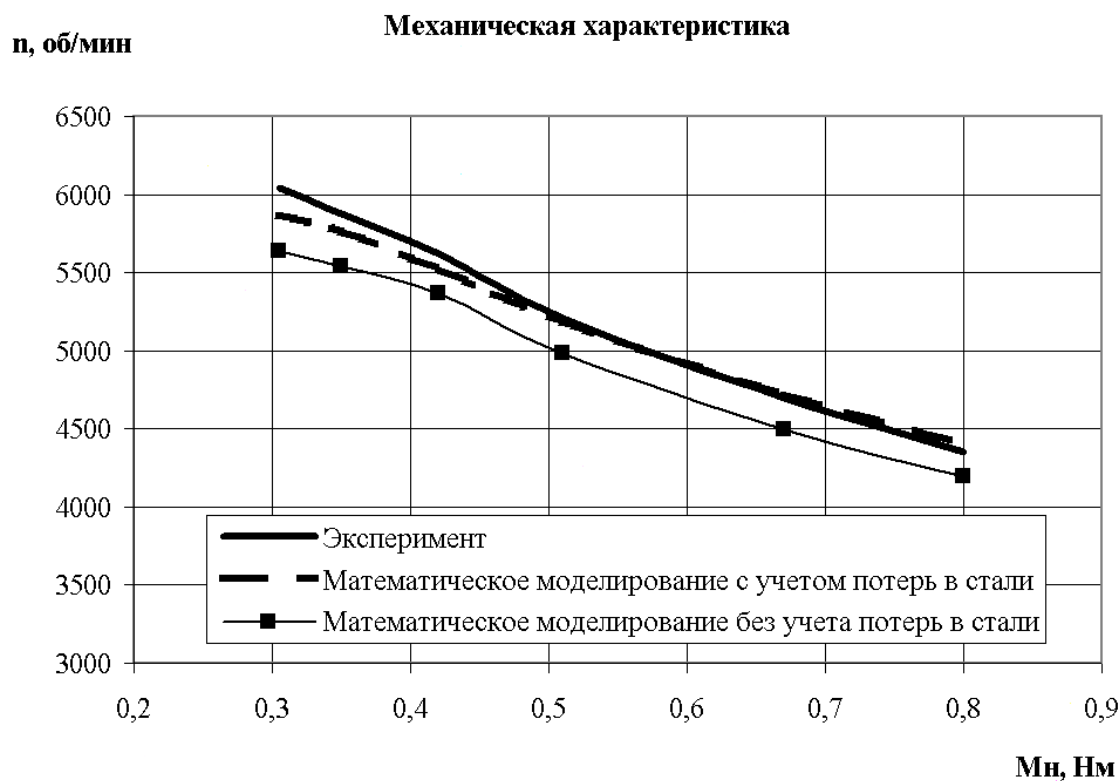


Рисунок 2.9 – Зависимость  $\omega = f(M)$

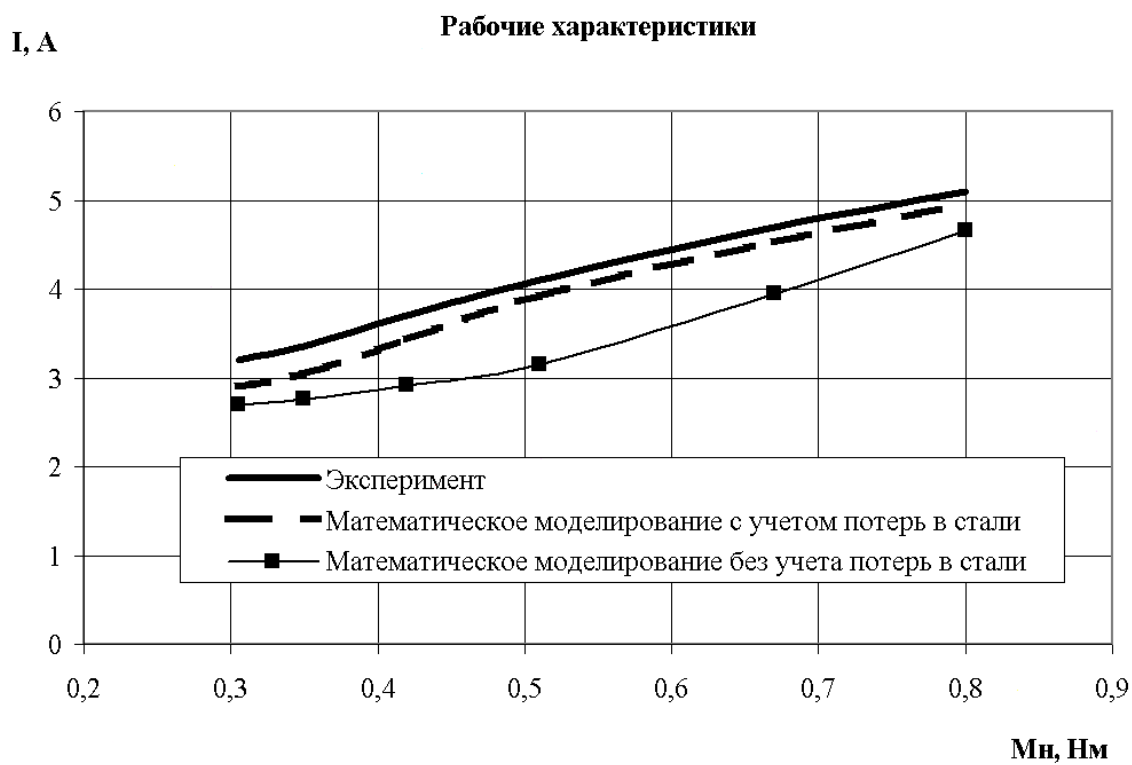


Рисунок 2.10 – Зависимость  $I = f(M)$

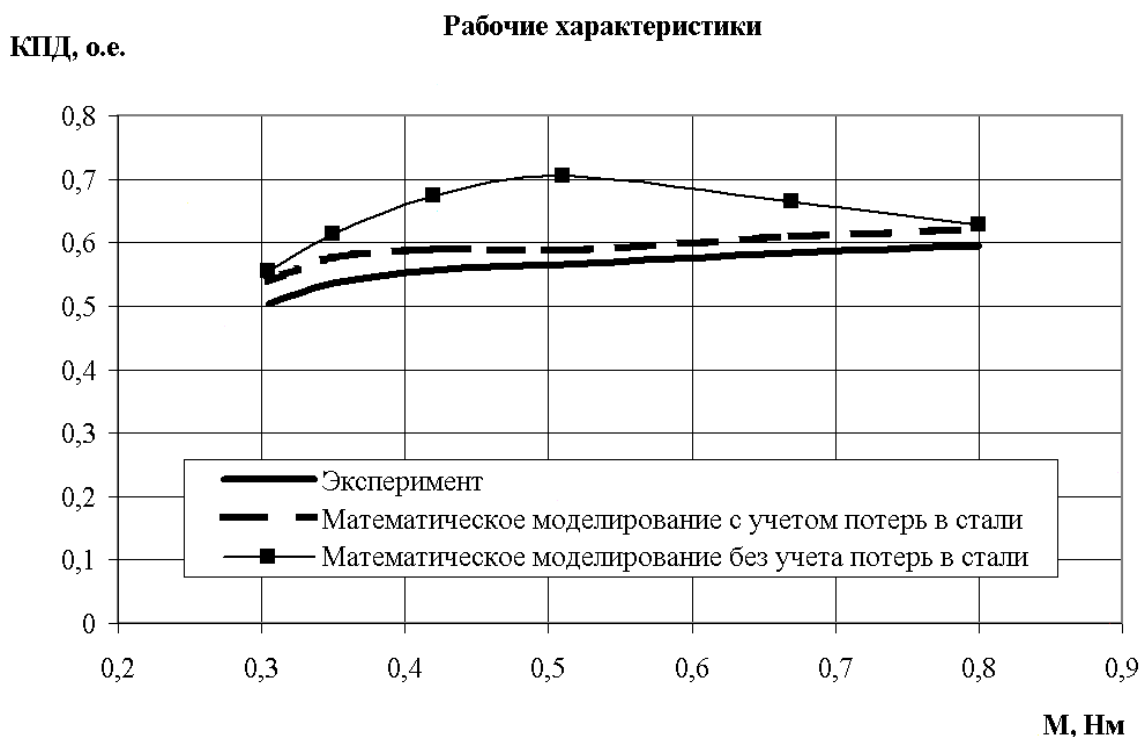


Рисунок 2.11 – Зависимость  $\eta = f(M)$

Сравнение результатов эксперимента и математического моделирования, учитывающего влияние магнитных потерь в стали, показывает максимальное отличие по току источника питания 9 %, по КПД 7 % и по скорости 3 %. Это говорит о достаточной адекватности предложенной математической модели и возможности ее применения для дальнейших проектных и оптимизационных исследований.

Приведенные данные моделирования без учета потерь в стали показывают существенное отличие от результатов эксперимента и подтверждают важность учета таких потерь. Можно отметить, что чем выше скорость ВРД, тем существеннее будет разница в результатах моделирования с учетом потерь в стали и без него.

Преобразование энергии в электрических машинах происходит с электрическими и магнитными потерями, которые проявляются в виде нагрева, что может привести к перегреву как отдельных элементов, так и электродвигателя в целом. Так как превышение допустимых значений нагрева оборудования снижает срок службы и качество его функционирования, определение и анализ температуры основных элементов электродвигателя от параметров и режимов его работы имеют большое значение [27, 62].

### 2.3. Математическое моделирование теплового поля вентильно-реактивного двигателя

На сегодняшний день наиболее точно рассчитать тепловое поле в электрической машине можно с использованием численных методов расчета тепловых полей методом конечных элементов. Рассмотрим математическую постановку задачи расчета теплового поля. Основой расчета двумерных стационарных температурных полей МКЭ является общее дифференциальное уравнение теплопроводности [10, 69, 95], которое в декартовой системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( r \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q; \quad (2.5)$$

граничные условия, учитывающие конвективный теплообмен,

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y - \alpha (T - T_{oc}) = 0; \quad (2.6)$$

граничные условия первого рода,

$$T|_x = T^*; \quad (2.7)$$

граничные условия второго рода,

$$\frac{\partial T}{\partial N} = 0. \quad (2.8)$$

где:  $\lambda_x, \lambda_y$  – коэффициенты теплопроводности в текущей точке расчетной области в направлении осей координат  $x$  и  $y$  соответственно;

$T(x, y)$  – искомая функция распределения температуры;

$q$  – объемная плотность источников нагрева;

$e_x, e_y$  – направляющие косинусы нормали теплоотдающей поверхности по отношению к осям координат;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией в окружающую среду;

$T_{oc}$  – температура окружающей среды;

$N$  – нормаль к внешней теплоотдающей поверхности;

$T|_x$  – температура на границе расчетной области;

$T^*$  – известное значение температуры на границе расчетной области.

В результате решения уравнения (2.5) с граничными условиями (2.6 – 2.8) определяется искомое температурное поле для заданного сечения анализируемой электрической машины в установившемся тепловом режиме.

В качестве объекта исследования рассматривался ВРД SRM-57-100 производства ООО “Электротехника – Новые технологии” [48] (рис. 2.12). Это четырехфазный ВРД конструкции 8/6, внешний диаметр статора которого составляет 57 мм, длина активной части 28 мм. Обмотка статора содержит восемь сосредоточенных катушек, соединенных последовательно по две в одну фазу, в одной катушке намотано 30 витков. Способ охлаждения данного ВРД – IC0040 (закрытый двигатель с естественным охлаждением).

Для расчета стационарных температурных полей с использованием МКЭ используем программу ELCUT версии 5.6 [44]. Также, в качестве примера, приведен расчет стационарного температурного поля в программе FEMM версии 4.2 [101].

В качестве исходных данных для решения тепловой задачи необходимо знать величину потерь в электрической машине. Для этого смоделируем SRM-

57-100 с использованием описанной выше математической модели ЭМП ВРД, которая учитывает влияние магнитных потерь на скорость, с нагрузкой на валу 0.02 Н·м и частотой вращения вала – 3000 об/мин. Результаты расчета квазиустановившегося режима приведены в таблице 2.5.



Рисунок 2.12 – Внешний вид ЭМП SRM-57-100

Таблица 2.5 – Результаты моделирования SRM-57-100

Параметр	Значение, Вт
Потребляемая мощность $P_1$	17.3
Мощность на валу $P_2$	6.3
Мощность электрических потерь $\Delta P_{ЭЛ}$	5.8
Потери холостого хода $\Delta P_{ХХ}$	0.7
Потери в стали статора $\Delta P_{СТ\_СТАТОРА}$	1.12
Потери в стали ротора $\Delta P_{СТ\_РОТОРА}$	0.4
Потери в системе управления $\Delta P_{ПРИВОДА}$	3

Методика определения коэффициентов теплопроводности и граничных условий подробно описана в [16]. В SRM-57-100 применяется сталь 2211, у которой продольная теплопроводность находится в диапазоне от 36 Вт/(К·м) до 39 Вт/(К·м). Объемная плотность тепловыделения в статоре и роторе рассчитывалась в соответствии с потерями в стали. Из таблицы 2.5 видно, что потери в стали в статоре составляют 1.12 Вт, а в роторе 0.4 Вт. Отсюда объемная плотность тепловыделения в статоре  $Q = 19115 \text{ Вт/м}^3$ , а в роторе  $17480 \text{ Вт/м}^3$ . Тепловая проводимость паза на единицу длины в радиальном направлении – 64 Вт/(К·м). В катушках ЭМП выделяются электрические потери, которые составляют 5.8 Вт. При площади поперечного сечения всех восьми катушек  $305 \text{ мм}^2$  объемная плотность тепловыделения составляет  $109000 \text{ Вт/м}^3$ . В данном случае учитывается выделение тепла во всех восьми катушках ВРД, а также коэффициент заполнения паза медью.

При расчете нагрева закрытых устройств с помощью пакета ELCUT необходимо описывать границы внутренней газовой среды. Для этого можно ввести в расчет две среды, одну условную гипотетическую и одну сверхпроводящую. Описание данного приема, а также методики расчета теплопроводности гипотетической среды подробно приведено в [16]. Для программы FEMM этого делать не нужно (однако, при этом не учитывается внутренняя конвекция вследствие перемешивания воздуха ротором).

В результате, для моделирования в программе ELCUT было создано 6 “материалов” и два граничных условия, а для программы FEMM заданы пять “материалов” и одно граничное условие.

Сгенерированная сетка конечных элементов в программе ELCUT представлена на рис. 2.13. Сетка, сгенерированная программой FEMM, представлена на рис. 2.14.



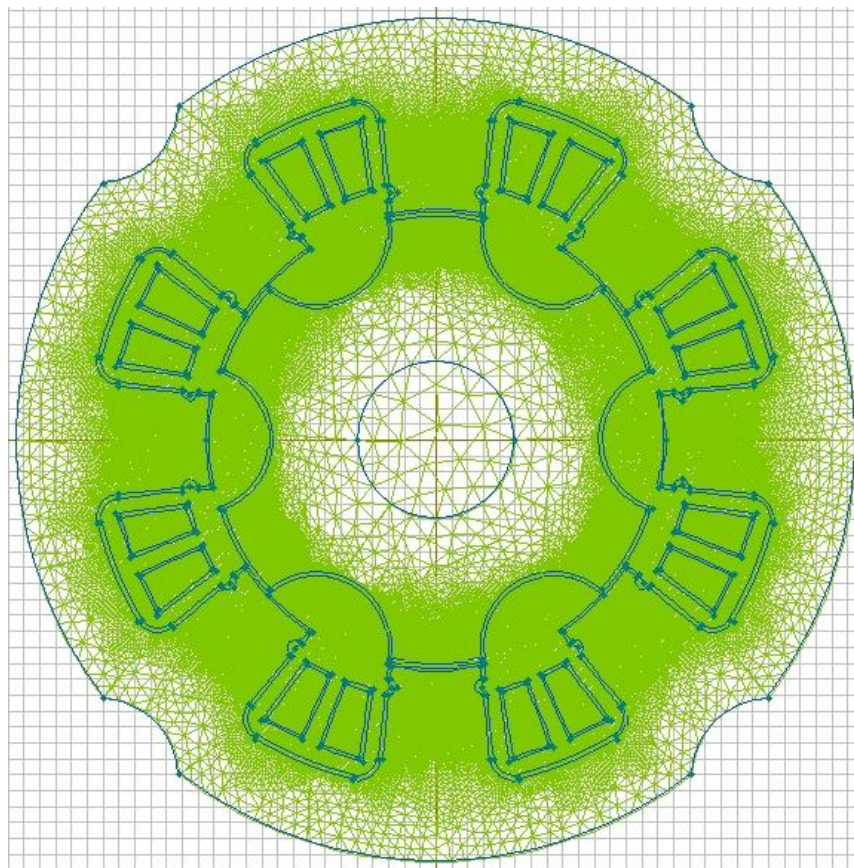


Рисунок 2.13 – Сетка конечных элементов в программе ELCUT

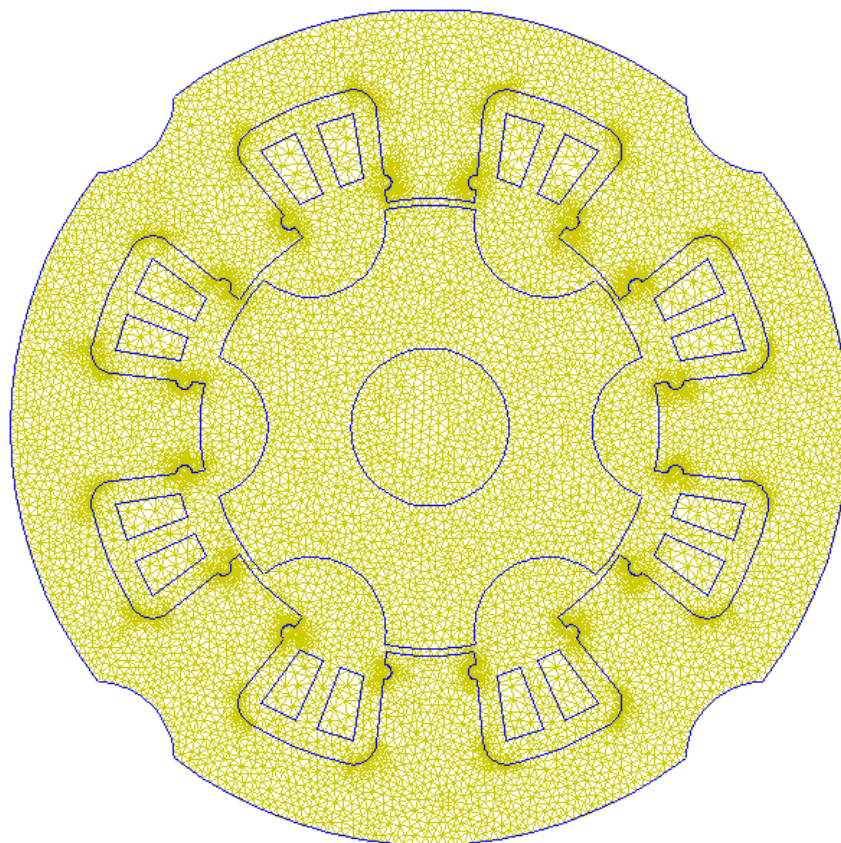


Рисунок 2.14 – Сетка конечных элементов в программе FEMM

Графическая интерпретация результатов расчета стационарного теплового поля для ЭМП ВРД в программе ELCUT приведена на рисунках 2.15 – 2.18. Распределение температуры в программе FEMM приведено на рис. 2.19.

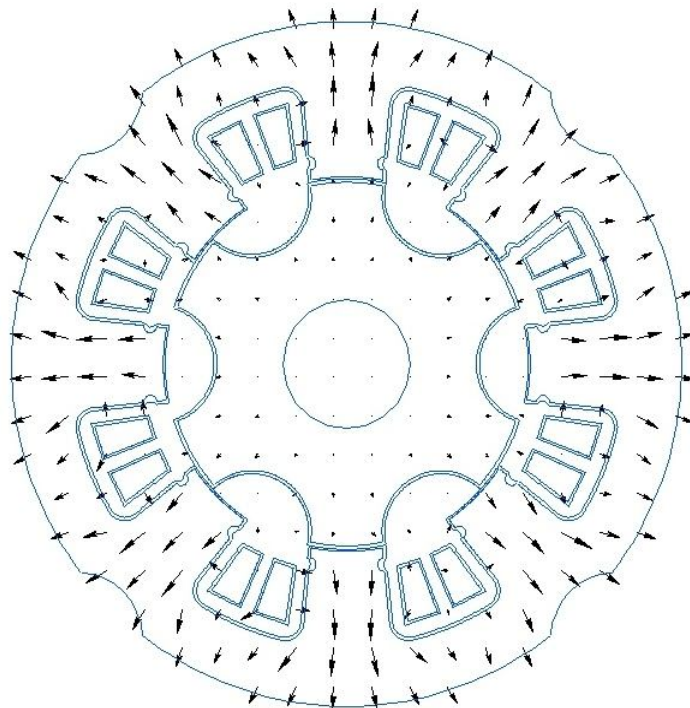


Рисунок 2.15 – Распределение вектора теплового потока в ЭМП

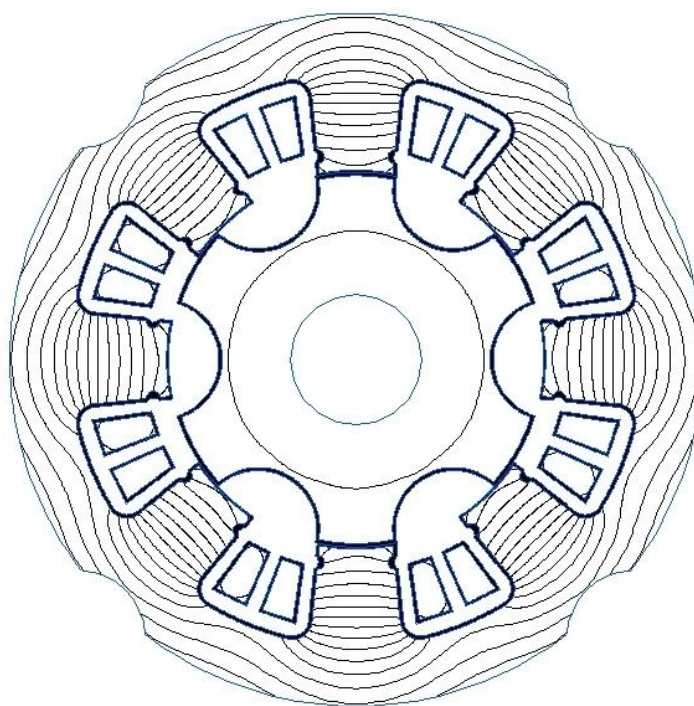


Рисунок 2.16 – Распределение изотерм в ЭМП

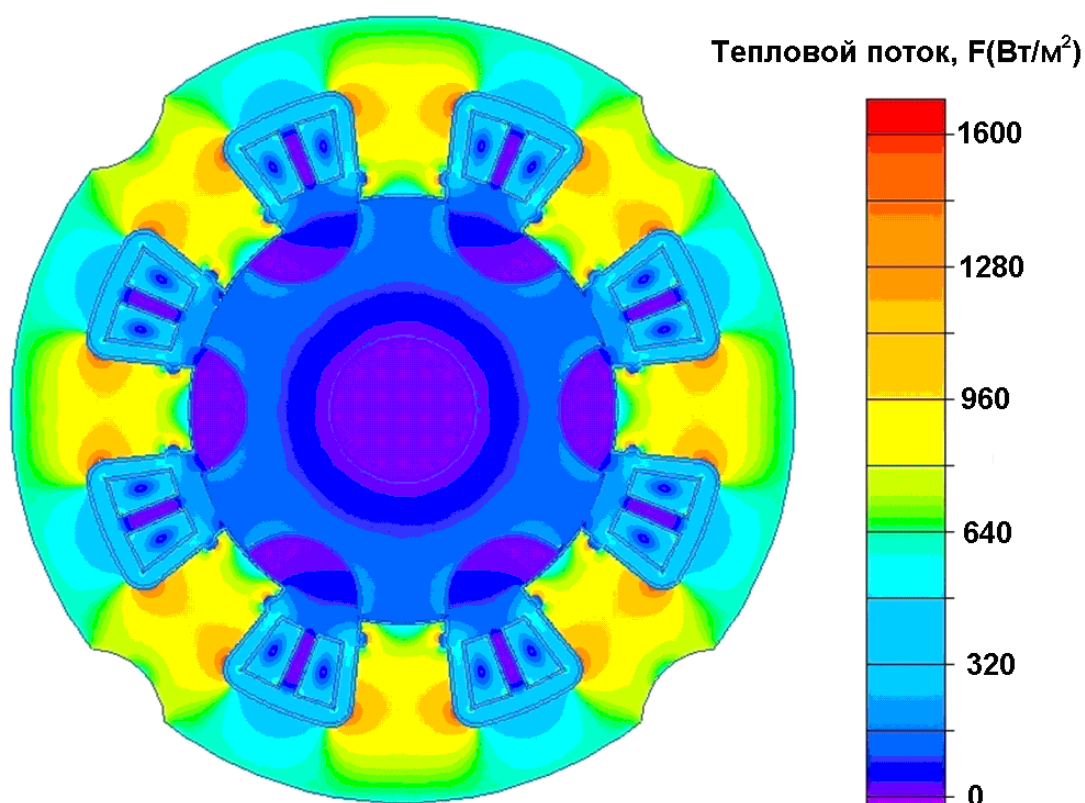


Рисунок 2.17 – Распределение теплового потока в ЭМП ВРД

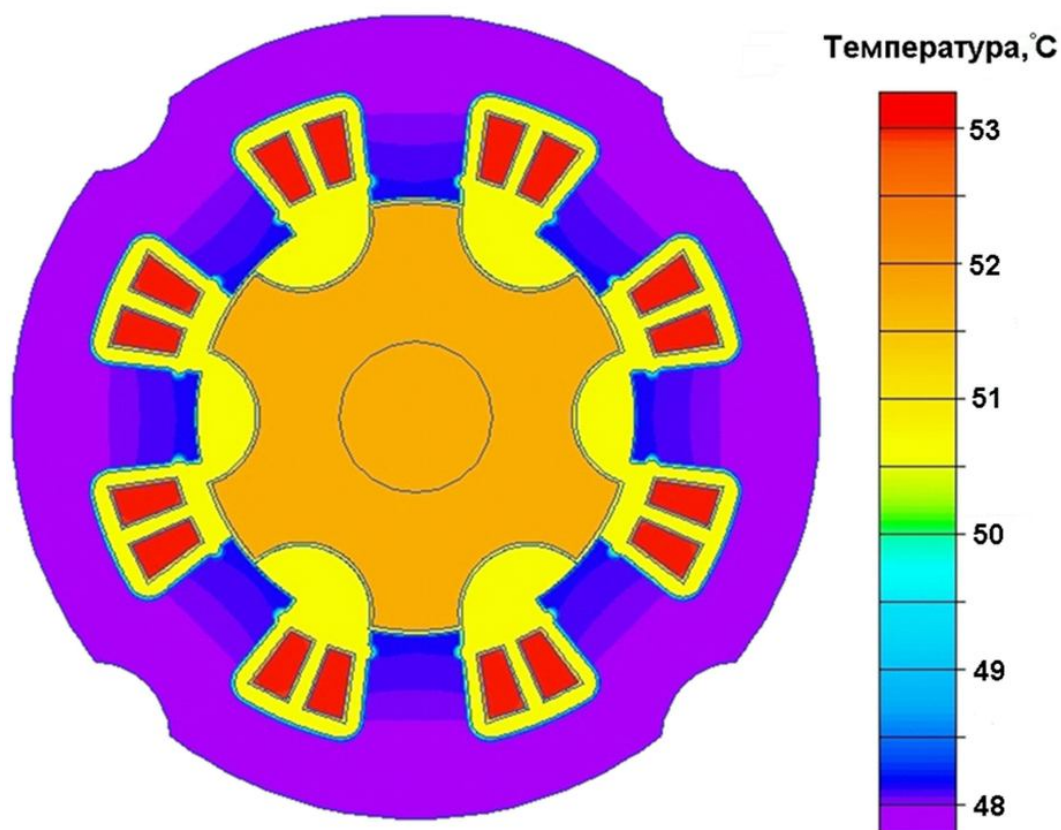


Рисунок 2.18 – Распределение температуры в ЭМП ВРД (ELCUT)

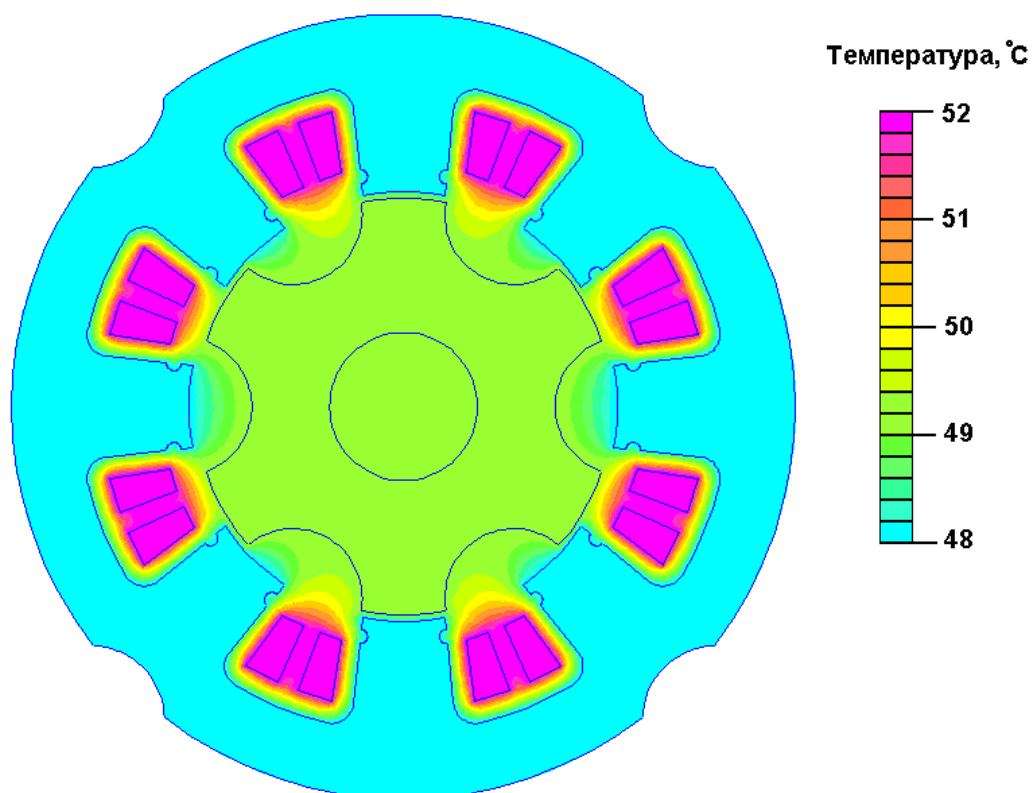


Рисунок 2.19 – Распределение температуры в ЭМП ВРД (FEMM)

Использование средств математического моделирования тепловых полей и графического представления результатов расчетов, дает наглядное представление о распределении температуры направлении вектора теплового потока в любой точке ЭМП ВРД, также позволяет обнаружить локальные перегревы частей электрической машины. Оценка адекватности рассмотренной тепловой модели приведена в разделе 2.4.

#### 2.4. Проверка адекватности математической модели на базе уравнений теплового поля

Для верификации математической модели электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя на базе уравнений теплового поля (2.5 – 2.8) выполним сравнение результатов моделирования с натурным экспериментом. При проведении эксперимента частота вращения поддерживалась

постоянной и составляла 3000 об/мин. ВРД был нагружен на постоянную нагрузку 0.02 Н·м. Напряжение питания составляло 24.5 В, при этом потребляемый ток от источника составил 0.71 А. Для определения температуры использовались два датчика температуры КТУ83-122, установленные на ЭМП. Один датчик был установлен на внешней поверхности статора. Другой датчик находился в катушке ЭМП. Время проведения эксперимента – 40 минут, при этом температура ЭМП установилась через 25 минут с момента начала эксперимента. Изменение температур от времени приведено в таблице 2.6, а на рис. 2.20 показан график изменения температуры во времени. При эксперименте температура окружающей среды составляла 26.6 °С.

В таблице 2.7 приведено сравнение установившихся температур как внешней поверхности статора, так и в обмотке при математическом моделировании и эксперименте.

Таблица 2.6 – Результаты экспериментального определения температуры в SRM-57-100

Время проведения замеров, мин	Показания температуры на поверхности статора, °С	Показания температуры в обмотке статора, °С
0	26.6	26.6
5	39	43.5
10	44	49
15	48	52
20	49	54
25	50	54.5
40	50	54.5

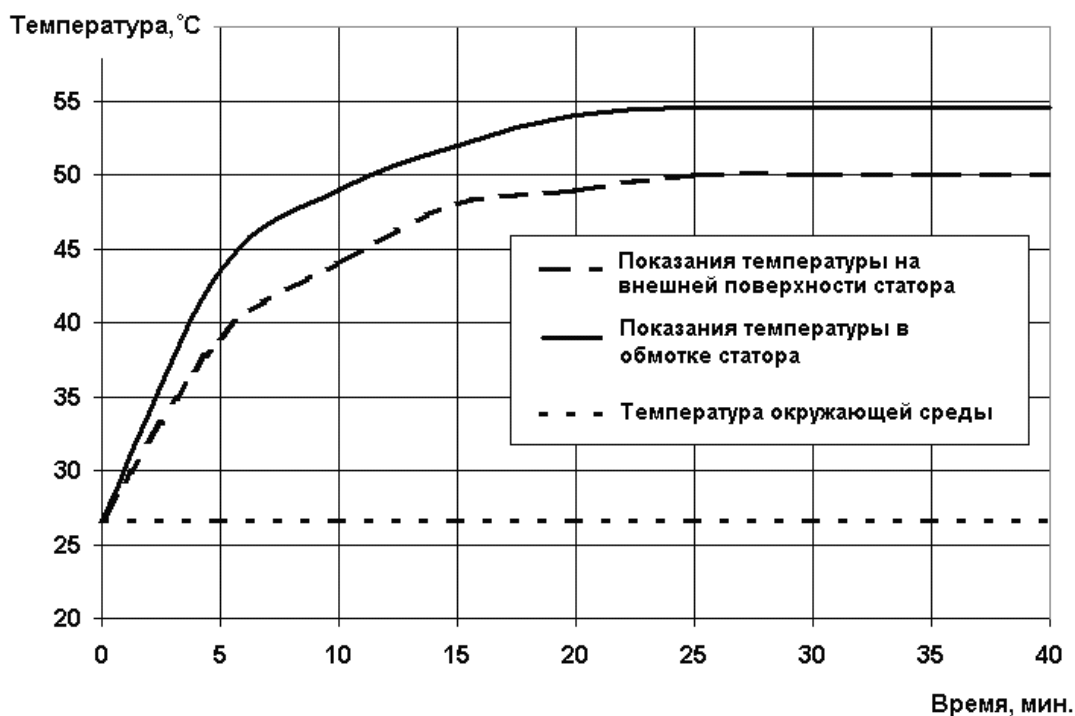


Рисунок 2.20 – Диаграмма нагрева SRM-57-100

Таблица 2.7 – Сравнение результатов моделирования в программах ELCUT и FEMM с экспериментом

	Внешняя поверхность статора, °C	Обмотка статора, °C
Эксперимент	50	54.5
Моделирование в ELCUT	48	53
Моделирование в FEMM	48	52

Результаты сопоставления математического моделирования стационарного теплового поля с использованием программных пакетов ELCUT и FEMM с данными физического эксперимента достаточно близки. Отличие между ними не превышает пяти процентов, что свидетельствует о достаточной эффективности системы моделирования тепловых полей, реализованной в программных продуктах ELCUT и FEMM.

Если сравнивать между собой ELCUT и FEMM, то при расчете стационарных тепловых полей в ELCUT приходится, либо описывать границы внутренней газовой среды, или вводить условную гипотетическую среду, что не совсем удобно.

## 2.5. Выводы

1. Уточнение разработанных математических моделей, построенных на базе ряда допущений, должно выполняться путем использования современных численных методов анализа магнитного поля. Эти методы позволяют учитывать реальную геометрию и достаточно высокий уровень насыщения ферромагнитных материалов, который свойственен ЭМП ВРД.

2. Предложена математическая модель электромеханического преобразователя ВРД, которая использует результаты решения полевой задачи для определения магнитных потерь в стальном магнитопроводе, а также учитывает их влияние на скорость при моделировании динамических и квазиустановившихся режимов работы двигателя.

3. Представленные математические модели являются основой для разработки программного обеспечения автоматизированного синтеза вентильно-реактивных двигателей. В частности, на основе описанных выше математических моделей ЭМП ВРД можно создать подсистему расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы ВРД.

4. Приведены результаты экспериментального исследования опытного образца ВРД, которые подтвердили адекватность математической модели ЭМП ВРД, в которой учтено влияние магнитных потерь в магнитопроводе на скорость (максимальное расхождение – 9 % при сравнении КПД). Также приведены данные моделирования без учета потерь в стали, для которых наблюдается существенное расхождение с экспериментом (максимальное отличие до 23 % для КПД и тока источника питания).

5. Рассмотрены особенности расчета стационарного теплового поля вентиляционно-реактивного двигателя с использованием метода конечных элементов, с помощью которого можно учесть особенности реальной геометрии. Результаты сопоставления математического моделирования стационарного теплового поля с использованием программных пакетов ELCUT и FEMM с данными физического эксперимента достаточно близки. Отличие между ними не превышает пяти процентов, что свидетельствует о высокой эффективности систем моделирования тепловых полей, реализованных в программных продуктах ELCUT и FEMM.



### РАЗДЕЛ 3

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ SRM-CAD

### 3.1. Структурная схема системы SRM-CAD

Стремительное развитие в области силовой и информационной электроники создало предпосылки для быстрого прогресса в области электромехатроники. В связи с этим возросла потребность в математическом обеспечении проектирования таких систем. В работе [54] рассматриваются следующие этапы создания компьютерных моделей ЭМП:

- синтез математической модели;
- создание компьютерной модели и разработка программного обеспечения;
- отладка и тестирование программы.

Описание ММ приведено в разделе 2, описание разработки программного обеспечения приведено в данном разделе ниже.

Для решения задач структурного и параметрического синтеза, а также выполнения оптимизационных и проектных исследований разработана система автоматизированного синтеза SRM-CAD.

Эта система состоит из совокупности следующих подсистем: подсистемы предварительно расчета, параметризации геометрии ЭМП ВРД и расчета магнитных и тепловых полей численными методами, расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы и подсистемы оптимизации. При этом каждая подсистема должна решать в законченной форме достаточно самостоятельную группу задач автоматизированного проектирования [1].

При проектировании системы были учтены следующие требования:

- необходимость реализации полного цикла проектирования, от технического задания, до расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы;

- возможность выполнения проверки на ограничения по тепловой перегрузке с использованием для расчета тепловой задачи полевой ММ;
- система должна объединять разные расчетные модули; обеспечивать передачу данных между подсистемами, предоставлять доступ к разным подсистемам через единый интерфейс;
- возможность параметризации геометрии ЭМП ВРД и передачи ее в программы расчета магнитных и тепловых полей;
- возможность использования внешних процедур и программного обеспечения при расчете магнитного поля численными методами для получения зависимостей  $\Psi_{\phi} = f_1(I_{\phi}, \Theta)$  и  $M_{EM} = f_2(I_{\phi}, \Theta)$ ;
- возможность оптимизации геометрических размеров ЭМП и параметров системы управления;
- в качестве поисковых методов для подсистемы оптимизации целесообразно реализовать метод направленного перебора и генетический алгоритм;
- для повышения скорости расчетов систему SRM-CAD необходимо написать на компилируемом языке высокого уровня [98, 111];
- наличие информационной подсистемы, предоставляющей информационную поддержку пользователя, справочные материалы, а также выводящей сообщения о возникающих ошибках во время ввода данных и предупреждающей о сбоях при расчете (диагностика работы системы).

Для работы с системой автоматизированного синтеза необходим персональный компьютер архитектуры x86 с процессором 2 ГГц и выше, оперативной памятью 1 Гб и больше. Для хранения программы в дисковой памяти компьютера необходимо около 100 Мб свободного места. Рекомендуемая операционная система семейства Microsoft Windows XP и выше. Руководство пользователя системы SRM-CAD приведено в приложении Б.

При работе с SRM-CAD существует возможность выбрать вид решаемой задачи: предварительный расчет (по техническому заданию), поверочный расчет (расчет магнитного поля по известным геометрическим размерам и расчет

динамических и квазиустановившихся режимов работы) или решение оптимизационной задачи.

Функциональная схема системы автоматизированного синтеза ВРД приведена на рис. 3.1.

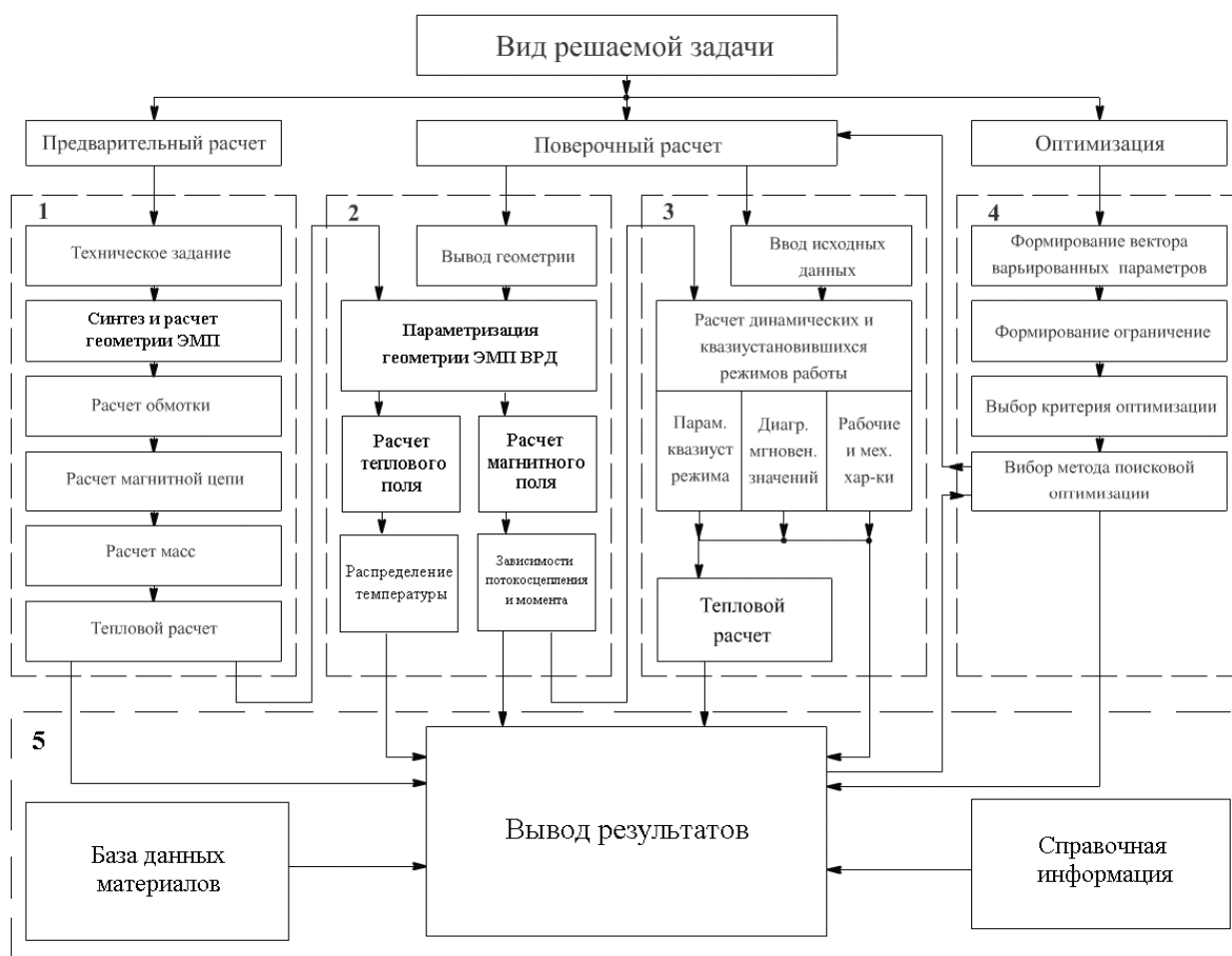


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы

Где цифрами обозначены следующие подсистемы:

1. подсистема предварительного расчета;
2. подсистема параметризации геометрии для расчета магнитных и тепловых полей;
3. подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы;
4. подсистема оптимизации;
5. информационная подсистема.

SRM-CAD базируется на принципах, изложенных в [60]. Состоит из четырех основных подсистем и одной вспомогательной: подсистема предварительного расчета; подсистема параметризации геометрии, расчета магнитных и тепловых полей; подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы; подсистема оптимизации. Вспомогательной является информационная подсистема. Детальное описание подсистем выполнено в разделах 3.2.1 – 3.2.5.

## 3.2. Основные подсистемы SRM-CAD

### 3.2.1. Подсистема предварительного расчета

На начальном этапе проектирования перед разработчиком ставится задача определения основных геометрических размеров и свойств проектируемого электродвигателя по заданному техническому заданию. Свою помощь в решении этой задачи разработчику предлагает система SRM-CAD. Одна из подсистем входящих в ее состав – это подсистема предварительного расчета.

В основу предварительного расчета заложена схема замещения магнитной цепи.

В качестве начальных исходных данных вводятся следующие значения:

- число фаз ЭМП;
- нагрузочный момент;
- номинальная частота вращения;
- напряжение питания;
- отношение длины машины к диаметру;
- величина воздушного зазора;
- коэффициенты полюсного перекрытия полюсов статора и ротора;
- заданная плотность тока в обмотке статора;
- индукция в воздушном зазоре.

Результатами расчета являются:

- геометрические размеры ЭМП;
- потребляемая и полезные мощности;
- электрические, механические и магнитные потери;
- КПД;
- потребляемый ток от источника питания;
- магнитодвижущая сила (МДС) катушки;
- число витков в катушке фазы статора;
- диаметр провода обмотки;
- массы конструктивных элементов ЭМП.

Имеется возможность сохранения исходных данных и результатов расчета подсистемы в текстовом виде на диск компьютера. Если полученные геометрические параметры ЭМП удовлетворяют разработчика, то можно выполнить их перенос в подсистему геометрической параметризации, расчета магнитных и тепловых полей.

### 3.2.2. Подсистема параметризации геометрии, расчета магнитных и тепловых полей

Параметризация в широком смысле этого слова – это процесс проектирования, результатом которого становится модель с минимальным набором простых и понятных параметров. Изменяя их, конструктор получает нужную ему модель объекта [33, 53]. При проектировании конструктор постепенно абстрагируется от исходных примитивов и получает модель, максимально соответствующую его представлениям. Можно говорить и о качестве параметризации [23]. Хорошо параметризованная модель, кроме минимального набора связей, обладает возможностью “работы” в широком диапазоне изменяемых параметров.

Процесс автоматизированного проектирования достаточно сложных системных объектов имеет итерационный характер. В этом случае наибольший объем работы вызывает не само проектирование, а внесение изменений и исправлений связанных с этими изменениями ошибок. Средства параметрического моделирования позволяют значительно упростить решение таких задач. Параметрическое моделирование можно описать следующим образом: в ходе построения модели объекта система накапливает сведения о геометрических параметрах элементов модели и соотношений между ними, а также формирует протокол (историю) создания геометрии, позволяя простым изменением параметров или геометрических соотношений легко модифицировать и регенерировать модель. Важно, чтобы параметрическая модель строилась в интерактивном режиме, без какого-либо программирования, исключение составляет задание формул.

Расчет геометрии модели для произвольных новых значений параметров и геометрических соотношений – сложная, нетривиальная задача, так как нет гарантии существования корректной модели с заданными параметрами.

Параметрическое моделирование широко применяется в системах автоматизированного проектирования тяжелого, а также среднего класса (SolidWorks, КОМПАС 3D, Euclid, CATIA, T-Flex CAD и другие) [49].

Параметризация, как методология автоматизированной разработки, это основа для быстрого выполнения проектно-конструкторских работ. Что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства в едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация допускает выполнение различных видов взаимосвязей между компонентами модели и программ, которые используют данную модель.

Использование технологий параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели. Поэтому пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геомет-

рией, поэтому внесение даже малейших изменений потребует значительных трудовых затрат. Изменение же параметрической модели выполняется также легко, как и изменение значений размеров на чертеже.

Существует три подхода к созданию параметризированной геометрии модели изделия [4]:

- параметрическое конструирование с полным набором связей (parametric/variational - associative design);
- ассоциативная геометрия (associative geometry);
- объектно-ориентированное конструирование при помощи базовых операций добавления/удаления материалов (feature-based modeling).

В системе SRM-CAD применено параметрическое конструирование с полным набором связей. Параметрическое конструирование с полным набором связей или “жесткая” параметризация – интеллектуальное моделирование, где геометрия и конструкторские цели заложены в определении модели. При этом известны все необходимые связи, однозначно определяющие тем самым геометрическую форму модели изделия. В этом случае изменение значения какого-нибудь параметра, или переопределение связей, влечет за собой автоматическое изменение геометрии модели и не потребует от конструктора выполнения каких-нибудь действий по модификации геометрической модели.

Для режима “жесткой” параметризации характерно наличие случаев, когда при изменении значений параметров геометрической модели ее решение получить невозможно, так как часть параметров и установленные связи вступают в противоречие друг с другом. Другими словами, такая технология позволяет, при необходимости, управлять изменением формы конструкции в некоторых пределах, которые определяются интервалом взаимной противоречивости всей совокупности параметров и наложенных связей.

Параметризация геометрии интегрирована в систему автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD, что позволяет осуществлять обмен данными между разными подсистемами. Например, сгенерированную геометрию ЭМП можно передать в программу численных расчетов магнитных и тепловых полей мето-

дом конечных элементов FEMM [101]. Данные, которые получены при расчете магнитного поля, передаются в подсистему расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы. А в результате решения тепловой задачи можно определить перегревы в различных частях ЭМП ВРД.

Форма ввода исходных данных и результат параметризации ЭМП ВРД конструкции 8/6 показана на рис 3.2.

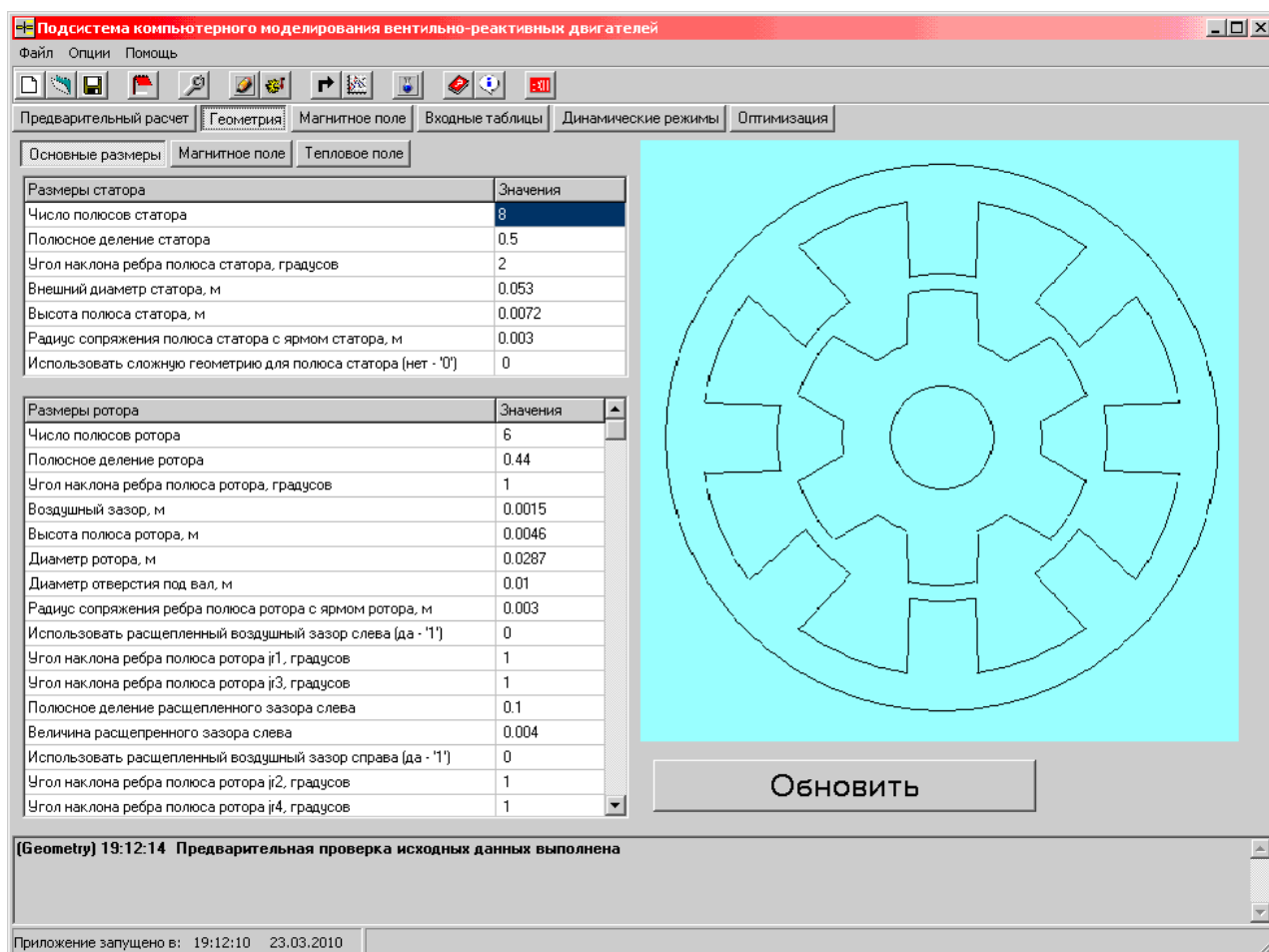


Рисунок 3.2 – Подсистема генерации геометрии

Подсистема параметризации может генерировать разные варианты геометрии (рис. 3.3). На рис. 3.3,а, представлен однофазный ЭМП ВРД с расщепленным воздушным зазором, число полюсов статора и ротора равно 2/2. На рис. 3.3,б показан однофазный ЭМП конструкции 4/4. На рисунках 3.3,в и 3.3,г представлены трехфазные ЭМП конструкции 6/2 с расщепленным воздушным зазором и конструкции 6/4 соответственно.



Кроме параметризации подсистема выполняет расчет магнитных и тепловых полей в ЭМП с использованием МКЭ. В качестве программы расчета полей методом конечных элементов можно использовать, например, ELCUT [44] или FEMM.

Выполнив параметризацию и рассчитав магнитное поле в ЭМП ВРД можно перейти к моделированию динамических и квазиустановившихся режимов работы.

В приложении В приведены листинги программного обеспечения для автоматизации процесса параметризации геометрии ЭМП ВРД.

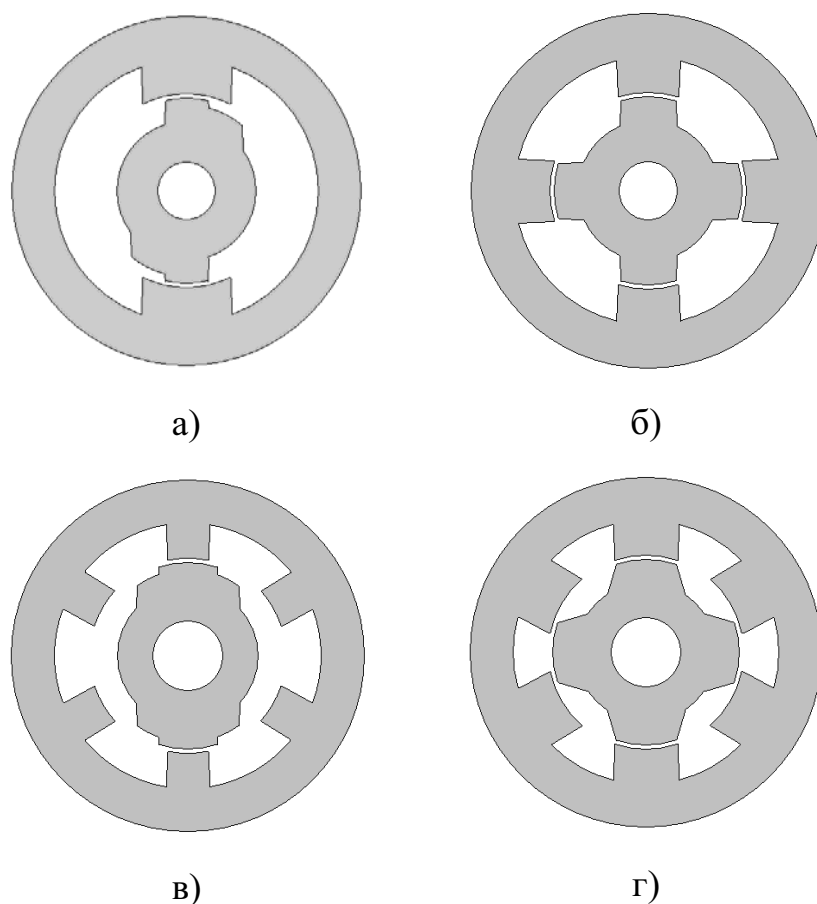


Рисунок 3.3 – Варианты ЭМП, которые можно реализовать

с использованием геометрической параметризации в системе SRM-CAD:

а – однофазный ЭМП конструкции 2/2; б – однофазный ЭМП конструкции 4/4;

в – трехфазный ЭМП конструкции 6/2; г – трехфазный ЭМП конструкции 6/4

### 3.2.3. Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы

Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов базируется на положениях, изложенных в разделе 2. Описание подсистемы приведено в [66, 75]. Основой для расчета динамических режимов выступает система дифференциальных уравнений (2.1). Для решения системы используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка [11]. Зависимости  $M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta)$  и  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta)$ , необходимые для решения системы (2.1), рассчитываются в подсистеме параметризации геометрии и расчета магнитного поля. При интерполяции и экстраполяции зависимостей  $M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta)$  и  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \Theta)$  используется кусочно-линейная аппроксимация.

Подсистема предоставляет пользователю следующие возможности:

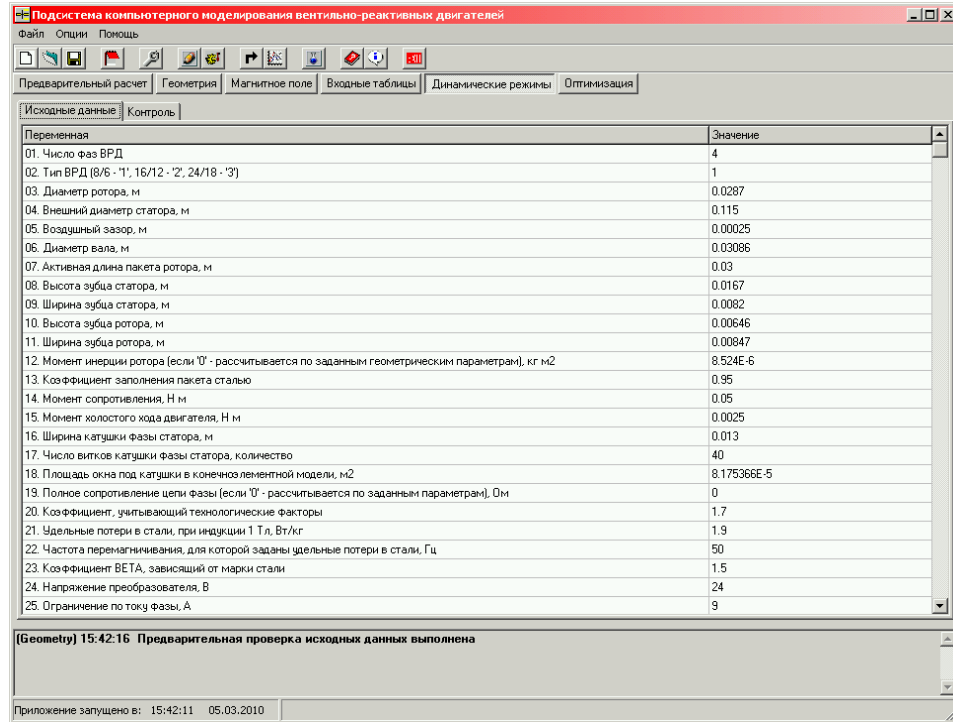
- ввод исходных данных (рис. 3.4) и выполнение предварительного расчета электромагнитных нагрузок, обмоточных данных ЭМП, полного сопротивления цепи фазы с учетом топологии схемы инвертора, а также расчет суммарного момента инерции;

- получение результатов расчета зависимостей  $M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta)$  и  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \Theta)$  в табличной форме (рис. 3.5) с их дальнейшей визуализацией (рис. 3.6);

- анализ динамических режимов работы ВРД с представлением результатов в виде диаграмм изменения мгновенных значений:

- а) напряжений и токов фаз (рисунки 3.7 и 3.8), а также тока источника питания;
- б) моментов фаз и суммарного момента двигателя (рис. 3.9);
- в) потокосцепления фаз;
- г) скорости вращения вала и изменения угла поворота ротора (рис. 3.10);
- д) полезной и полной мощностей, а также мощности потерь;

- е) потребленной энергии от источника за время пуска и энергии от данной источнику при торможении;
- ж) магнитной индукции в разных частях магнитной системы ЭМП.



Переменная	Значение
01. Число фаз ВРД	4
02. Тип ВРД (8/6 - '1', 16/12 - '2', 24/18 - '3')	1
03. Диаметр ротора, м	0.0287
04. Внешний диаметр статора, м	0.115
05. Воздушный зазор, м	0.00025
06. Диаметр вала, м	0.03086
07. Активная длина пакета ротора, м	0.03
08. Высота зуба статора, м	0.0167
09. Ширина зуба статора, м	0.0082
10. Высота зуба ротора, м	0.00646
11. Ширина зуба ротора, м	0.00847
12. Момент инерции ротора (если '0' - рассчитывается по заданным геометрическим параметрам), кг·м <sup>2</sup>	8.524E-6
13. Коэффициент заполнения пакета сталью	0.95
14. Момент сопротивления, Н·м	0.05
15. Момент холостого хода двигателя, Н·м	0.0025
16. Ширина катушки фазы статора, м	0.013
17. Число витков катушки фазы статора, количество	40
18. Площадь окна под катушки в конечно-элементной модели, м <sup>2</sup>	8.175366E-5
19. Полное сопротивление цепи фазы (если '0' - рассчитывается по заданным параметрам), Ом	0
20. Коэффициент, учитывающий технологические факторы	1.7
21. Удельные потери в стали, при индукции 1 Тл, Вт/кг	1.9
22. Частота перемагничивания, для которой заданы удельные потери в стали, Гц	50
23. Коэффициент BETA, зависящий от марки стали	1.5
24. Напряжение преобразователя, В	24
25. Ограничение по току фазы, А	9

(Geometry) 15:42:16 Предварительная проверка исходных данных выполнена

Приложение запущено в: 15:42:11 05.03.2010

Рисунок 3.4 – Таблица исходных данных

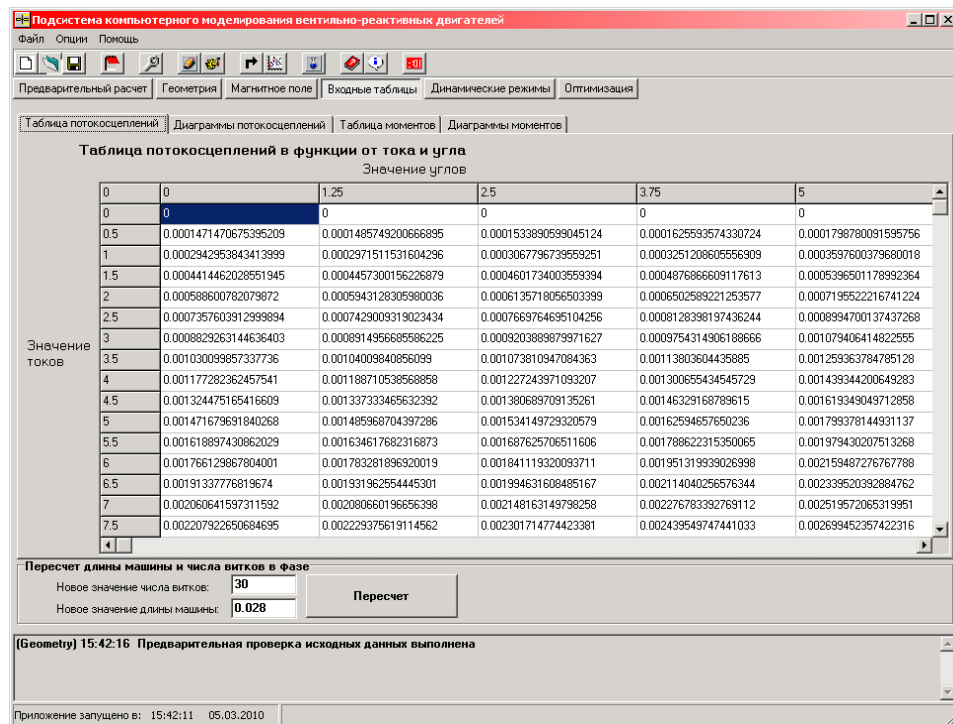


Таблица потокоосцеплений в функции от тока и угла

Значение углов

	0	1.25	2.5	3.75	5
0	0	0	0	0	0
0.5	0.0001471470675395209	0.0001485749200666895	0.0001533890599045124	0.0001625593574330724	0.0001798780091595756
1	0.0002942953843413999	0.0002971511531604296	0.0003067796739593251	0.0003251208605996909	0.0003597600379680018
1.5	0.0004414462028551945	0.0004457300156226879	0.0004601734003593394	0.0004878866609117613	0.0005396501178992364
2	0.000588600782079872	0.0005943128305980036	0.0006135718056503399	0.0006502589221253577	0.0007195522216741224
2.5	0.0007357603912999894	0.0007429009319023434	0.0007669764695104256	0.0008128398197436244	0.0008994700137437268
3	0.0008829263144636403	0.0008914956685586225	0.0009203889879971627	0.0009754314906188666	0.01079406414822555
3.5	0.001030099857337736	0.00104009840856099	0.001073810947084363	0.00113803604435885	0.001259363784785128
4	0.001177282362457541	0.001188710538568958	0.001227243971093207	0.001300655434545729	0.001439344200649283
4.5	0.001324475165416609	0.00133733465632392	0.001380689709135261	0.00146329168789615	0.001619349049712858
5	0.001471679691840268	0.001485968704397286	0.001534149729320579	0.00162594657650236	0.00179378144931137
5.5	0.001618897430862029	0.001634617682316873	0.001687625706511606	0.001788622315300065	0.001979430207513268
6	0.001766129867804001	0.001783281896520019	0.001841119320093711	0.001951319939026998	0.002159487276767788
6.5	0.00191337776819674	0.001931962554445301	0.001994631608485167	0.002114040256576344	0.002339520392884762
7	0.002060641597311592	0.002080660196656398	0.002148163149798258	0.002276783392769112	0.002519572065319951
7.5	0.002207922650684695	0.002229375619114562	0.002301714774423381	0.002439549744741033	0.002699452357422316

Пересчет длины машины и числа витков в фазе

Новое значение числа витков:

Новое значение длины машины:

Пересчет

(Geometry) 15:42:16 Предварительная проверка исходных данных выполнена

Приложение запущено в: 15:42:11 05.03.2010

Рисунок 3.5 – Представление зависимости  $\Psi_{\phi} = f_1(I_{\phi}, \Theta)$  в табличной форме

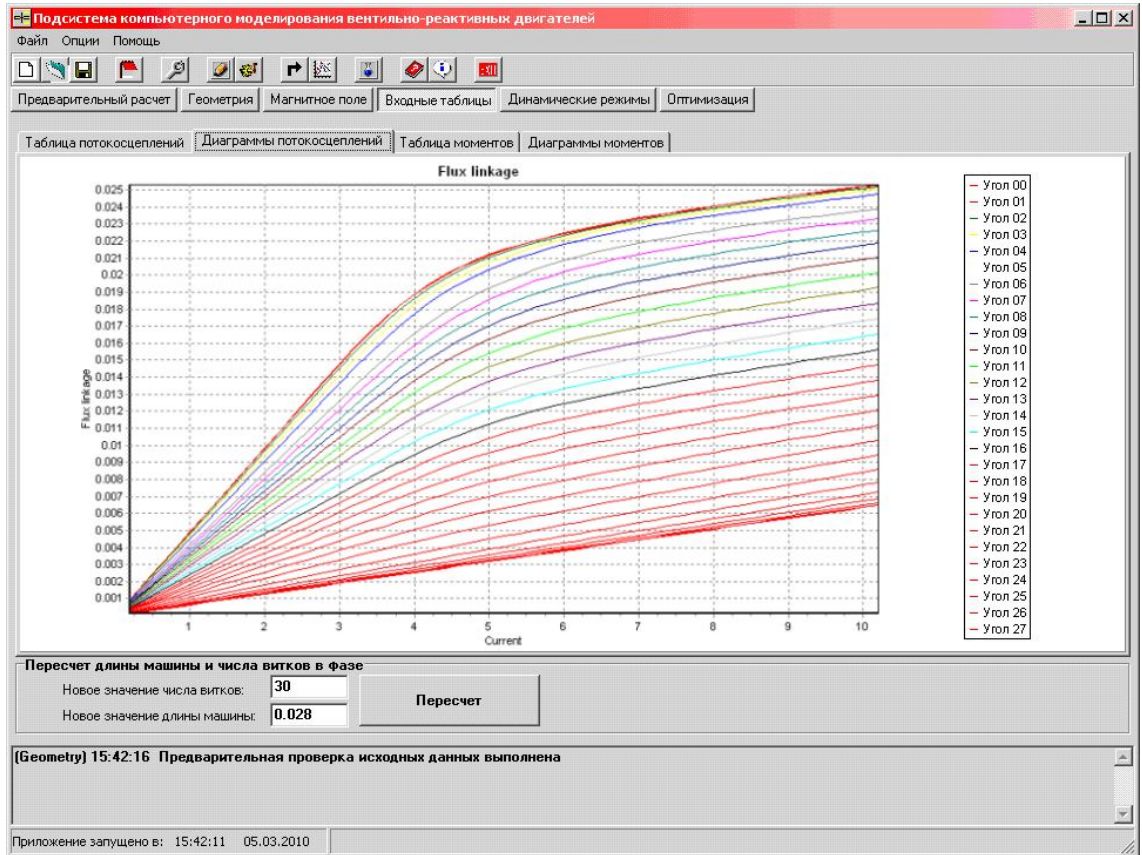


Рисунок 3.6 – Пример визуализации зависимости  $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \Theta)$

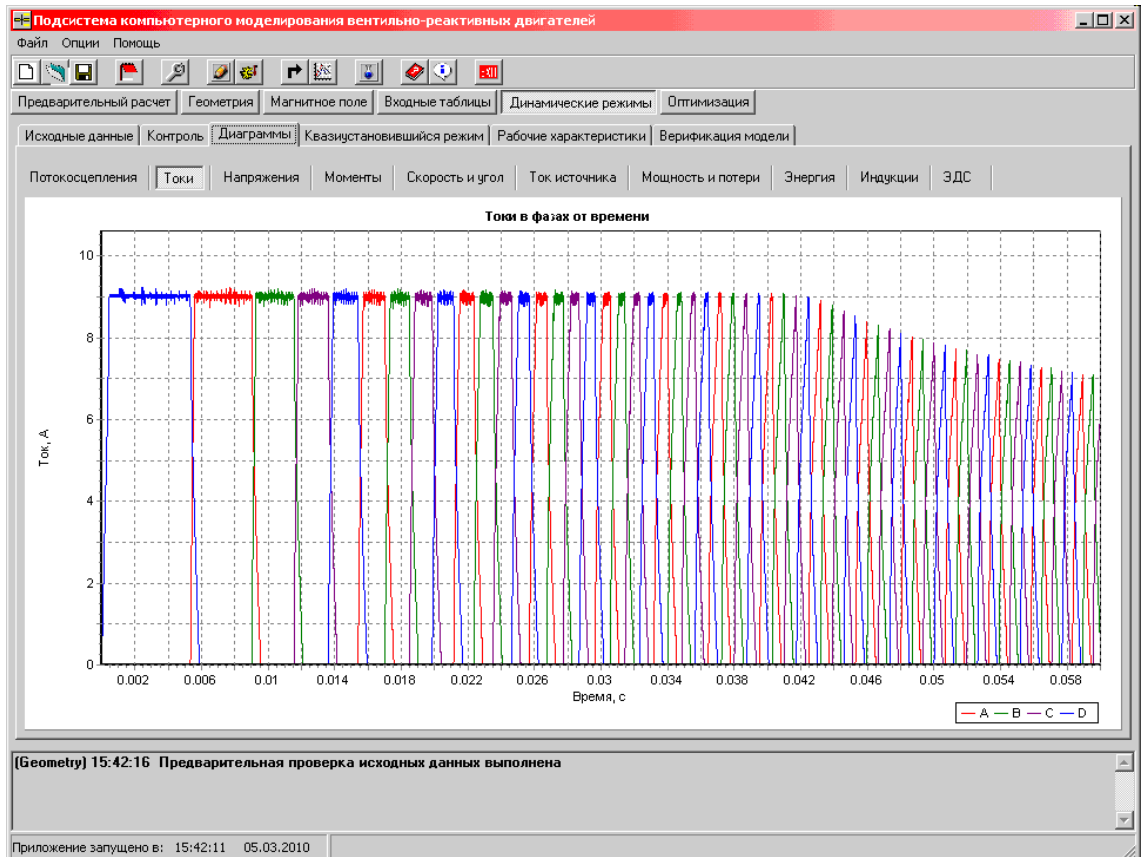


Рисунок 3.7 – Диаграмма токов фаз

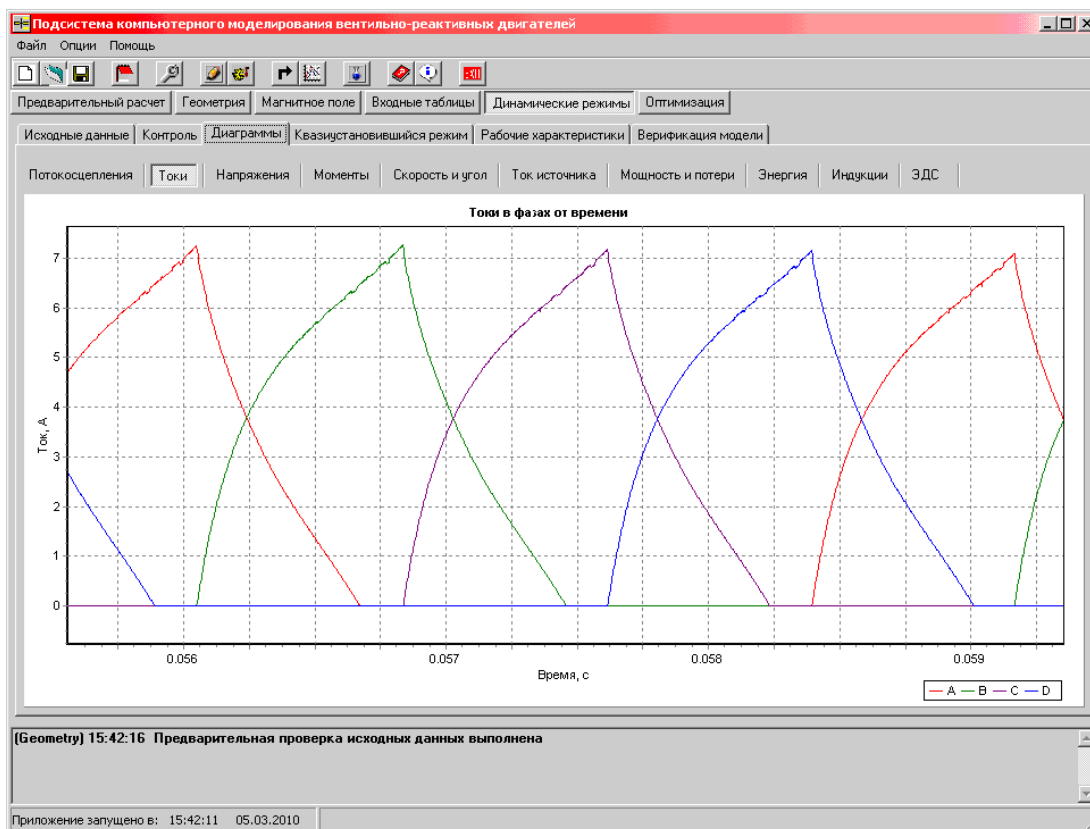


Рисунок 3.8 – Диаграмма токов фаз (фрагмент)

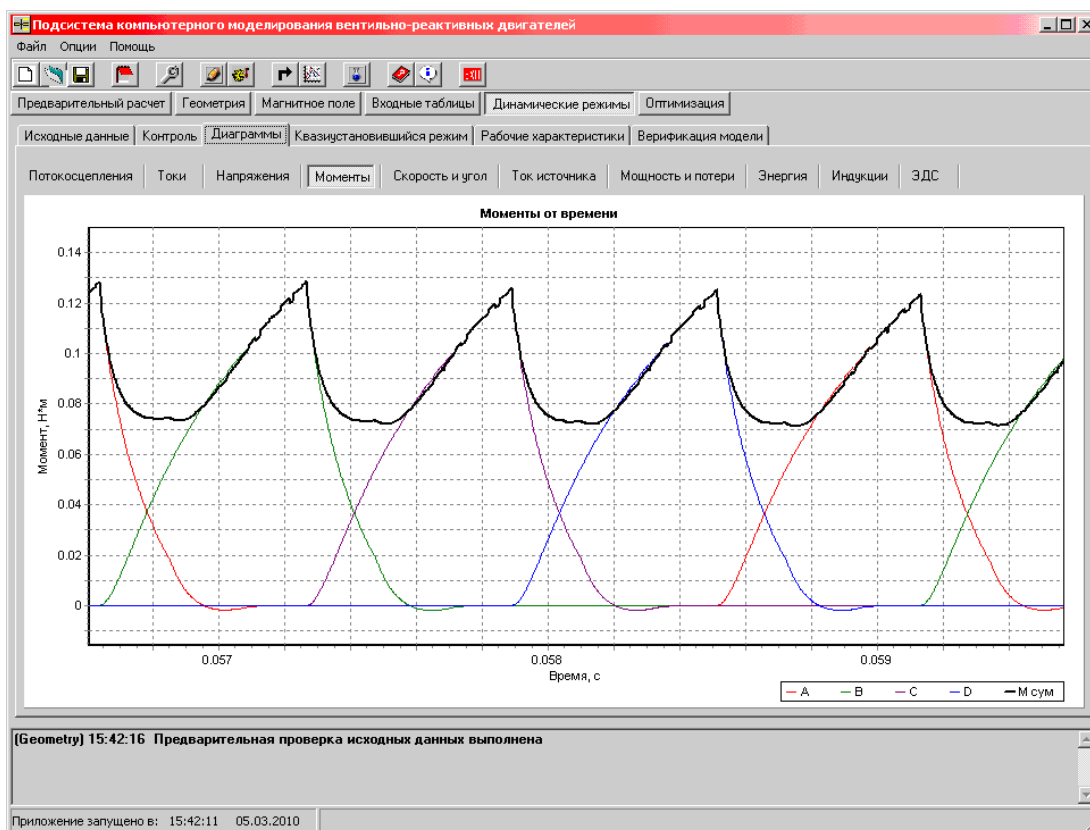


Рисунок 3.9 – Диаграмма моментов фаз и суммарного момента (фрагмент)

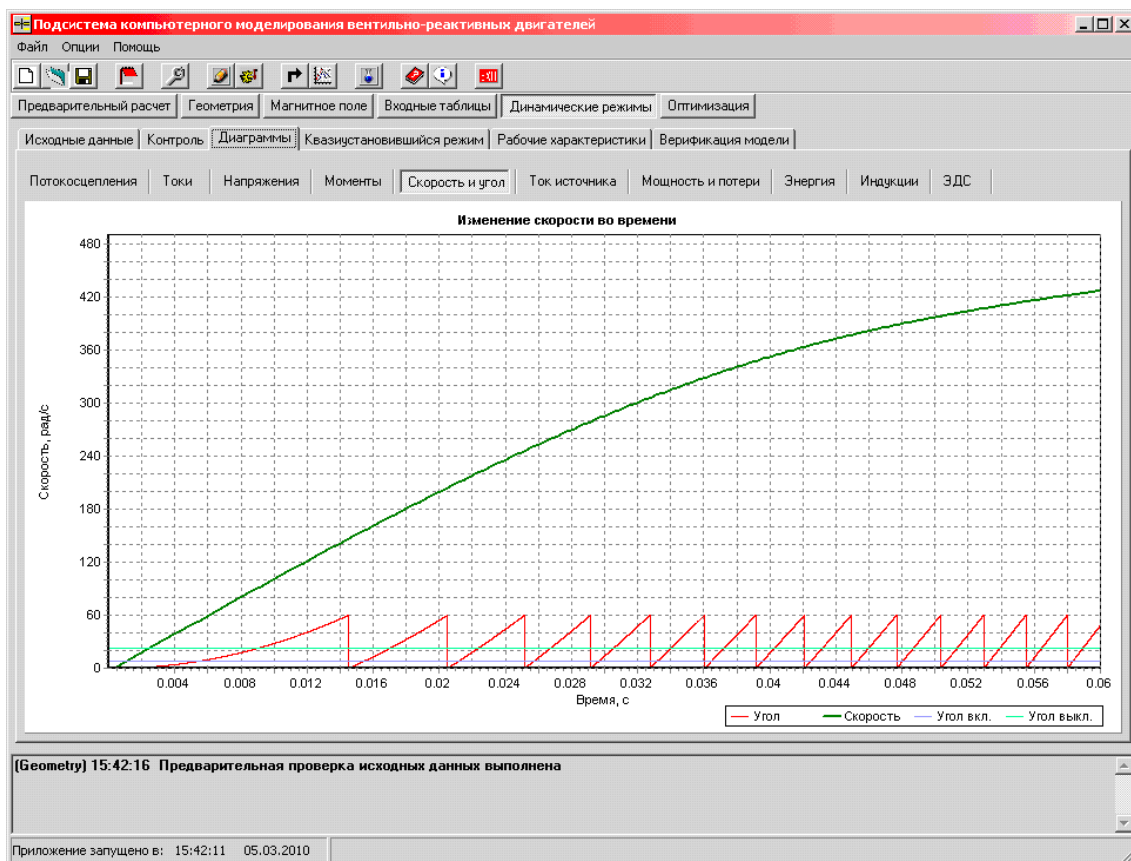


Рисунок 3.10 – Диаграмма изменения скорости и угла коммутации

– анализ квазиустановившихся режимов работы ВРД с выводом информации о следующих величинах:

- а) значения потребленной и полезных мощностей, мощности электрических и механических потерь, а также оценки совпадения баланса мощностей;
- б) значения установившейся скорости и среднего момента  $M_{CP}$  с оценкой величины пульсаций момента, которая рассчитывается как

$$K_{II} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2 \cdot M_{CP}}, \text{ где } M_{\max}, M_{\min} - \text{максимальное и минимальное значение}$$

электромагнитного момента соответственно;

- в) величины КПД ВРД;
- г) механической характеристики  $\omega = \varphi(M)$ ;
- д) рабочих характеристик ВРД.

### 3.2.4. Подсистема оптимизации

Подсистема может выполнить оптимизацию геометрических размеров ЭМП и параметров системы управления. В качестве поисковых методов используются метод направленного перебора и генетический алгоритм.

В общей постановке задача оптимизации (проектного синтеза) ВРД сводится к оптимизации (минимизации или максимизации) некоторого функционала [5, 45, 85, 86]:

$$F^S(x^S) \rightarrow \min_{s \in S, x \in D} \Rightarrow s^*, x^{s^*}$$

при условии:

$$\begin{aligned} D: \varphi_i^s(x^s) = \varphi_i^s(x_1^s, x_2^s, \dots, x_m^s) \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, n; s = \{1, 2, \dots, s, \dots, k\}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Эта постановка задачи включает в себя как структурную, так и параметрическую оптимизацию, где  $s$  – множество структур (конструктивных исполнений) ВРД,  $F^S(x^S)$  – критерий оптимальности,  $s^*$  – оптимальное исполнение двигателя,  $x^{s^*}$  – вектор оптимальных параметров оптимального исполнения двигателя,  $D$  – допустимая область.

Условия (3.1) выражают ограничения, накладываемые техническими требованиями на разработку ВРД, и описывают допустимую область. Областью определения функций  $F^S(x^S)$  и  $\varphi_i^s(x^s)$  является некоторая область  $D_1$ , ограниченная условиями:

$$D_1: \psi_j^s(x^s) \geq 0, j = 1, 2, \dots, l.$$

В случае  $\{s\} = 1$ , т.е. когда требуется оптимизировать заданное конструктивное исполнение ВРД, задача синтеза сводится к виду:

$$F(x) \rightarrow \min \Rightarrow x^*$$

с ограничениями:

$$D: \varphi_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Исходные данные вносятся в таблицу, при этом: формируется вектор варьируемых переменных, задаются ограничения, выбирается критерий оптимизации и метод поисковой оптимизации.

Один из вариантов алгоритмической реализации генетического алгоритма описан в [84].

Настройка параметров генетического алгоритма выполняется в отдельном окне (рис. 3.11).

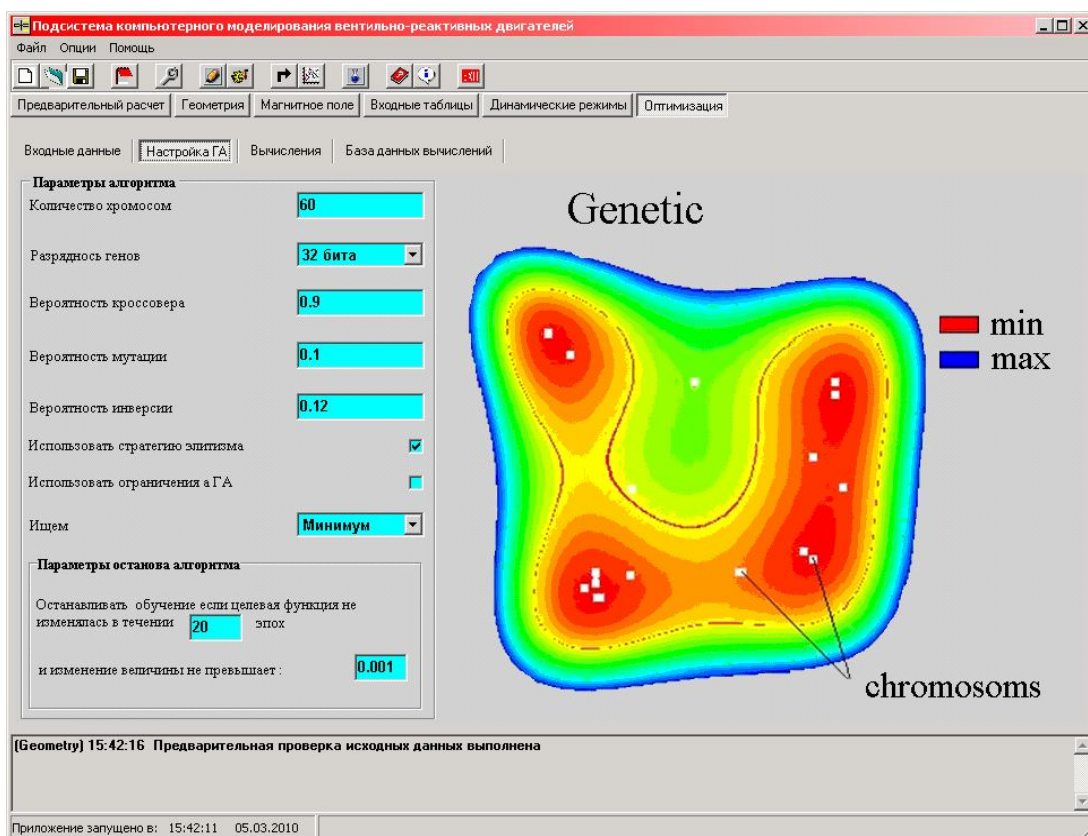


Рисунок 3.11 – Настройка параметров генетического алгоритма



Запуск, контроль и остановка алгоритма оптимизации выполняется из вкладки “вычисления”. Результаты работы выносятся на вкладку “база данных вычислений”.

При работе с основными подсистемами SRM-CAD, в том числе и с подсистемой оптимизации, пользователю нужна информационная поддержка, как в виде предоставления справочных материалов, так и в виде системы контроля ошибок, которые могут возникнуть в процессе работы. Именно для этого в системе SRM-CAD используется информационная подсистема, описание которой приведено ниже.

### 3.2.5. Информационная подсистема

К информационной подсистеме относится справочная база данных, содержащая ряд нормализованных диаметров и сечений обмоточных проводов, характеристики намагничивания сталей и т.д. [34, 41]. Физически справочная база данных представляет собой множество файлов, расположенных в служебном каталоге. Каждый из файлов – это текстовый файл, благодаря чему просматривать и редактировать его можно в любом текстовом редакторе.

Пользователь может получить справку о работе программы и правилах ввода исходных данных в различные подсистемы SRM-CAD, обратившись в главное меню к пункту “помощь”. При этом открывается окно, показанное на рис. 3.12. Вся информация представлена в виде pdf-файлов.

Кроме справочной базы данных в информационную подсистему входят информационная поддержка пользователя и система обработки ошибок. В связи с тем, что при вводе исходных данных для какой-либо подсистемы могут возникнуть ошибки, создана система обработки ошибок. Она упрощает локализацию ошибки, при ошибочном вводе – сообщает об этом и предоставляет рекомендации относительно дальнейших действий. Источником информации выступают коды ошибок, расшифровка которых приведена в руководстве пользо-

вателя системы SRM-CAD (приложение Б). Для информирования пользователя существует информационная панель, размещенная в нижней части программы SRM-CAD. Так как система состоит из нескольких подсистем, то для каждой из них выделены определенные диапазоны кодов.

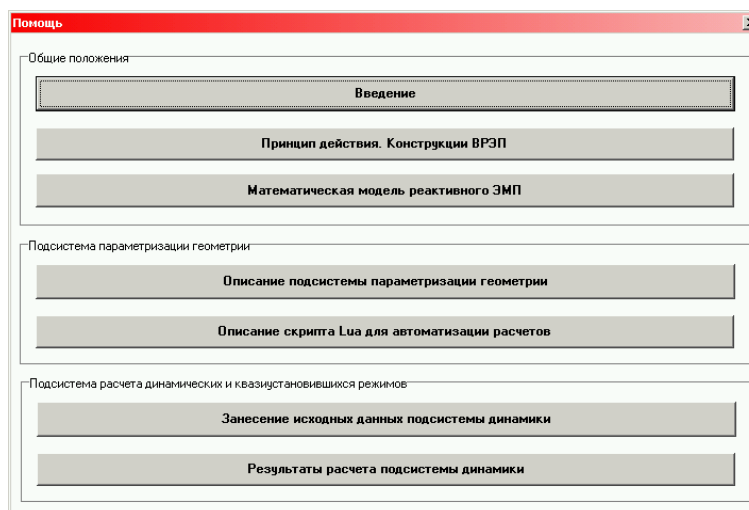


Рисунок 3.12 – Форма информационной поддержки пользователя

Все сообщения имеют определенный формат: тип сообщения, от какой подсистемы получено сообщение, его цифровой код и время, когда произошла ошибка, текст сообщения и рекомендации по устранению ошибки. Например:

Ошибка (Dynamics): 102 [11:25:46] Невозможно выполнить преобразование таблиц, нет таблицы моментов.

Если сообщение носит информационный характер, то в нем сообщается от какой подсистемы получено, время и собственно текст сообщения. Например:

(Geometry) [18:43:12] Предварительная проверка исходных данных выполнена.

Информационная подсистема базируется на принципах открытой структуры, благодаря чему возможно ее расширение и модернизация.

### 3.3. Выводы

1. Сформулированы принципы построения и разработана система автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD. Модульная структура системы позволяет выполнять ее расширение и модернизацию по мере необходимости.

2. Разработанная система SRM-CAD инвариантна к ряду конструктивных исполнений ЭМП ВРД, что позволяет в процессе проектирования изменять структуру ЭМП и осуществлять выбор оптимальной структуры. Для оперативного изменения структуры реализована параметризация геометрии ЭМП ВРД.

3. Система SRM-CAD позволяет реализовать цикл проектирования, от технического задания, до расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы и проверки теплового состояния ЭМП ВРД с использованием полевых ММ.

4. Представленные программные средства симуляции электромеханических процессов в ВРД позволяют оперативно проводить исследования влияния различных факторов на процессы в электроприводе. Они могут быть основой для проведения оптимизации ВРД на базе цепно-полевой математической модели высокой степени детализации, с возможностью расчета динамических и квазиустановившихся режимах работы.

5. В подсистеме оптимизации реализована возможность одновременного поиска по многим переменным, позволяющая избегать попадания в локальный оптимум благодаря применению генетического алгоритма.

6. Программный комплекс SRM-CAD написан на компилируемом языке высокого уровня, что позволяет существенно ускорить время расчета переходных процессов, особенно в сравнении с подсистемами реализованными в средах MathCad, MatLab Simulink и LabView.

## РАЗДЕЛ 4

### АНАЛИЗ И СИНТЕЗ

### ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Метод синтеза совместно с анализом, позволяет получить представления о связях между составляющими предмета изучения. Для улучшения технических характеристик ВРД можно оптимизировать ЭМП, систему управления, а также улучшить их взаимодействие.

Ниже представлены некоторые варианты улучшения технических характеристик ВРД:

- анализ и выбор конфигурации зубцовой зоны ЭМП ВРД;
- анализ и выбор коэффициентов полюсного перекрытия ротора и статора ЭМП ВРД;
- анализ влияния параметров коммутации на характеристики ВРД;
- сопоставительный анализ трех и четырехфазных ВРД;
- синтез ВРД для привода активатора маслобойки.

#### 4.1. Анализ и выбор конфигурации зубцовой зоны электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя

Одним из важнейших вопросов при проектировании ВРД – это выбор конфигурации активной зоны статора и ротора, так как этот фактор оказывает существенное влияние на его свойства. Например, в [112] анализ пяти вариантов геометрической формы зубцов статора носит чисто описательный характер, а рекомендации по выбору той или иной конфигурации не приводятся. В [87] конфигурацию полюсов статора предлагается выбирать только из соображений удешевления технологии изготовления, а форму полюсов ротора – произвольной. В [63] рассмотрены пять форм зубцов статора, для них выполнен детальный анализ, однако, не затронут вопрос конфигурации полюсов ротора. Данное

исследование должно в определенной мере заполнить существующий пробел в этой области проектирования ВРД. При этом предлагается решить задачу по оптимизации не только формы полюсных наконечников статора и ротора, но и коэффициентов полюсного перекрытия полюсов.

Рассмотрим SRM-80-45 – это четырехфазный ВРД классической конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6 выпускаемый ООО “Электротехника – Новые технологии” [48]. Наружный диаметр статора 82 мм, внешний диаметр ротора 41.7 мм, величина воздушного зазора 0.15 мм, длина пакета статора 45 мм. Внешний вид ЭМП SRM-80-45 показан на рис. 4.1.

При пуске и перегрузках возрастает насыщение магнитной системы двигателя. Поэтому определение значения электромагнитного момента необходимо выполнять с учетом насыщения стали, что возможно при использовании численных методов расчета магнитного поля МКЭ. Использование численных методов расчета магнитного поля в электрических машинах позволяет выполнять исследования и оптимизацию различных конструктивных исполнений электрических машин [58, 71].



Рисунок 4.1 – Электромеханический преобразователь SRM-80-45

В конструктивных исполнениях ВРД получили применение ряд конфигураций зубцов статора, основные из которых приведены в [63] и представлены на рис. 4.2.

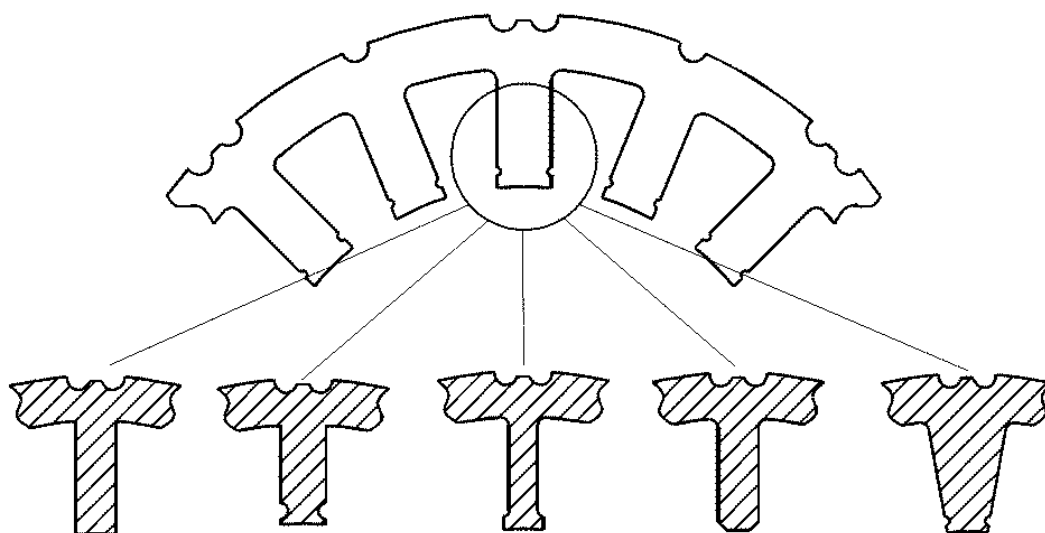


Рисунок 4.2 – Конфигурация зубцов статора ЭМП ВРД

Известные варианты конфигурации полюсов статора ЭМП ВРД можно свести к нескольким базовым: расширяющийся от края к основанию, прямой и сужающийся от края к основанию. На рис. 4.3,а представлены предлагаемые три базовых конфигурации полюса статора. Варианты применяемых конфигураций полюсов ротора представлены на рис. 4.3,б.

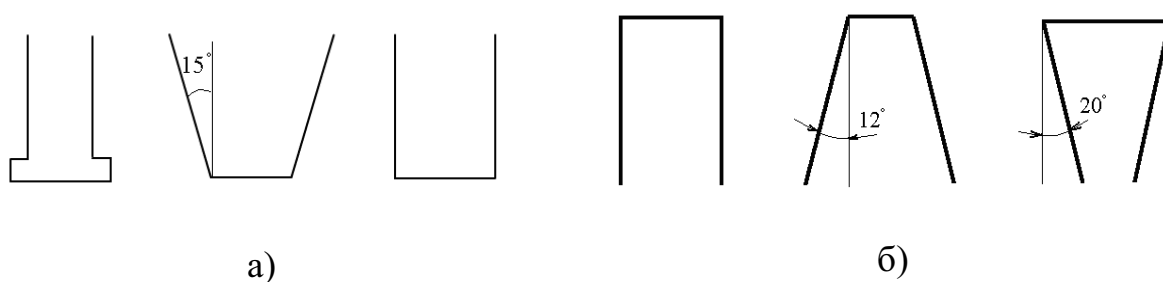


Рисунок 4.3 – Различные варианты полюсов статора и ротора:

а – базовые варианты конфигурации полюсов статора;

б – базовые варианты конфигураций полюсов ротора

Используя три базовых варианта конфигураций полюсов для статора и три варианта для ротора можно получить комбинацию сочетаний из девяти вариантов ЭМП. Кроме формы полюса большое влияние на характеристики ВРД оказывает такая величина, как коэффициент полюсного перекрытия [55, 87].

Поэтому, для каждого из девяти вариантов необходимо определить оптимальные коэффициенты полюсного перекрытия статора и ротора. И уже по результатам оптимизации каждой конструкции может быть определен лучший вариант.

Для оценки эффективности применения того или иного варианта конфигурации полюсов используем два критерия, коэффициент пульсаций момента и средний электромагнитный момент:

- среднее значение статического электромагнитного момента  $M_{CP}$ , получаемое интегрированием зависимости  $M_{EM} = f(\theta)$  на периоде коммутации

$$M_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{EMi}}{i}, \quad i \in [1, N]; \quad (4.1)$$

- коэффициент пульсаций момента

$$K_{\Pi} = \frac{\max(M_i) - \min(M_i)}{2 \cdot M_{CP}}, \quad i \in [1, N]; \quad (4.2)$$

где  $M_i$  – значение мгновенного момента в  $i$ -ой точке зоны коммутации;

$N$  – число расчетных точек за период коммутации.

Для каждой конфигурации моделировалось изменение угла поворота ротора в пределах зоны коммутации от 7.5 до 22.5 градусов. Шаг поворота ротора 1.5 градуса. Значение МДС в фазе статора соответствует номинальному и составляет 240 А (за номинальную принимается МДС, которая обеспечивает средний момент 0.4 Н·м).

В таблицах 4.1 – 4.3 приведены конфигурации полюсов статора и ротора и пределы изменения коэффициентов полюсного перекрытия.

Таблица 4.1 – Варианты активной зоны ЭМП (варианты 1 – 3)

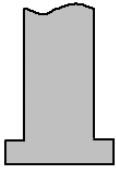
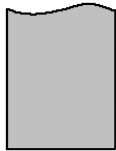
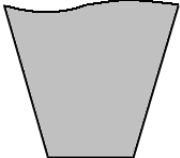



№ конструкции	1	2	3
Форма зубца статора			
Форма зубца ротора			
Пределы изменения, $\alpha_R$ (ротор)	$\alpha_R = 0.25 \div 0.55$		
Пределы изменения, $\alpha_S$ (статор)	$\alpha_S = 0.3 \div 0.675$		

Таблица 4.2 – Варианты активной зоны ЭМП (варианты 4 – 6)

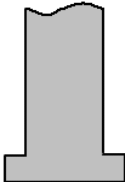
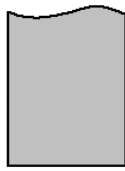
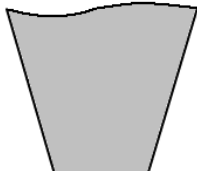
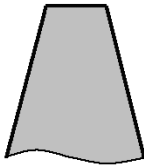
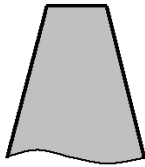
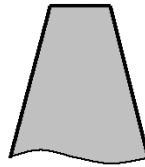
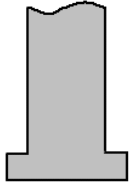
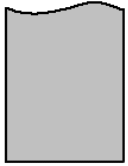
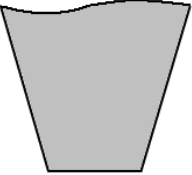
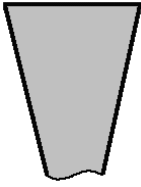
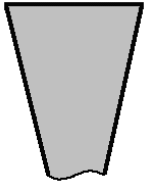
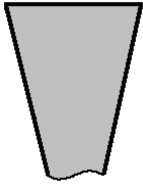
№ конструкции	4	5	6
Форма зубца статора			
Форма зубца ротора			
Пределы изменения, $\alpha_R$ (ротор)	$\alpha_R = 0.25 \div 0.5$		
Пределы изменения, $\alpha_S$ (статор)	$\alpha_S = 0.3 \div 0.675$		



Таблица 4.3 – Варианты активной зоны ЭМП (варианты 7 – 9)

№ конструкции	7	8	9
Форма зубца статора			
Форма зубца ротора			
Пределы изменения, $\alpha_R$ (ротор)	$\alpha_R = 0.25 \div 0.625$		
Пределы изменения, $\alpha_S$ (статор)	$\alpha_S = 0.3 \div 0.675$		

Таким образом, постановка задачи оптимизации следующая: варьируемыми переменными для каждой из конфигураций являются коэффициенты полюсного перекрытия статора и ротора, критериями оптимизации выступают значение среднего момента на периоде коммутации (4.1) и коэффициент пульсаций момента (4.2). В связи с малой размерностью оптимизационной задачи целесообразно использовать метод полного перебора.

По результатам исследования девяти конструкций ЭМП ВРД получены значения среднего электромагнитного момента и коэффициента пульсаций момента от коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора для каждого варианта конструкции. На базе полученных данных для каждой конструкции были созданы регрессионные модели по рекомендациям [72, 96, 97]. По полученным регрессионным моделям можно определить коэффициенты полюсного перекрытия статора и ротора, при которых средний электромагнитный момент на периоде коммутации максимален, а коэффициент пульсаций момента минимален.

Регрессионное уравнение шестого порядка, описывающие распределение среднего электромагнитного момента на периоде коммутации для первой конструкции, приведено ниже:

$$\begin{aligned}
 M_{CP}(\alpha_S, \alpha_R) = & 3845.521 \cdot \alpha_S \alpha_R^5 + 1354.877 \cdot \alpha_R^6 - 4981.182 \cdot \alpha_R^5 + \\
 & + 6132.108 \cdot \alpha_R^4 - 5391.658 \cdot \alpha_S \alpha_R^4 - 2525.05 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R^4 - \\
 & - 3381.381 \cdot \alpha_R^3 + 1303.031 \cdot \alpha_S \alpha_R^3 + 6427.173 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R^3 - \\
 & - 1664.786 \cdot \alpha_S^3 \alpha_R^3 + 850.542 \cdot \alpha_R^2 + 1145.691 \cdot \alpha_S \alpha_R^2 - \\
 & - 5535.5 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R^2 + 2571.315 \cdot \alpha_S^3 \alpha_R^2 - 334.443 \cdot \alpha_S^4 \alpha_R^2 - \\
 & - 97.503 \cdot \alpha_R - 395.237 \cdot \alpha_S \alpha_R + 917.677 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R + \\
 & + 953.571 \cdot \alpha_S^3 \alpha_R - 2016.779 \cdot \alpha_S^4 \alpha_R + 945.807 \cdot \alpha_S^5 \alpha_R + \\
 & + 21.118 - 180.924 \cdot \alpha_S + 1065.104 \cdot \alpha_S^2 - 3094.911 \cdot \alpha_S^3 + \\
 & + 4424.126 \cdot \alpha_S^4 - 3130.778 \cdot \alpha_S^5 + 867.775 \cdot \alpha_S^6,
 \end{aligned}$$

Максимальная относительная погрешность составляет для регрессионной модели, описывающей средний электромагнитный момент, 0.7 %, а для регрессионной модели, описывающей коэффициент пульсаций момента, 5.8 %.

На рис 4.4 показана графическая интерпретация регрессионной модели среднего электромагнитного момента, для сравнения приведены исходные точки, рассчитанные с использованием полевой модели.

Регрессионные модели для всех других исследованных вариантов конструкций ЭМП ВРД в табличном виде приведены в приложении Г.

Используя регрессионные модели для каждой из конструкций определены оптимальные значения коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора, которые обеспечивают максимальный средний электромагнитный момент на периоде коммутации при минимальном коэффициенте пульсаций момента (табл. 4.4).

Регрессионная модель коэффициента пульсаций момента от коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора на периоде коммутации приведена на рис. 4.5.

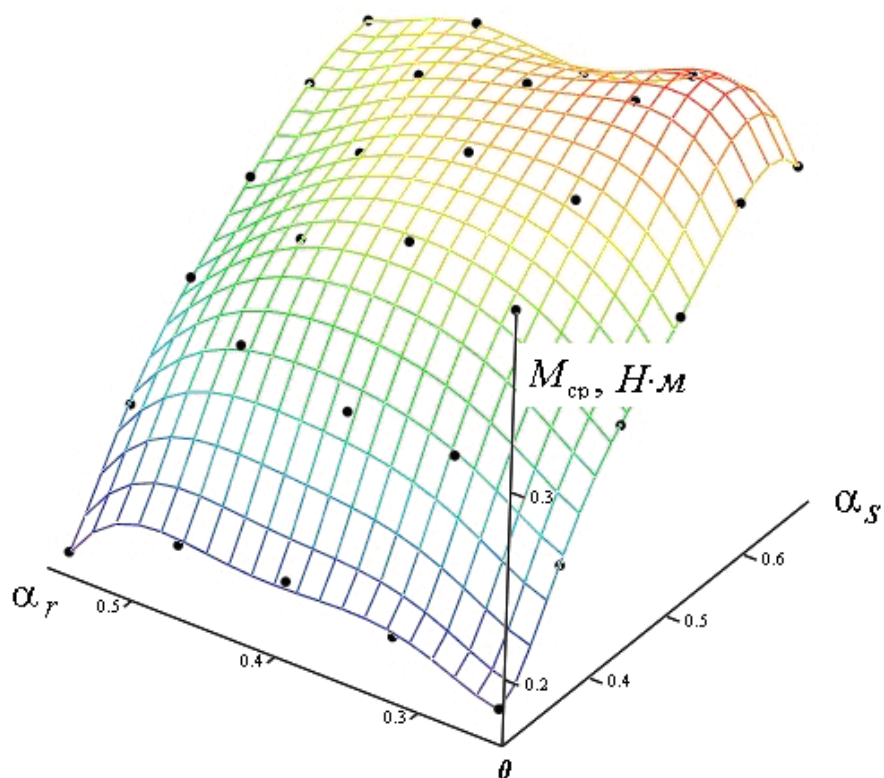


Рисунок 4.4 – Зависимость  $M_{CP} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  для первой конструкции

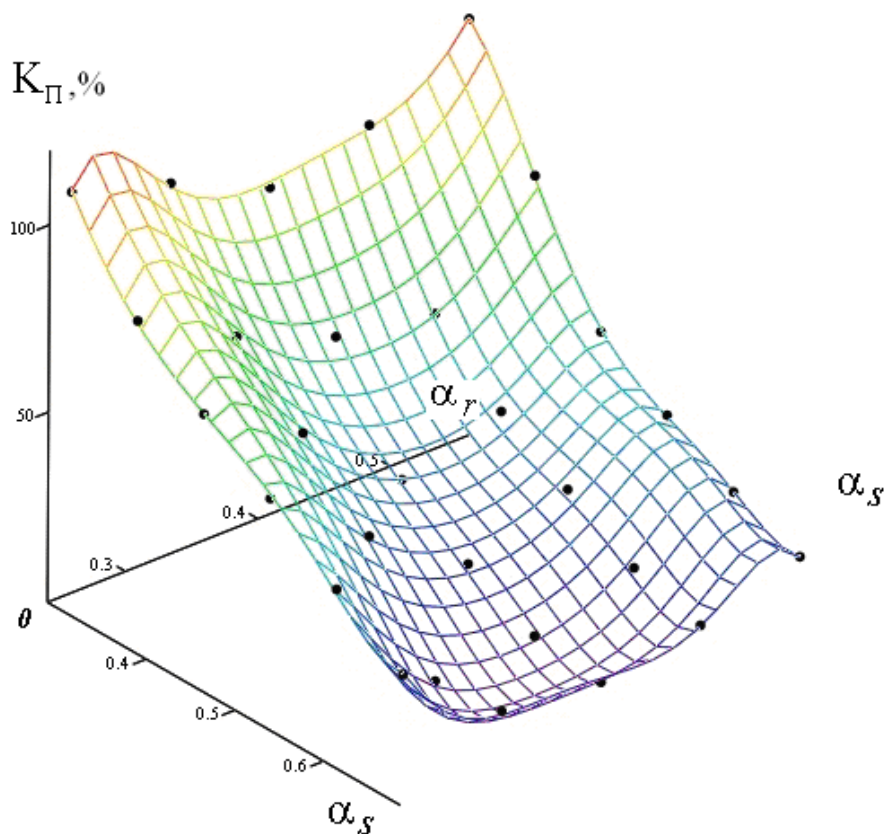




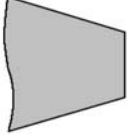


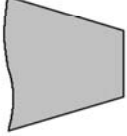


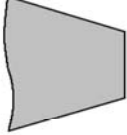


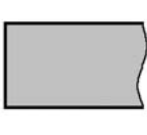
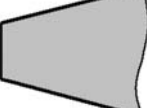
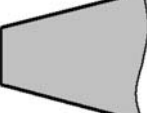
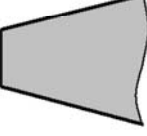
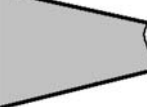
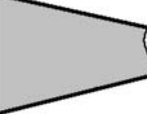
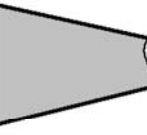
Рисунок 4.5 – Зависимость  $K_{II} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  для первой конструкции

С точки зрения технологии производства ЭМП, полюс статора показанный в варианте 1 позволяет удерживать катушку за счет своей формы. Для вариантов 2 и 3 необходимо применять специальные конструкторские решения для удержания катушек на полюсах, или выполнить в полюсе вырез под пазовый клин. Клинья являются надежным креплением катушек обмотки статора при ручной намотке и при этом вырезы под них не приводят к ощутимым изменениям электромагнитного момента [63].

Проанализировав таблицу 4.4 можно сделать следующие выводы:

- не рекомендуется применять конфигурацию активной зоны ротора из вариантов 7 – 9, где форма полюса ротора сужается от края к основанию, поскольку у этих вариантов коэффициент пульсаций момента увеличен, а средний момент на периоде коммутации снижен;
- в качестве активной зоны ротора рекомендуется использовать форму полюса с параллельными стенками (варианты 1 – 3), поскольку использование такой формы полюса ротора с оптимальными коэффициентами полюсного перекрытия статора и ротора обеспечивает хорошие показатели максимального среднего электромагнитного момента на периоде коммутации при минимальном коэффициенте пульсаций момента; кроме того, в вариантах 1 – 3 уменьшается использование электротехнической стали и ротор обладает меньшим моментом инерции;
- при форме зубца ротора с параллельными стенками наибольший средний момент развивают конструкции ЭМП с полюсами статора показанными в вариантах 2 и 3. При этом вариант 2 является более предпочтительным, так как именно в этом варианте под катушки отводится большая площадь.

Таблица 4.4

№ конструкции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Форма зуба статора									
Форма зуба ротора									
Значения оптимальных $\alpha_s$ и $\alpha_r$ , <i>о.е.</i>	$\alpha_s = 0.64$ $\alpha_r = 0.33$	$\alpha_s = 0.63$ $\alpha_r = 0.35$	$\alpha_s = 0.45$ $\alpha_r = 0.5$	$\alpha_s = 0.6$ $\alpha_r = 0.35$	$\alpha_s = 0.6$ $\alpha_r = 0.35$	$\alpha_s = 0.6$ $\alpha_r = 0.42$	$\alpha_s = 0.55$ $\alpha_r = 0.4$	$\alpha_s = 0.5$ $\alpha_r = 0.45$	$\alpha_s = 0.45$ $\alpha_r = 0.5$
$M_{CP}, H \cdot м$	$M_{CP} = 0.38$	$M_{CP} = 0.4$	$M_{CP} = 0.4$	$M_{CP} = 0.37$	$M_{CP} = 0.39$	$M_{CP} = 0.4$	$M_{CP} = 0.36$	$M_{CP} = 0.38$	$M_{CP} = 0.39$
$K_{\Pi}, \%$	$K_{\Pi} = 4.5$	$K_{\Pi} = 5.7$	$K_{\Pi} = 2.4$	$K_{\Pi} = 5.9$	$K_{\Pi} = 6$	$K_{\Pi} = 4.5$	$K_{\Pi} = 16.8$	$K_{\Pi} = 13.1$	$K_{\Pi} = 6$

#### 4.2. Анализ и выбор коэффициентов полюсного перекрытия ротора и статора электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя

В литературе существуют различные рекомендации по выбору геометрических размеров ЭМП ВРД. Однако эти рекомендации зачастую носят противоречивый характер. Например, при выборе коэффициентов полюсного перекрытия статора –  $\alpha_S$  и ротора –  $\alpha_R$ , проектировщики сталкиваются с тем, что рекомендуемые диапазоны изменения указанных коэффициентов не позволяют принять однозначное решение. Это наглядно показано в [12], где анализируется выбор указываемых коэффициентов для четырехфазного ВРД классической конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6.

При проектировании трехфазных ВРД оптимальный выбор коэффициентов полюсного перекрытия очень важен, так как это влияет на распределение магнитного поля ВРД и оказывает влияние на величину электромагнитного момента и уровень его пульсаций. От чего, в конечном итоге, зависят энергетические и рабочие свойства ВРД. Существующие рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора для трехфазных ВРД приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия ВРД с соотношением чисел полюсов 6/4

Литературный источник	Коэффициенты	
	$\alpha_S$	$\alpha_R$
[17]	0.5	0.33 – 0.5
[39]	0.5	0.36
[87]	0.63	0.42
[109]	0.35 ÷ 0.5	0.3 ÷ 0.45
[112]	0.5 ÷ 0.75	0.35 ÷ 0.65

Рекомендации в [39, 87, 109] и [112] даны на основе аналитических моделей, которые обладают лишь некоторой степенью приближения к реальным процессам. В связи с этим представляет интерес получения рекомендаций по выбору коэффициентов полюсного перекрытия на основе полевых ММ, которые позволяют точнее учесть реальную геометрию электромеханического преобразователя.

Для уточнения рекомендаций по выбору коэффициентов полюсного перекрытия  $\alpha_S$  и  $\alpha_R$ , а также оценки их влияния на рабочие свойства двигателя были проведены расчетные исследования трехфазного ВРД с соотношением чисел полюсов статора к ротору 6/4 (рис. 4.6). Геометрические размеры исследуемого ВРД приведены в табл. 4.6.

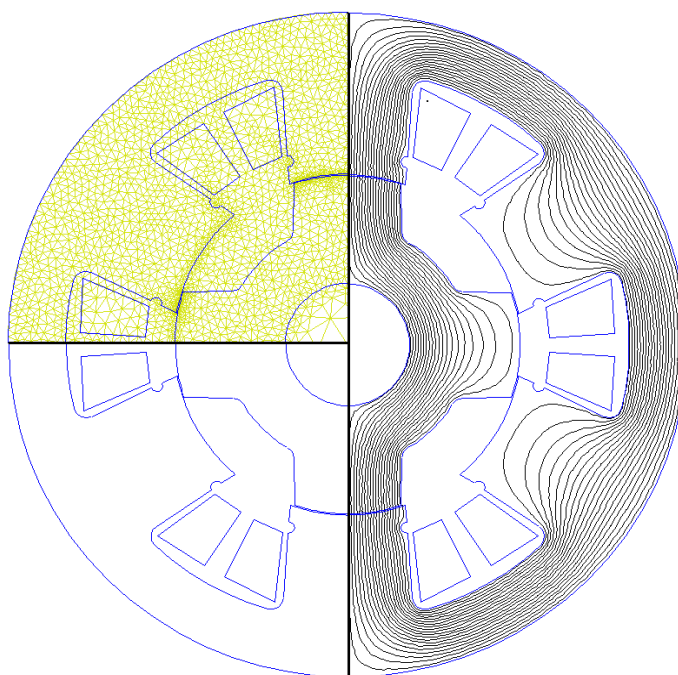


Рисунок 4.6 – Поперечное сечение трехфазного ЭМП ВРД классической конструкции 6/4, разбиение на конечные элементы и распределение магнитного поля

В качестве номинального принят момент, развиваемый ЭМП ВРД при МДС фазы двигателя 480 А. Изменение электромагнитного момента  $M_{EM}$  рассматривается в зависимости от угла поворота ротора  $\theta = (0 \div 45)$  град. Где

$\theta = 0$  град. соответствует полностью рассогласованному положению полюса ротора относительно статора, когда ось зубца статора совпадает с осью паза ротора. А  $\theta = 45$  град. соответствует согласованному положению. Зависимости  $M_{EM} = f(\theta)$  для трех значений МДС фазы представлены на рис. 4.7.

Таблица 4.6 – Геометрические размеры ЭМП ВРД

Размер	Значение, мм
Наружный диаметр статора	82
Наружный диаметр ротора	41.7
Длина пакета статора	45
Высота полюса статора	13
Высота полюса ротора	6.2
Воздушный зазор	0.15

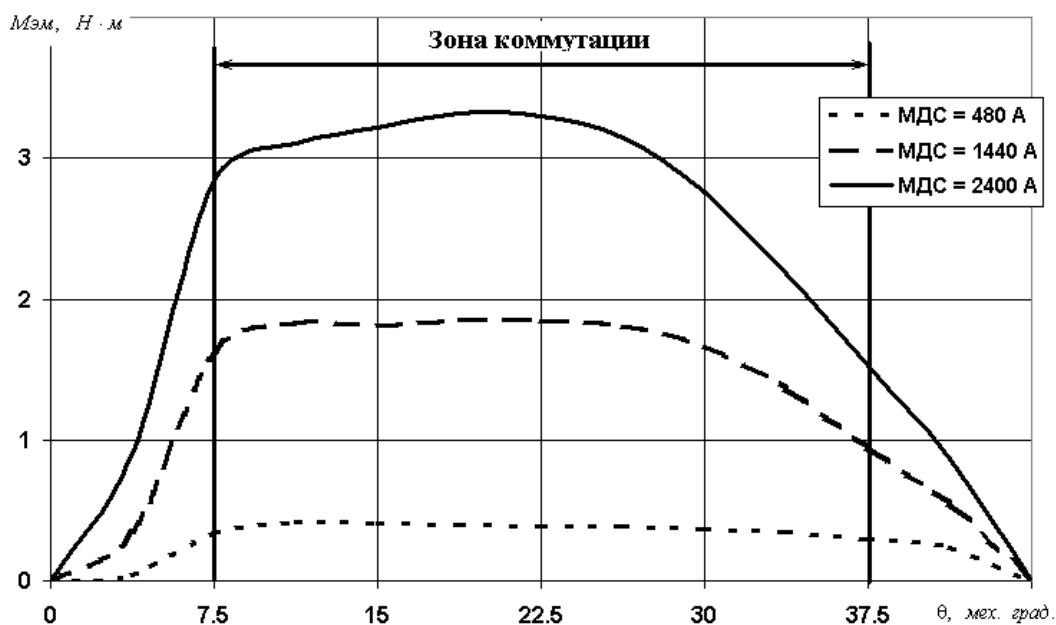


Рисунок 4.7 – Зависимости  $M_{EM} = f(\theta)$   
для трех значений МДС фазы

Включение фазы осуществляется при  $\theta_{ON} = 7.5$  град., отключение – при  $\theta_{OFF} = 37.5$  град., т.е. период коммутации составляет  $T_{КОМ} = 30$  град. Рабочие



свойства ВРД можно оценить по критерию максимума среднего электромагнитного момента (4.2).

Указанные величины определяются на основе результатов расчета магнитного поля ВРД методом конечных элементов, с использованием ММ, описанной в разделе 2, при этом выполняется разбиение расчетной области на конечные элементы (см. рис. 4.6). Исходные данные для полевой модели готовятся в подсистеме параметризации геометрии (см. раздел 3.2.2), которая входит в систему автоматизированного синтеза SRM-CAD.

Поворот ротора осуществляется от полностью рассогласованного положения к согласованному положению с шагом 1.875 градуса. Расчеты проводились для различных МДС фазы двигателя, от номинального значения 480 А, до пятикратной перегрузки 2400 А.

При проведении исследований допустимая область изменения коэффициентов  $\alpha_R$  и  $\alpha_S$  принята следующей:  $\alpha_R \in [0.25; 0.6]$ ,  $\alpha_S \in [0.3; 0.8]$ . Это позволило охватить практически всю область возможного изменения этих коэффициентов. Шаг изменения коэффициентов 0.01 о.е. Для примера, на рис. 4.8 приведен один из вариантов поперечного сечения ЭМП ВРД с коэффициентами  $\alpha_R$  и  $\alpha_S$  из допустимой области.

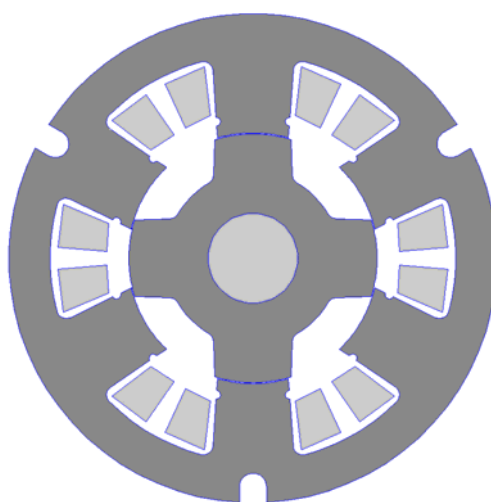


Рисунок 4.8 – Поперечное сечение ЭМП ВРД

с коэффициентами полюсного перекрытия  $\alpha_R = 0.40$  о.е. и  $\alpha_S = 0.55$  о.е.

По результатам исследований построены линии равного уровня в плоскости  $(\alpha_S, \alpha_R)$  от функций коэффициента пульсаций момента  $K_{II}$  и величины среднего момента  $M_{CP}$  от коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора, полученные путем аппроксимации двумерными сплайнами результатов расчета магнитного поля. Для номинальной МДС 480 А показаны линии уровня функций  $K_{II} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  (рис. 4.9) и  $M_{CP} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  (рис. 4.10).

При пятикратной перегрузке, т.е. при МДС равной 2400 А, приведены линии уровня функций  $K_{II} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  (рис. 4.11) и  $M_{CP} = f(\alpha_S, \alpha_R)$  (рис. 4.12).

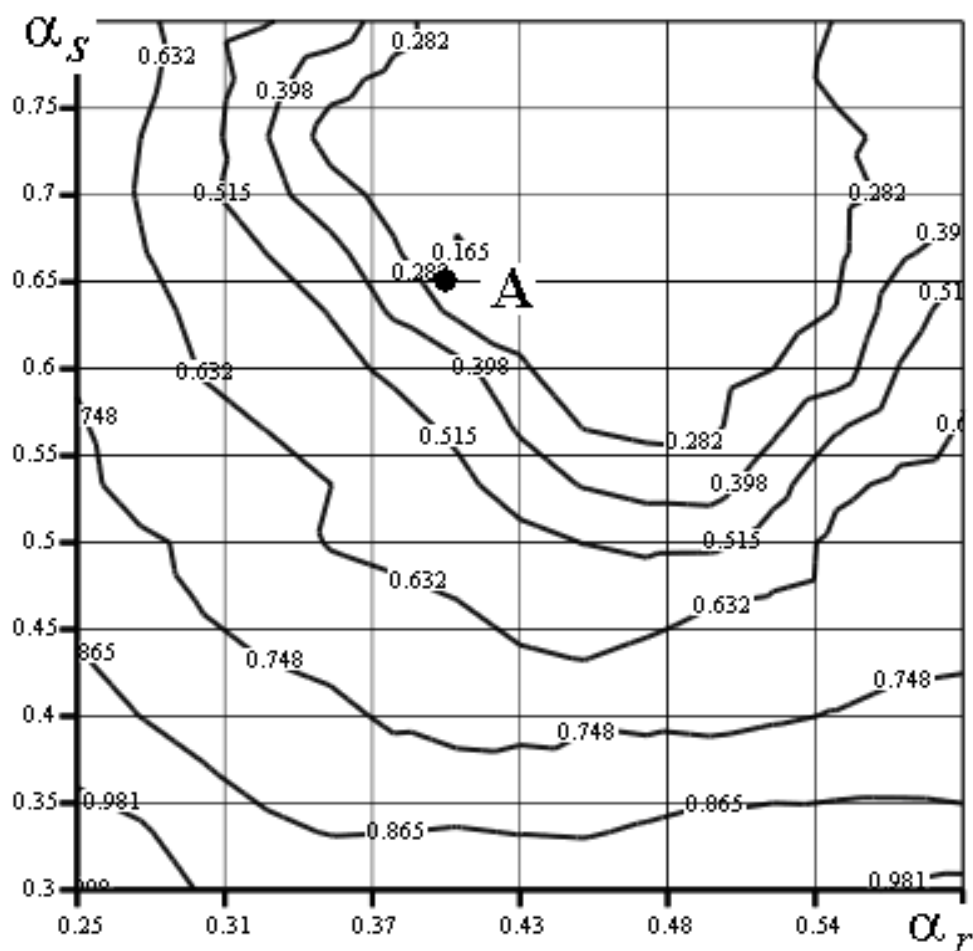


Рисунок 4.9 – Линии уровня коэффициента пульсаций момента ВРД,  $K_{II} = f(\alpha_S, \alpha_R)$ , при МДС равной 480 А (номинальная нагрузка)

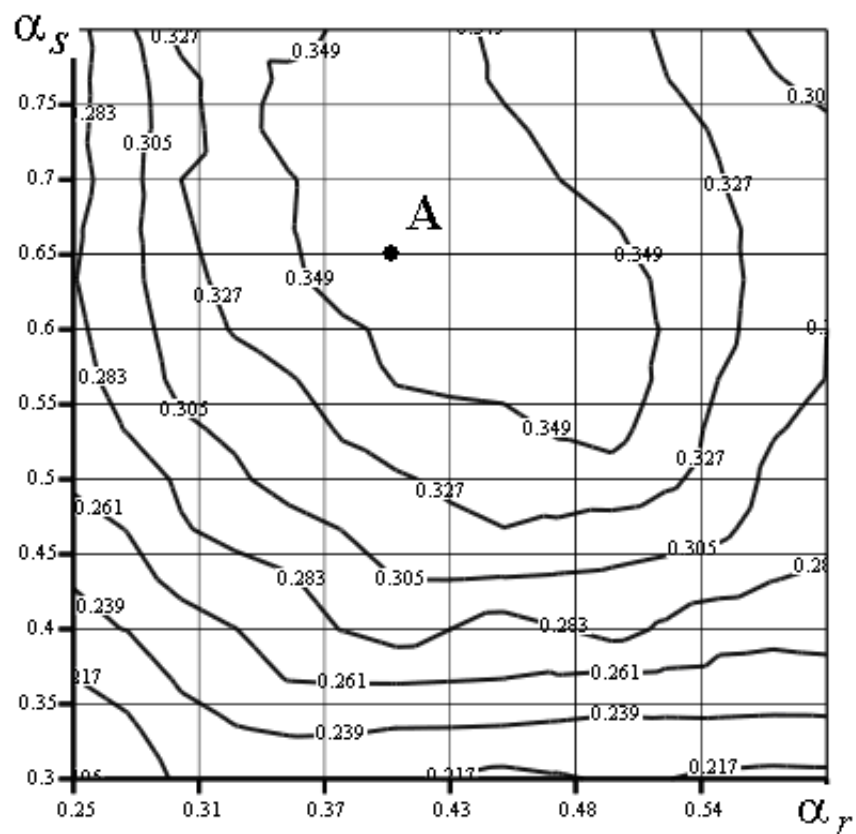


Рисунок 4.10 – Линии уровня  $M_{CP} = f(\alpha_S, \alpha_R)$ , при номинальной МДС (480 А)

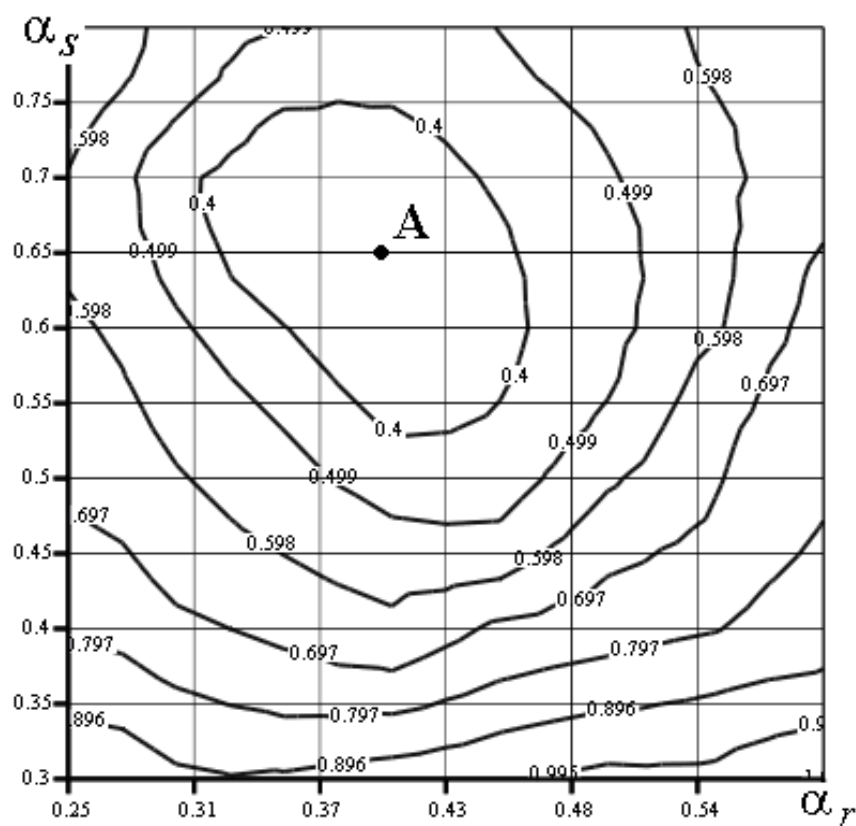


Рисунок 4.11 – Линии уровня  $K_{II} = f(\alpha_S, \alpha_R)$ , при МДС равной 2400 А

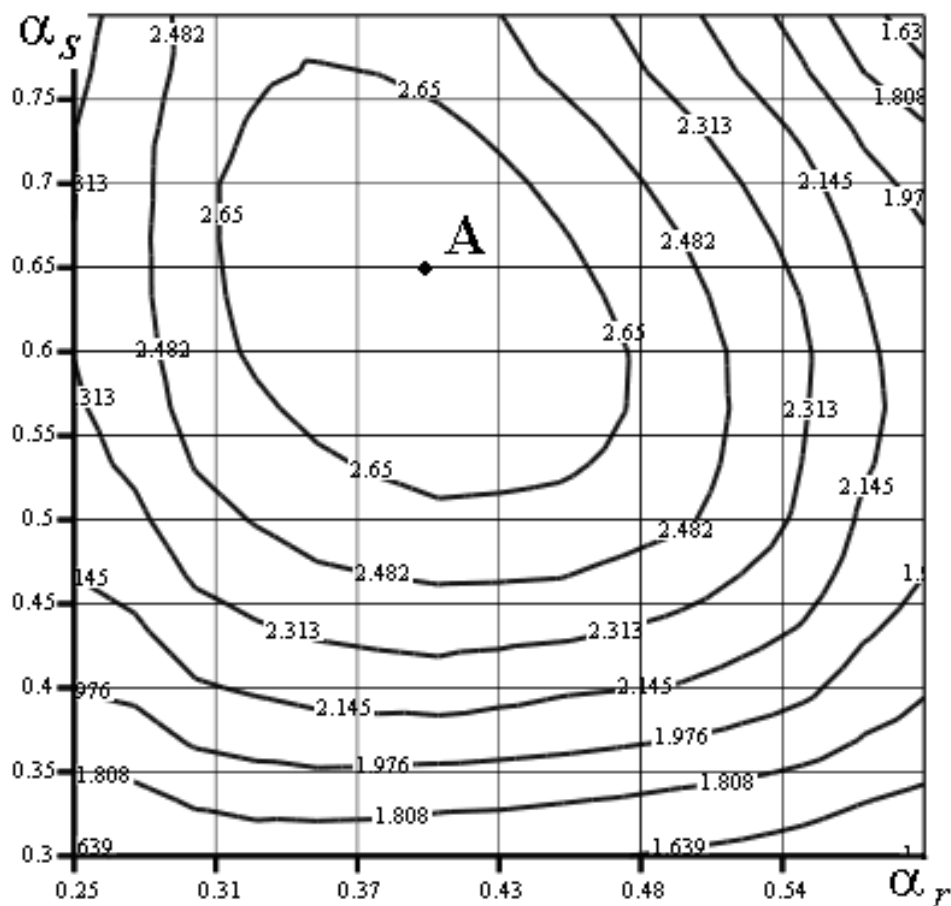


Рисунок 4.12 – Уровни среднего электромагнитного момента ВРД,  $M_{CP} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ , при МДС равной 2400 А (пятикратная перегрузка)

Из представленного графического материала следует, что области экстремумов функций  $K_{II} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  и  $M_{CP} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  совпадают. Максимальный средний момент и минимальный уровень пульсаций обеспечиваются при коэффициентах полюсного перекрытия  $\alpha_s = 0.65$  о.е. и  $\alpha_r = 0.4$  о.е., использование этих величин при номинальной МДС позволяет получить  $M_{CP} = 0.35 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $K_{II} = 0.32$  о.е., что соответствует точке “А” на рисунках 4.9 – 4.12.

Рассмотрим зависимость электромагнитного момента от положения ротора для электромеханического преобразователя ВРД, с рекомендованными в этой работе коэффициентами полюсного перекрытия статора и ротора (рис. 4.13). Для сравнения, на этом же рисунке, приведем зависимости электромагнитного момента, полученные по рекомендациям [39] и [87]. Зависимости

электромагнитного момента от положения ротора при пятикратной перегрузке приведены на рис. 4.14.

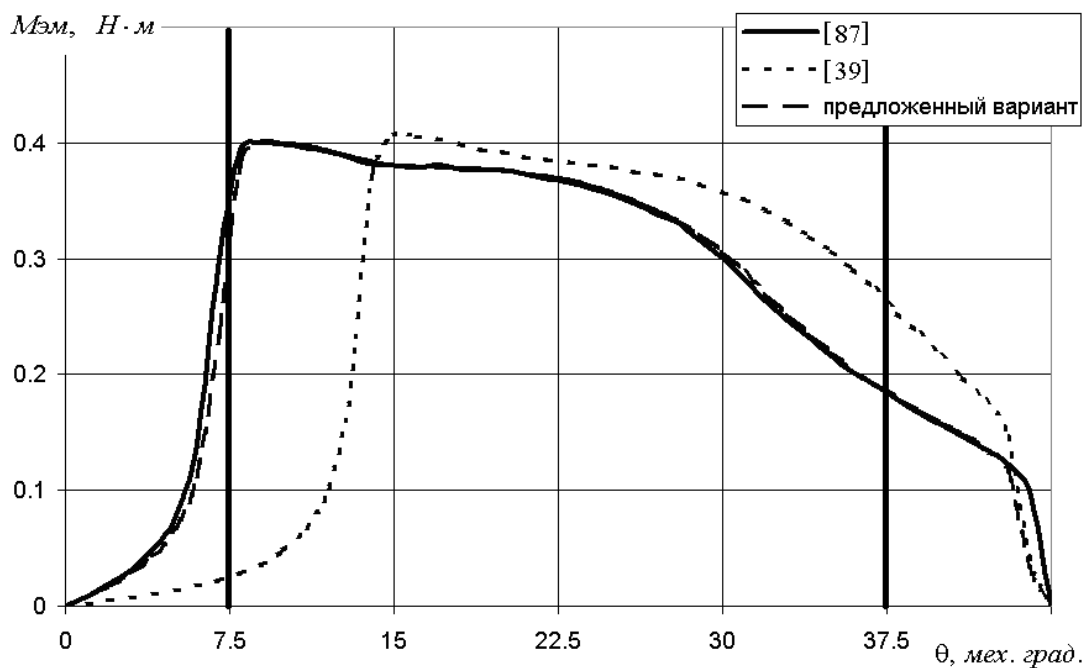


Рисунок 4.13 – Зависимости электромагнитного момента от положения ротора при номинальной МДС

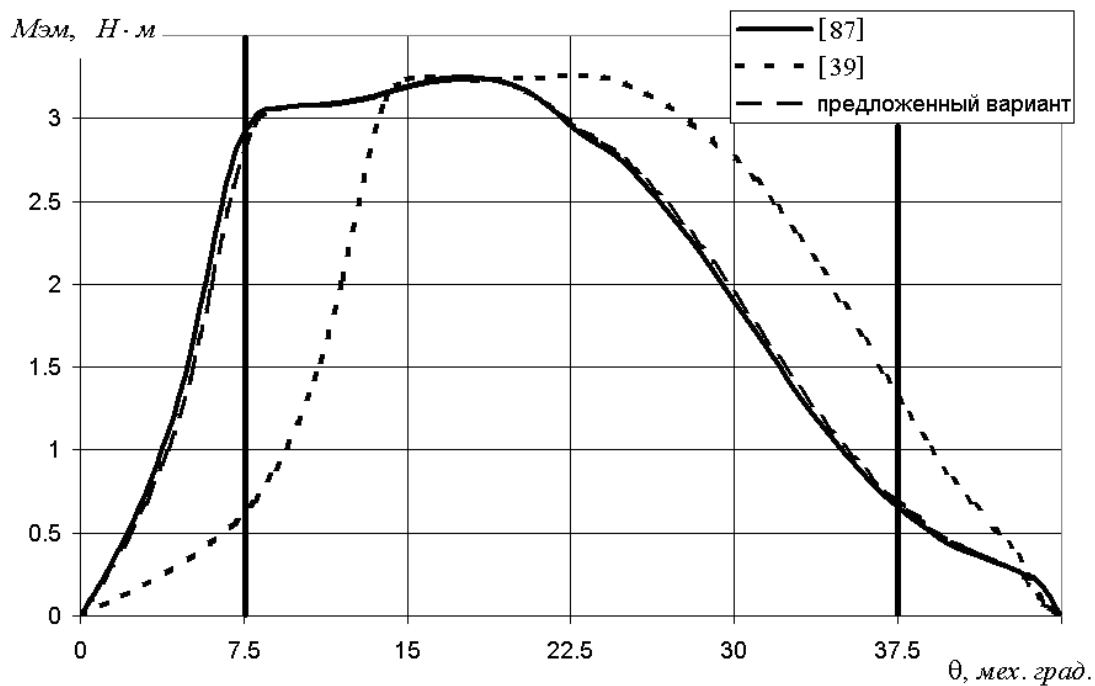


Рисунок 4.14 – Зависимости электромагнитного момента от положения ротора при пятикратной перегрузке

Из рисунка 4.13 следует, что максимальный средний момент и минимальный уровень пульсаций при зоне коммутации от 7.5 до 22.5 градусов обеспечивается при коэффициентах полюсного перекрытия  $\alpha_S = 0.65$  о.е. и  $\alpha_R = 0.4$  о.е. Из существующих рекомендаций, приведенных в таблице 4.5, можно рекомендовать [87]. ЭМП ВРД с данными коэффициентами полюсного перекрытия, т.е.  $\alpha_S = 0.63$  о.е. и  $\alpha_R = 0.42$  о.е., при номинальной МДС обеспечивает средний момент  $M_{CP} = 0.34 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и коэффициент пульсаций  $K_{II} = 0.33$  о.е.

### 4.3. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентиляно-реактивных двигателей

Из [87, 109, 112] известно, что выбор параметров коммутации фаз ВРД оказывает существенное влияние на его рабочие свойства и энергетические показатели. Важно выполнить анализ возможных технических решений при формировании углов коммутации фаз и разработать рекомендации для улучшения характеристик и энергетических свойств ВРД.

Для улучшения характеристик ВРД при помощи изменения параметров коммутации возможны следующие способы:

1. Применение буферных конденсаторов, ускоряющих рост тока во включаемой фазе. Это вызывает необходимость применения электронных силовых компонентов на повышенное напряжение.
2. Симметричное расширение зоны коммутации фаз. В этом варианте необходимо применение датчика, имеющего вместо двух каналов уже четыре – по числу фаз ВРД.
3. Расширение зоны коммутации с опережением включения фаз, что требует, для реверсивных ВРД, увеличения числа сигналов с датчика положения ротора до восьми. При этом угол включения фазы смещается в сторону рассогласованного положения полюсов статора и ротора.

4. Применение инкрементного энкодера с большим числом импульсов на оборот (360 и более), позволяющего определять текущее положение ротора ВРД и с помощью СУ программно задавать углы включения/отключения фаз в зависимости от скорости вращения ротора, а также формировать токи фаз при их выключении. Аналогичные возможности предоставляет бездатчиковое управление ВРД.

Первый способ детально рассмотрен в [87, 89], поэтому ниже приведены расчетные исследования способов 2 и 3, а также их сопоставительный анализ с исходным вариантом с  $T_{КОМ} = 15$  град. (раздел 4.3.1). Четвертый способ рассмотрен в разделе 4.3.2. Исследования выполнены для четырехфазных ВРД конструкции 16/12 с внешним диаметром статора 130 мм (SRM-130) и 115 мм (SRM-115).

#### 4.3.1. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного двигателя SRM-130

При проведении анализа в качестве объекта исследования принят четырехфазный низкоскоростной ВРД SRM-130. Он имеет следующие параметры: число полюсов статора – 16, число полюсов ротора – 12, внешний диаметр статора – 130 мм, диаметр ротора – 80.5 мм, активная длина – 80 мм, воздушный зазор – 0.25 мм, число витков в фазе – 132. Внешний вид магнитной системы ЭМП показан на рис. 4.15.

Электрохимический преобразователь ВРД спроектирован с коэффициентами полюсного перекрытия статора  $\alpha_S = 0.5$  о.е. и ротора  $\alpha_R = 0.42$  о.е., которые обеспечивают для статического режима максимальное значение среднего электромагнитного момента  $M_{CP}$  в зоне коммутации  $T_{КОМ} = 7.5$  град. [12].

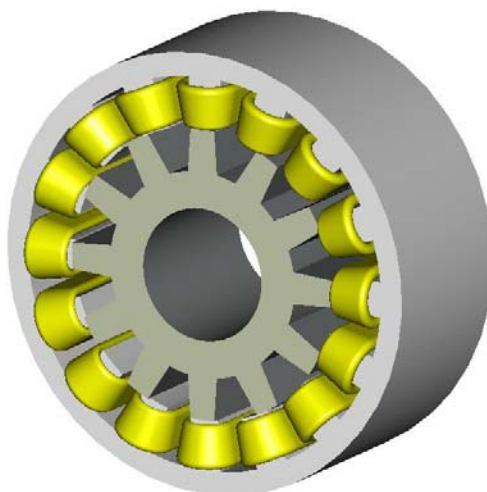


Рисунок 4.15 – Четырехфазный ЭМП ВРД  
с соотношением чисел полюсов статора к ротору 16/12

Так, например, на рис. 4.16 приведена зависимость электромагнитного момента  $M_{EM}$  от угла рассогласования  $\theta$  при токе в фазе 10 А. Углы коммутации приняты следующие:  $\theta_{ON} = 3.75$  град. и  $\theta_{ON} = 11.25$  град. При этом  $M_{CP} = 4.3$  Н·м, а коэффициент пульсаций статического момента  $K_{II} = 0.053$  о.е..

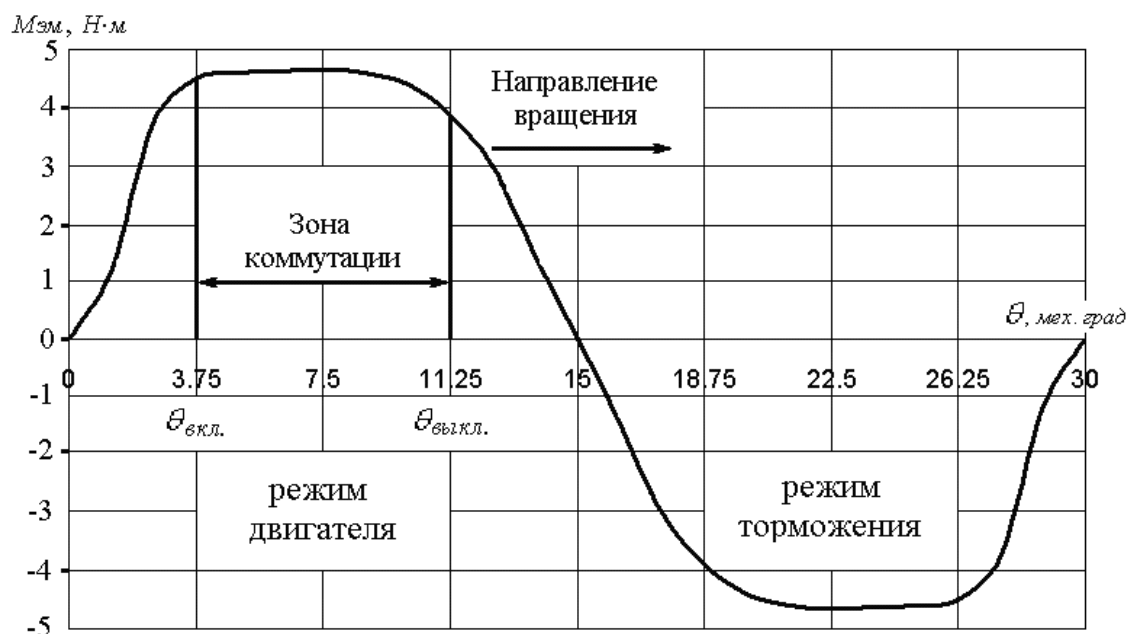


Рисунок 4.16 – Зависимость электромагнитного момента  $M_{EM}$   
от угла рассогласования  $\theta$



Для коммутации фаз ВРД с указанной выше зоной достаточно применения двухканального датчика положения ротора с числом периодов выходного сигнала, равным числу полюсов ротора. Разрешение на включение фаз получается комбинацией логических сигналов с выходов каналов датчика. Эти сигналы, со скважностью, равной 2, смещены друг относительно друга на 90 эл. град.

В динамических режимах, из-за переходных процессов изменения тока при коммутации фаз, происходит снижение среднего момента, при этом увеличивается уровень пульсаций момента, по сравнению с расчетным для статики.

Эти явления больше всего проявляются при работе на “естественной” механической характеристике, где отсутствует возможность форсирования тока фазы.

Исследования этого явления выполнены на базе ММ, описанной в разделе 2.1, исходные данные для которой получены путем численного расчета магнитного поля МКЭ, т.е. на базе полевой математической модели [60, 75]. Для расчета режимов работы ВРД использовалась система автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD (см. раздел 3). Для решения оптимизационных задач применялась подсистема оптимизации.

С использованием изложенных выше математических и программных средств моделирования ВРД получены следующие результаты по улучшению характеристик ВРД.

Способ 2. Исследовалось влияние симметричного расширения зоны коммутации  $T_{КОМ}$ , в пределах от 7.5 до 15 градусов на изменение КПД  $\eta$  и коэффициента пульсаций  $K_{II}$  момента при работе ВРД на “естественной” механической характеристике. На рисунках 4.17 и 4.18 представлены указанные зависимости для ряда значений момента нагрузки  $M_H$ .

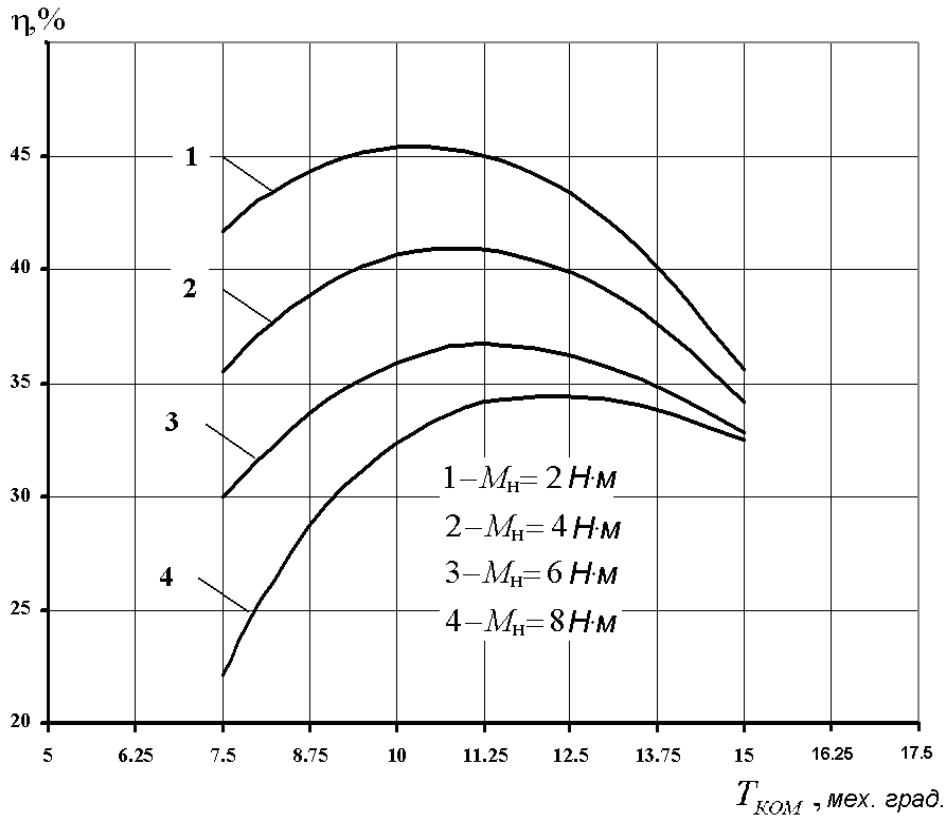


Рисунок 4.17 – Зависимости  $\eta = f(T_{КОМ})$  для ряда значений момента  $M_H$

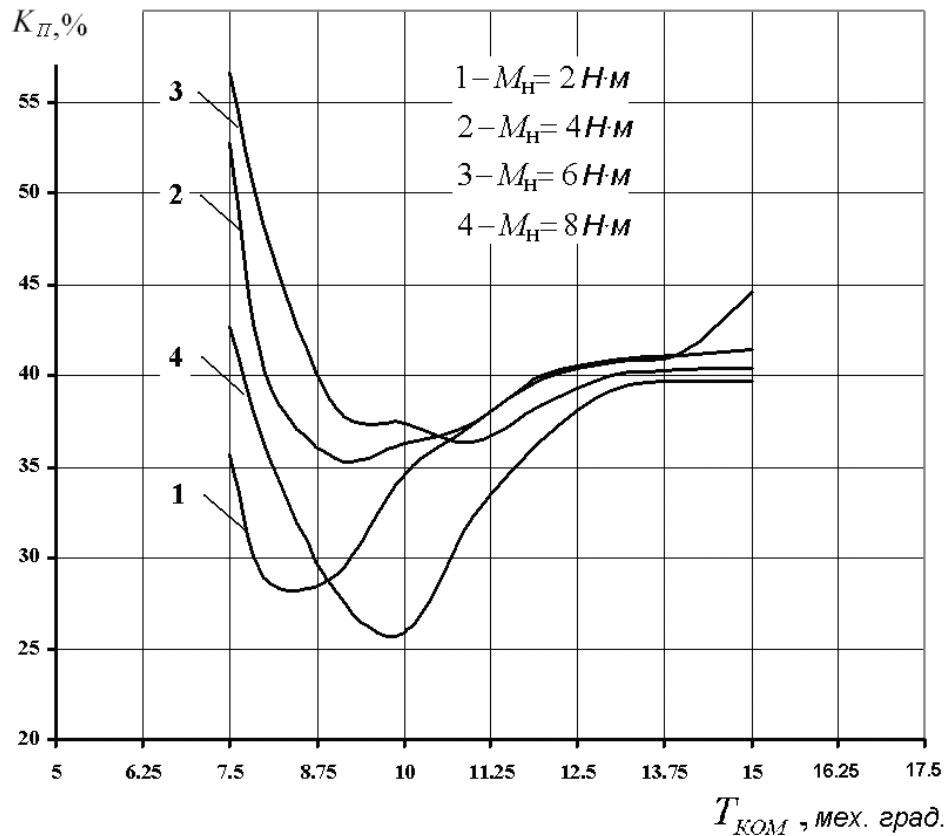


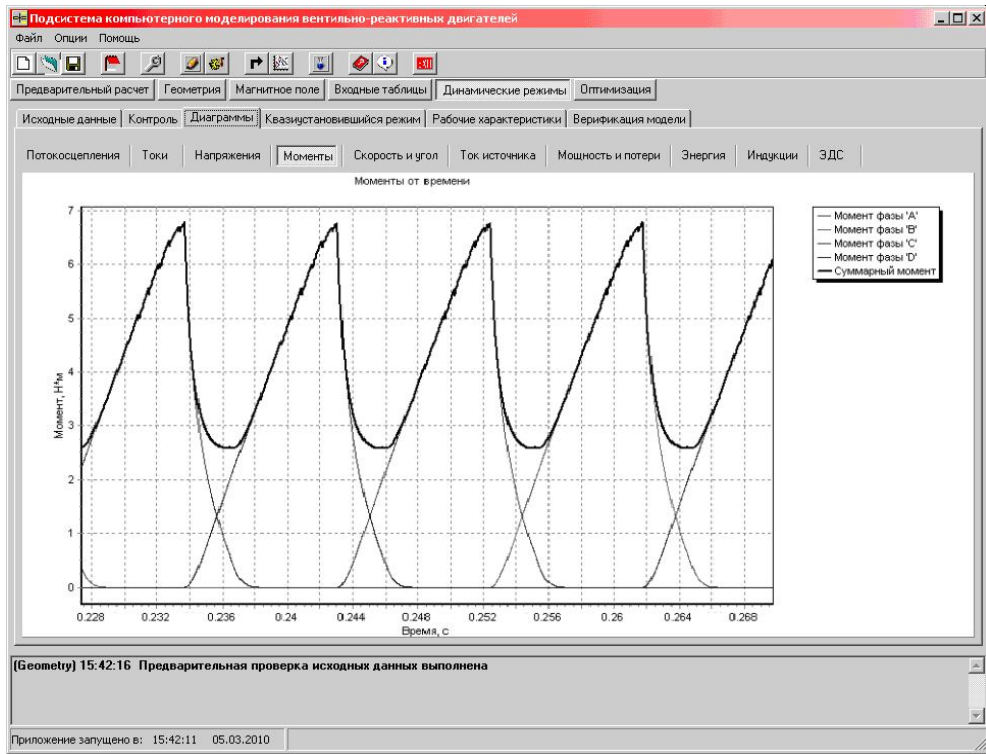
Рисунок 4.18 – Зависимости  $K_{II} = f(T_{КОМ})$  для ряда значений момента  $M_H$

Как следует из рисунков 4.17 и 4.18 для увеличения КПД при одновременном снижении уровня пульсаций момента ВРД, по сравнению с вариантом зоны коммутации в 7.5 град., может быть рекомендована зона коммутации в 11 град. Так, например, для значения момента  $M_H = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$  имеем: при  $T_{КОМ} = 7.5$  град. КПД составлял 35.9 %, при  $T_{КОМ} = 11$  град. он вырос до 41.3 %, а  $K_{П}$  снизился с 0.50 о.е. до 0.37 о.е. Таким образом, незначительное удорожание датчика положения ротора позволяет улучшить показатели ВРД.

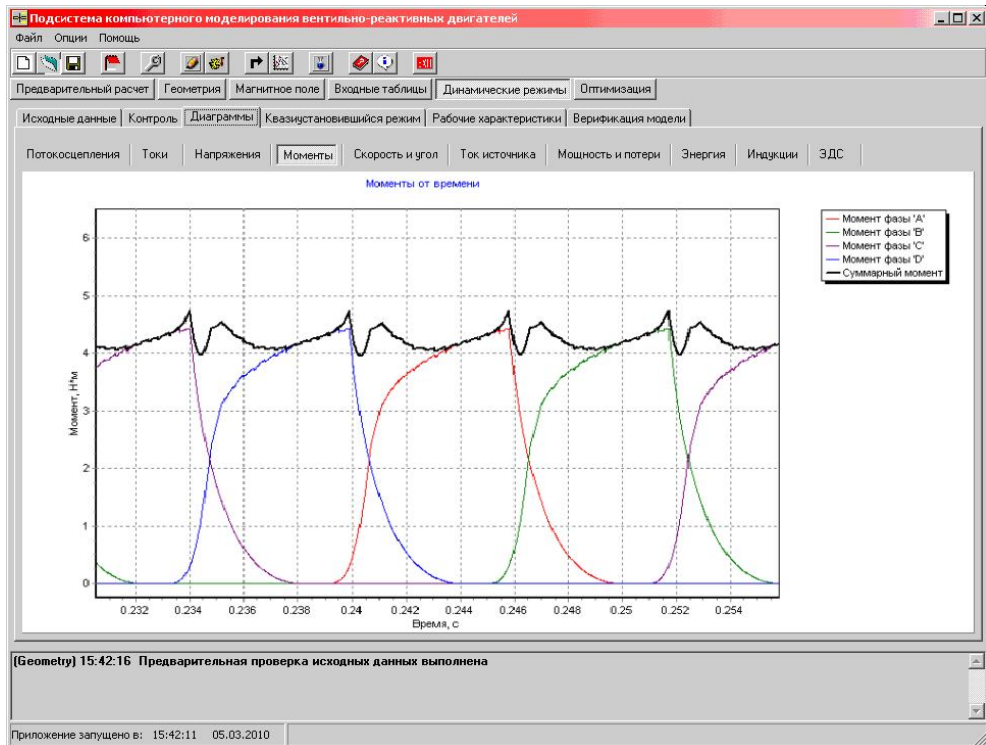
Способ 3. Исследовалось влияние расширения зоны коммутации и смещения угла включения фазы в сторону рассогласованного положения полюсов статора и ротора, при этом изменяется угол включения режима P1 ( $\theta_r$ ) [91].

Результаты расчетов позволяют рекомендовать следующие параметры коммутации:  $T_{КОМ} = 8.5$  град.,  $\theta_{ОН} = 0.5$  град. При таких параметрах наблюдается дальнейший рост КПД – до 47.7 %, а также существенное снижение коэффициента пульсаций момента – до 0.094 о.е. при моменте нагрузки  $M_H = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , что хорошо иллюстрируется диаграммами моментов, моделирование которых выполнено в системе автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD (рис. 4.19).

Сопоставление результатов исследований способов 2 и 3. На рисунках 4.20 и 4.21 представлены результаты расчетов значений КПД  $\eta$  и коэффициента пульсаций момента  $K_{П}$ , в зависимости от момента для предложенных выше способов коммутации, в сопоставлении с исходным вариантом с  $T_{КОМ} = 90$  эл. град., а также механические характеристики ВРД (рис. 4.22). На рисунках: зависимости: 1 – исходный вариант, 2 – коммутация по способу 2, 3 – коммутация по способу 3.



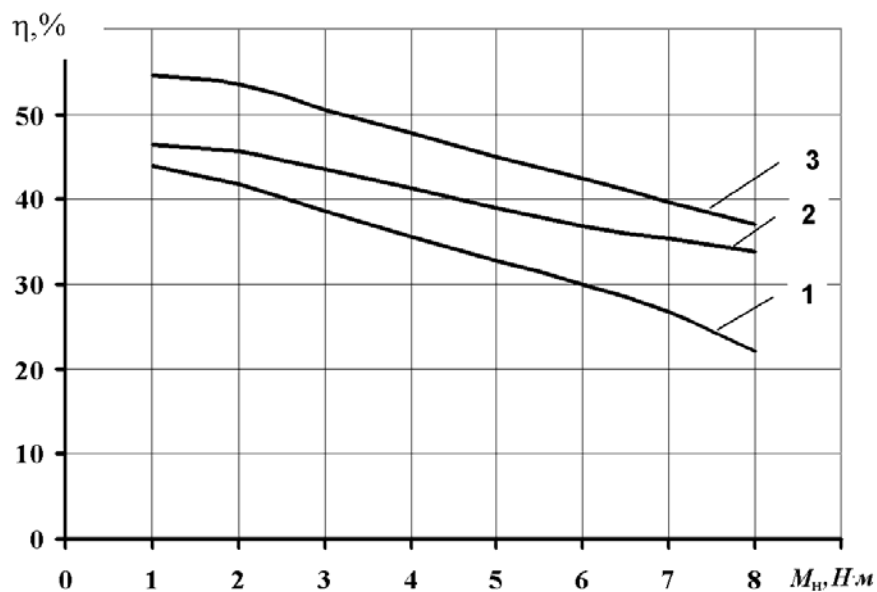
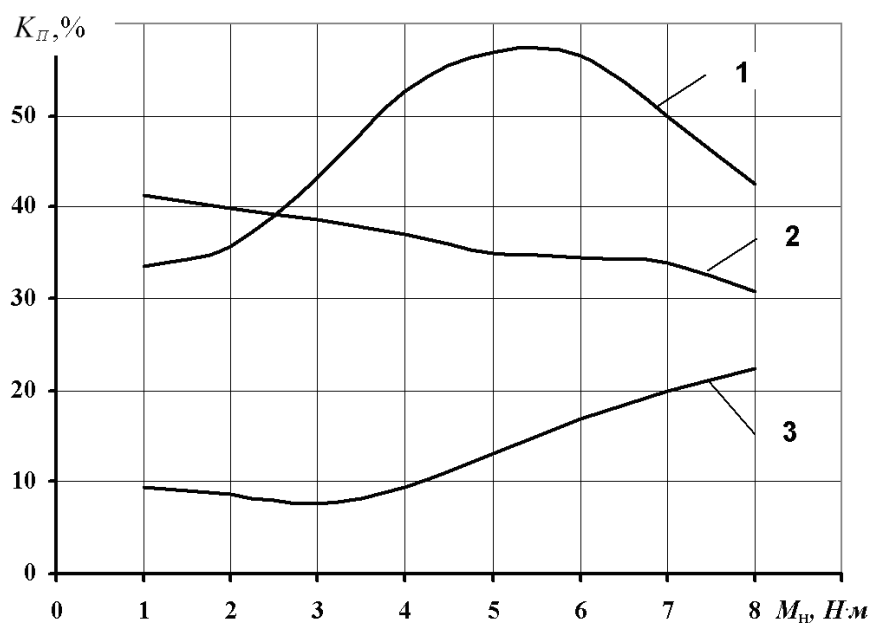
а)



б)

Рисунок 4.19 – Диаграммы изменения моментов ВРД от времени при различных параметрах коммутации, полученные в системе SRM-CAD:

а – при  $T_{КОМ} = 7.5$ ,  $\theta = 3.75$ ; б – при  $T_{КОМ} = 8.5$ ,  $\theta = 0.5$

Рисунок 4.20 – Зависимости  $\eta = f(M_H)$ Рисунок 4.21 – Зависимости  $K_{II} = f(M_H)$ 

Как видно из приведенных зависимостей (см. рисунки 4.20 и 4.21) применение способа коммутации 2 позволяет, по сравнению с исходным вариантом, увеличить КПД ВРД в среднем на 6 %, а коэффициент пульсаций  $K_{II}$  снизить в среднем на 10 %. Переход к способу 3 способствует дополнительному увеличению КПД в среднем еще на 6 % при снижении коэффициента пульсаций момента в среднем до 13 %.

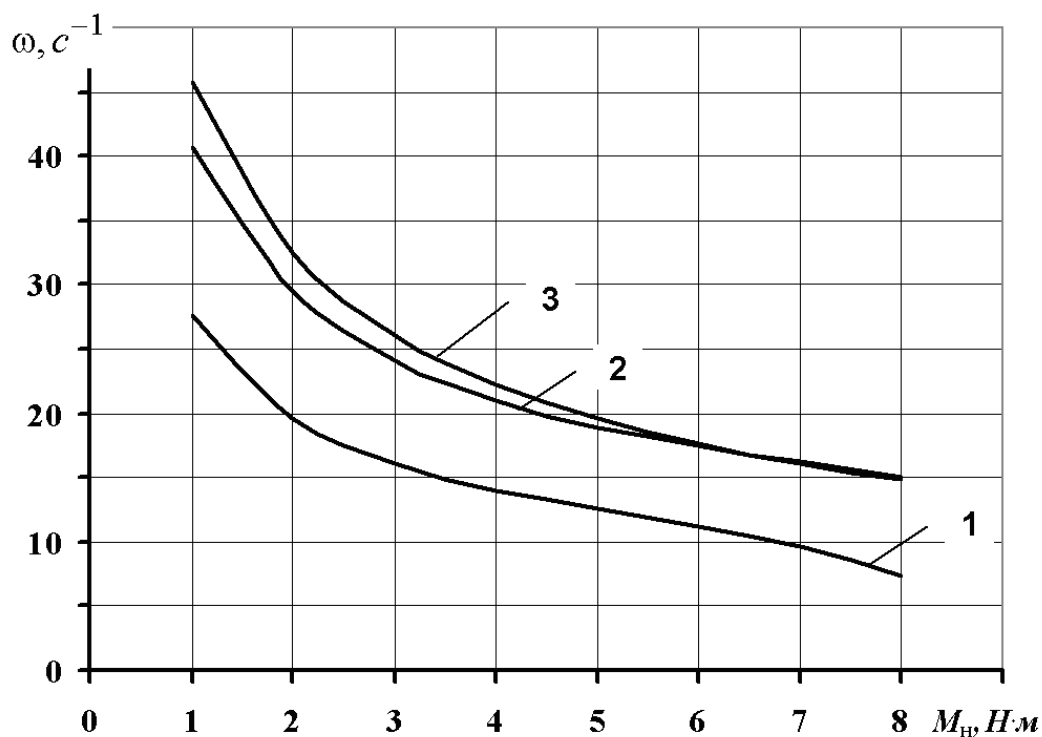


Рисунок 4.22 – Механические характеристики  $\omega = f(M_H)$

Рассмотрение механических характеристик позволяет сделать заключение о том, что способы 2 и 3 дают примерно одинаковое смещение “естественной” механической характеристики ВРД в область больших значений скорости. При этом для одних и тех же значений момента скорость отличается в среднем в 1.55 раза от исходного варианта.

Интерес представляет также рассмотрение процесса пуска при указанных способах коммутации. На рис. 4.23 представлены результаты моделирования процесса разгона при следующих условиях: нагрузочный момент  $M_H = 4 \text{ H} \cdot \text{м}$  и приведенный момент инерции  $J_\Sigma = 0.0056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Ток в фазе ВРД ограничен на уровне 20 А.

Видно (см. рис. 4.23), что на начальном участке разгона динамические свойства при различных способах коммутации примерно одинаковы. Влияние коммутационных параметров начинает проявляться при выходе на установившуюся скорость, а именно, наблюдаются отличия, как по среднему значению установившейся скорости, так и по уровню ее пульсаций.

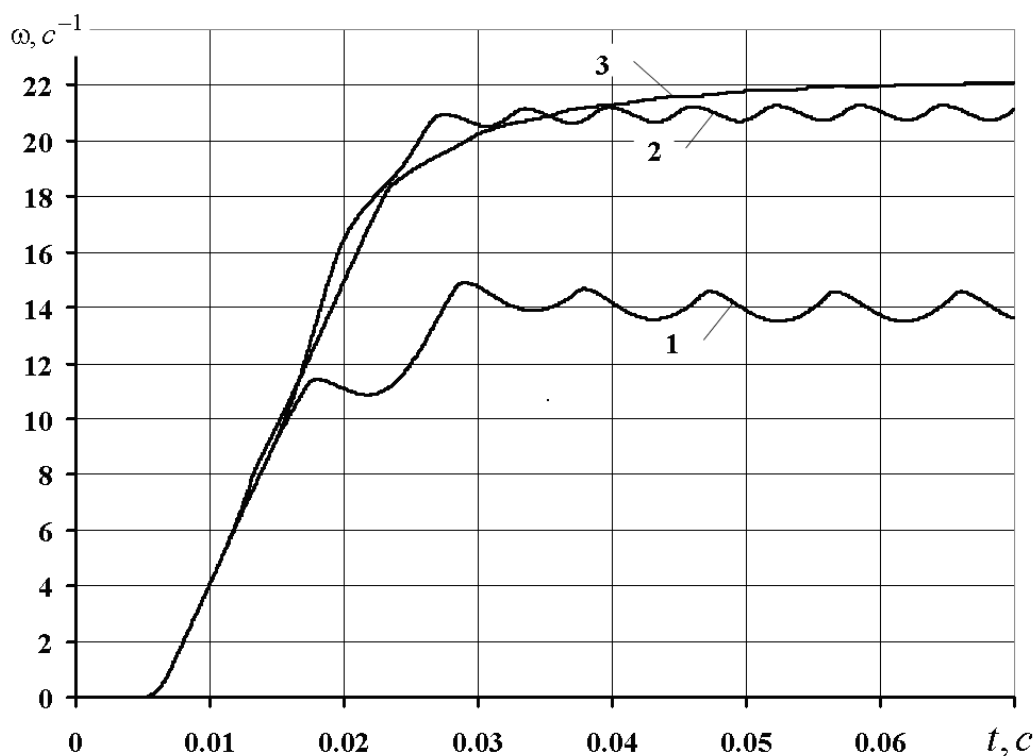


Рисунок 4.23 – Моделирование процесса пуска ВРД

По результатам исследования можно сказать, что существенное улучшение энергетических характеристик и рабочих свойств ВРД SRM-130 возможно путем небольшого усложнения датчика положения ротора, что не приводит к заметному удорожанию ВРД в целом. Соответствующая настройка параметров коммутации с расширением и сдвигом зоны коммутации в сторону опережения угла включения дает значительный выигрыш в виде увеличения КПД и снижения уровня пульсаций момента ВРД. Представленные рекомендации по численным значениям параметров коммутации применимы для рассмотренного электродвигателя SRM-130. Для других ВРД они требуют проведения аналогичного расчетного исследования по приведенной выше методике.

#### 4.3.2. Анализ влияния параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного двигателя SRM-115

Исследование способов улучшения характеристик 2 – 4 для ВРД SRM-115 приведено ниже. SRM-115 имеет следующие характеристики: число полюсов статора – 16, число полюсов ротора – 12, внешний диаметр статора – 115 мм, активная длина – 40 мм, воздушный зазор – 0.25 мм, число витков в фазе – 220. Параметры механической нагрузки и настройки СУ следующие: номинальный момент 2.5 Н·м, суммарный момент инерции 0.0011 кг·м<sup>2</sup>, напряжение источника питания 300 В, ограничение по току в фазе 4 А.

При применении так называемой “обычной” коммутации фаз ВРД с углами 3.75 – 11.25 град. (период коммутации равен 7.5 град.) достаточно применения двухканального датчика положения ротора. При этом получим следующие характеристики: частота вращения  $n=600$  об/мин ( $\omega = 62.8$  рад/с), коэффициент полезного действия  $\eta = 59.7$  % и коэффициент пульсаций момента  $K_{II} = 63$  %.

Диаграммы мгновенных значений моментов в фазах и суммарного момента приведены на рис. 4.24.

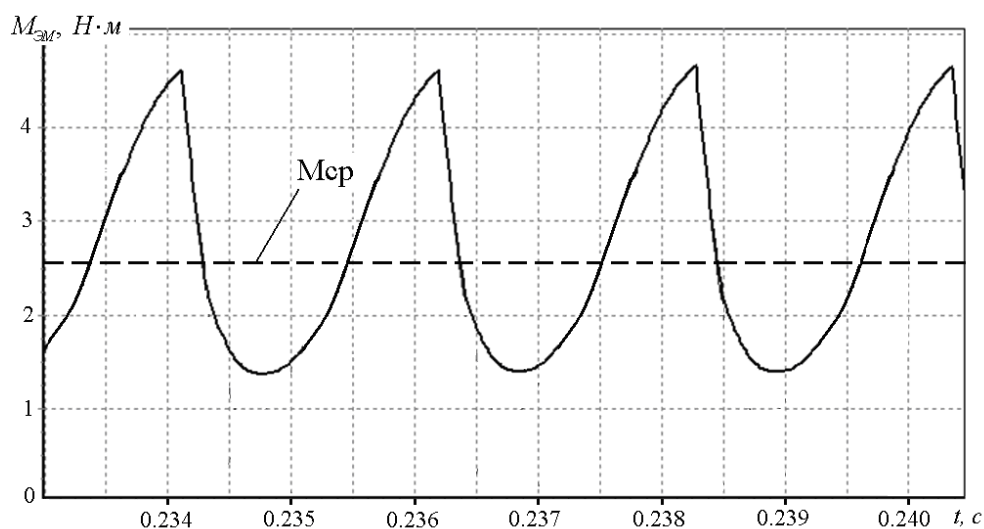


Рисунок 4.24 – Диаграмма изменения электромагнитного момента от времени при углах  $\theta_{ON} = 3.75$  град. и  $\theta_{OFF} = 11.25$  град.



Способ 2 – симметричного расширения зоны коммутации. В этом варианте необходимо применение датчика положения ротора, имеющего вместо двух каналов четыре – по числу фаз ВРД. При этом выполнялось исследование влияния симметричного расширения зоны коммутации  $T_{КОМ}$ , в пределах от 5 град. до 15 град., на КПД и коэффициент пульсаций электромагнитного момента  $K_{П}$  при работе ВРД на “естественной” механической характеристике. На рис. 4.25 приведены указанные зависимости при нагрузочном моменте  $M_H = 2.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

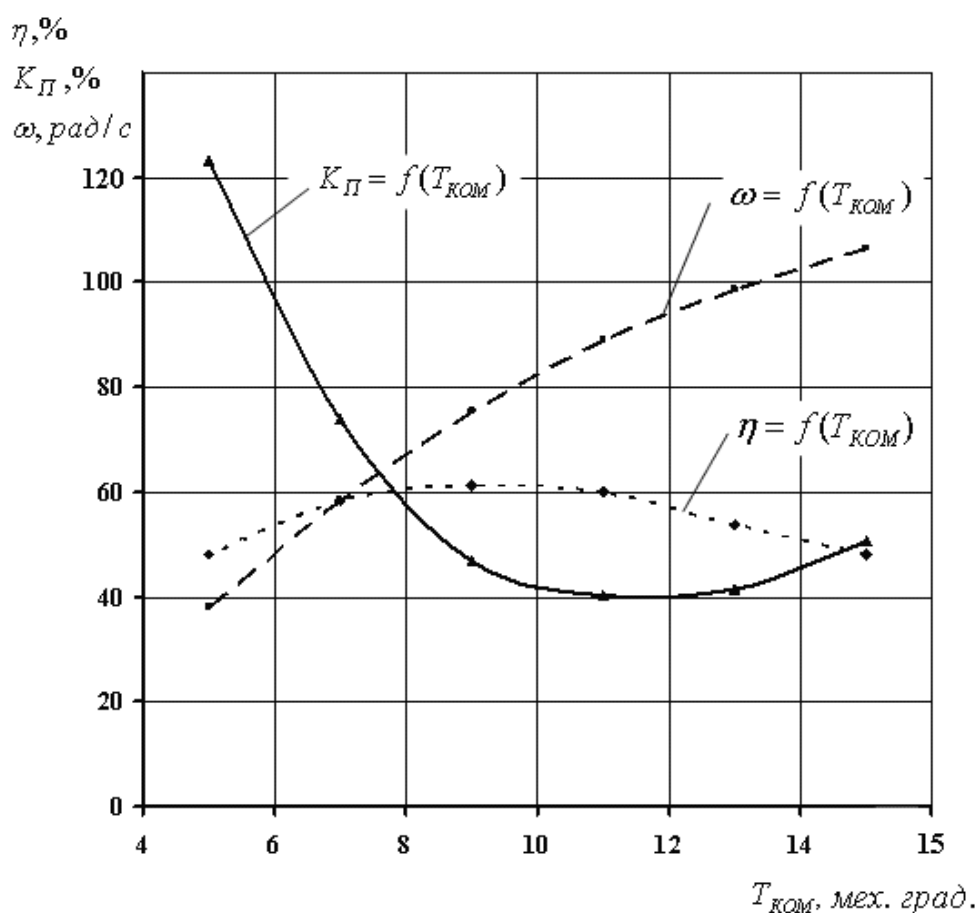


Рисунок 4.25 – Зависимости КПД, скорости и коэффициента пульсаций момента при  $M_H = 2.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  от величины зоны коммутации

Как следует из рис. 4.25, для увеличения КПД при одновременном снижении уровня пульсаций момента ВРД, в сравнении с вариантом коммутации в 7.5 град., может быть рекомендована зона коммутации в 11 град. Так, напри-

мер, при  $T_{КОМ} = 7.5$  град. КПД составляет 59.7 %, а при  $T_{КОМ} = 11$  град. он практически не изменяется – 59.9 %, но при этом коэффициент пульсаций момента  $K_{П}$  снижается с 63.1 % до 40.3 %. Таким образом, незначительное удорожание датчика положения ротора позволяет улучшить показатели ВРД. На рис. 4.26 приведена диаграмма момента от времени для этого случая (зона коммутации  $T_{КОМ} = 11$  град).

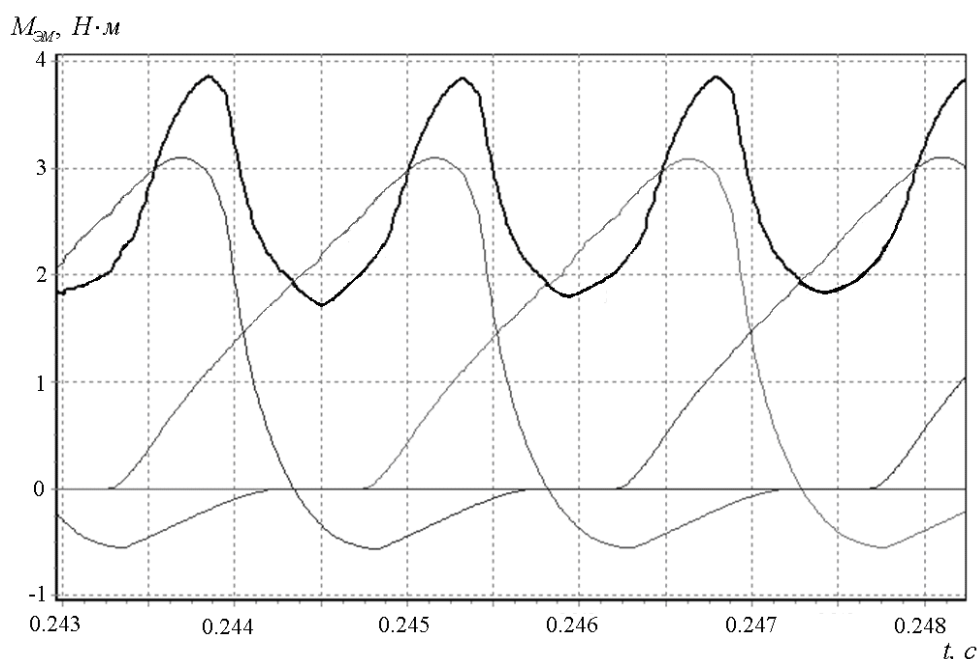


Рисунок 4.26 – Диаграмма изменения моментов от времени при  $T_{КОМ} = 11$  град.

Способ 3. При постоянной зоне коммутации  $T_{КОМ} = 7.5$  град., изменяем угол включения опережения и угол включения режима P1 ( $\theta_{\tau}$ ). Угол включения изменяется от 0.5 град. до 3.5 град. с шагом 0.5 град. На рис. 4.27 приведены зависимости для значений момента  $M_H = 2.5$  Н·м.

Из рис. 4.27 видно, что для увеличения КПД при одновременном уменьшении уровня пульсаций момента ВРД, в сравнении с вариантом “обычной” коммутации, может быть рекомендован вариант со следующими параметрами коммутации:  $\theta_{ON} = 2^{\circ}$ ,  $\theta_{OFF} = 9.5^{\circ}$ ,  $\theta_{\tau} = 3.5^{\circ}$ . Например, при сравнении пара-

метров “обычной” коммутации  $\theta_{ON} = 3.75^\circ$ ,  $\theta_{OFF} = 11.25^\circ$ ,  $\theta_\tau = 0^\circ$  с углами коммутации  $\theta_{ON} = 2^\circ$ ,  $\theta_{OFF} = 9.5^\circ$ ,  $\theta_\tau = 3.5^\circ$  получили увеличение КПД  $\eta$  с 59.7 % до 65.7 %, при этом коэффициент пульсаций момента  $K_\Pi$  снизился с 0.63 о.е. до 0.26 о.е. На рис. 4.28 приведена диаграмма момента от времени для параметров коммутации:  $\theta_{ON} = 2^\circ$ ,  $\theta_{OFF} = 9.5^\circ$ ,  $\theta_\tau = 3.5^\circ$ .

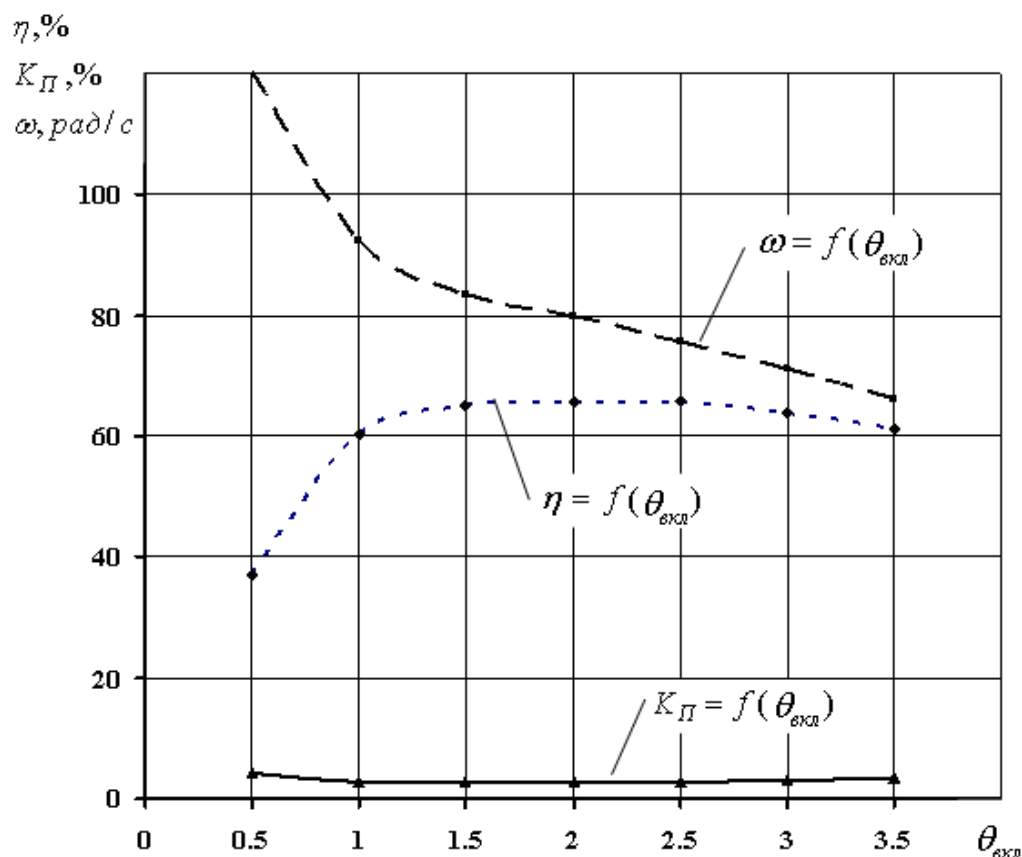


Рисунок 4.27 – Зависимость КПД, скорости и коэффициента пульсаций при  $M_H = 2.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  от угла включения фазы

Способ 4. С целью уменьшения коэффициента пульсаций момента, улучшения рабочих характеристик и энергетических показателей ВРД выполним оптимизацию углов включения/выключения фаз.

В качестве варьируемых переменных используются величины углов включения и выключения фаз. Варьируемые переменные и границы их изменения представлены в таблице 4.7.

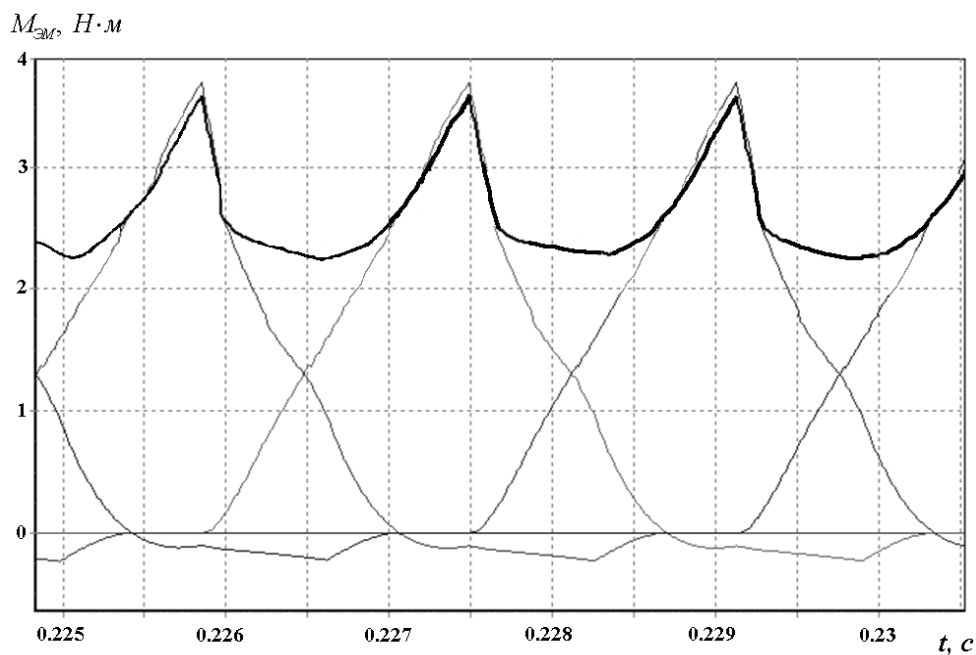


Рисунок 4.28 – Диаграмма зависимости моментов фаз и суммарного момента от времени при  $T_{КОМ} = 11$  град.

Таблица 4.7 – Границы изменения варьируемых переменных

Варьируемая переменная	min	max
Угол включения $\theta_{ON}$ , град.	-4	8
Угол выключения $\theta_{OFF}$ , град.	8	15

Как показывает опыт практического использования, возникают ситуации, когда заданные углы включения и выключения фаз не позволяют ВРД развить электромагнитный момент, превышающий момент сопротивления. При этом ротор ВРД остается неподвижен. Поэтому в качестве ограничения выступает условие пуска ВРД с заданными параметрами коммутации:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{EM} > M_H, \\ \omega \neq 0. \end{array} \right.$$

В качестве критерия оптимизации принят максимум коэффициента полезного действия при минимуме коэффициента пульсаций момента.

Оптимизация выполнялась с использованием генетического алгоритма, описание которого приведено в [52, 56].

На рисунках 4.29 и 4.30 приведены фрагменты допустимой области в виде линий уровня, показывающих изменение КПД  $\eta$  и коэффициента пульсаций момента  $K_{II}$  от двух переменных: углов включения  $\theta_{ON}$  и выключения фазы  $\theta_{OFF}$ , соответственно. Результаты оптимизации приведены в таблице 4.8.

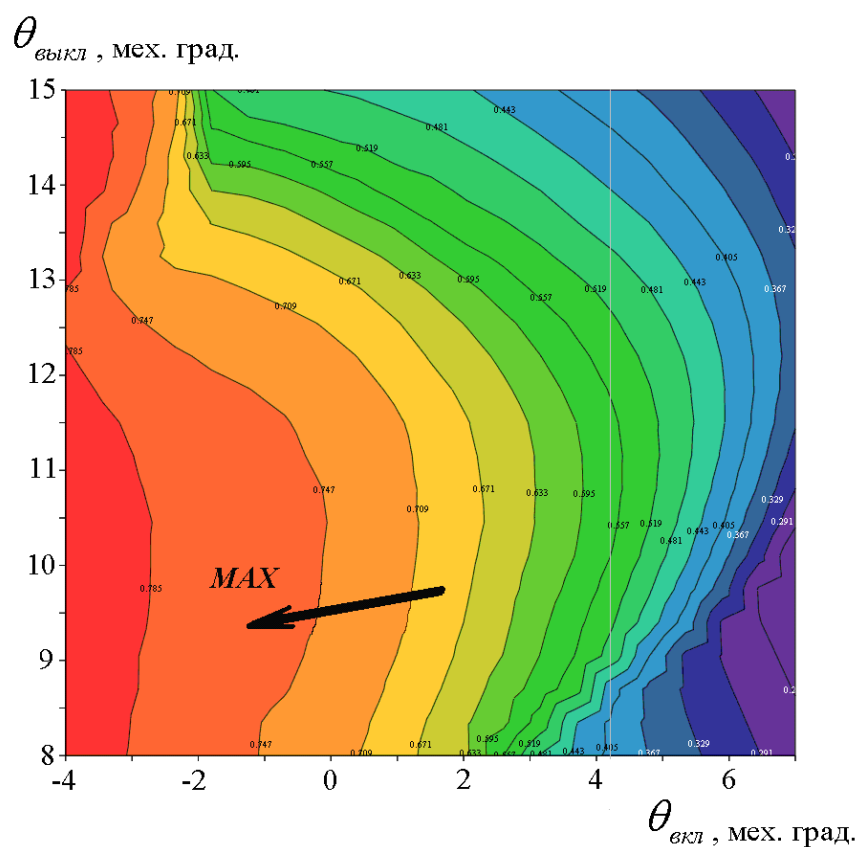


Рисунок 4.29 – Изменение КПД в функции двух переменных  $\theta_{ON}$  и  $\theta_{OFF}$

Таблица 4.8 – Результаты оптимизации

	$\theta_{ON}$ , мех. град.	$\theta_{OFF}$ , мех. град.	$\eta$ , %	$K_{II}$ , %
До оптимизации	3.75	11.25	59.7	63
После оптимизации	0	9	73.8	12.8

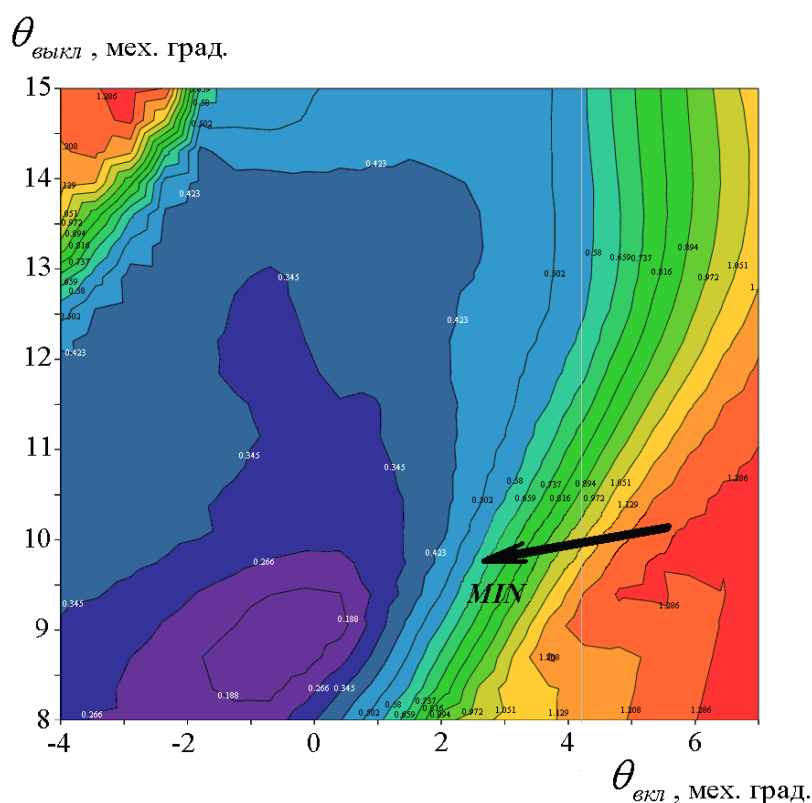


Рисунок 4.30 – Изменение коэффициента пульсаций момента в функции двух переменных  $\theta_{ON}$  и  $\theta_{OFF}$

Таким образом, задавая углы включения и выключения из таблицы 4.8, полученные после оптимизации, можно добиться увеличения КПД на 14 %, и снижения коэффициента пульсаций момента – более чем на 50 %. Диаграмма момента при использовании оптимальных углов коммутации приведена на рис. 4.31.

На рис. 4.32 показано распределение электромагнитного момента двух соседних фаз при коммутации с углами  $\theta_{ON} = 0$  град. и  $\theta_{OFF} = 9$  град.

При заданных углах,  $\theta_{ON} = 0$  град. и  $\theta_{OFF} = 9$  град., величина зоны коммутации составляет 9 град. и коммутация производится с перекрытием фаз. Благодаря этому в ВРД создается электромагнитный момент даже тогда, когда момент, создаваемый одной из фаз, равен нулю. Это показано на рис. 4.32, при угле поворота ротора 0 град. электромагнитный момент от фазы “А” равен нулю, в то же самое время момент от фазы “D” равен максимальному.

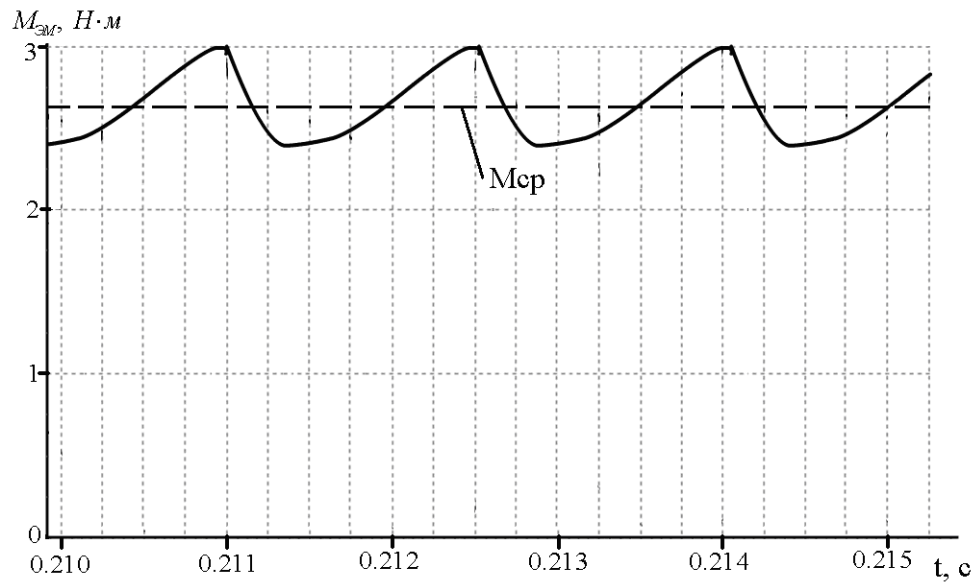


Рисунок 4.31 – Диаграммы изменения  $M_{EM}$  от времени при углах  $\theta_{ON} = 0$  град. и  $\theta_{OFF} = 9$  град.

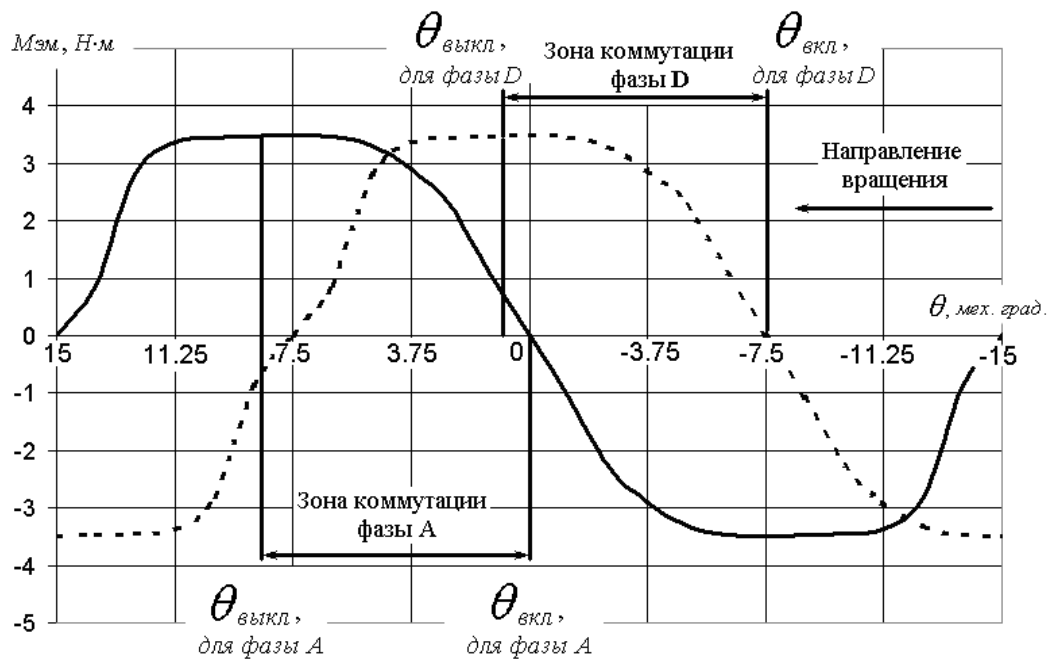


Рисунок 4.32 – Распределение величины  $M_{EM}$

По результатам исследования 4-го способа можно сделать следующий вывод – существенное улучшение энергетических характеристик и рабочих свойств ВРД возможно путем оптимизации углов коммутации, при этом для технической реализации управления с оптимальными углами включения/выключения нужно использовать систему управления, которая позволяет

определять текущее положение ротора ВРД. В качестве датчика обратной связи возможно использование инкрементного или абсолютного энкодера.

Сравнение результатов улучшения характеристик ВРД различными способами приведено в табл. 4.9.

Таблица 4.9 – Сопоставительный анализ

Способ коммутации	Лучший вариант				
	$\theta_{ON}, ^\circ$	$\theta_{OFF}, ^\circ$	$\theta_\tau, ^\circ$	$\eta, \%$	$K_{II}, \%$
“Обычная” коммутация	3.75	11.25	0	59.7	63.1
Симметричное расширение зоны коммутации (способ 2)	2	13	0	60	40.3
Включение опережения и режима Р1 при перекрытии фаз, $T_{КОМ} = 7.5^\circ$ (способ 3)	2	9.5	3.5	65.7	26.3
Оптимизация по трем переменным $\theta_{ON}$ , $\theta_{OFF}$ и $\theta_\tau$ (способ 4)	0	9	0	73.8	12.8

Лучшие значения КПД и коэффициента пульсаций момента ВРД можно получить при выполнении оптимизации по трем переменным  $\theta_{ON}$ ,  $\theta_{OFF}$ ,  $\theta_\tau$ . Приведенные рекомендации по выбору значений углов коммутации незначительно отличаются от рекомендованных выше для ВРД SRM-130.



#### 4.4. Сопоставительный анализ трех и четырехфазных вентильно-реактивных двигателей

Электромеханический преобразователь ВРД обычно классифицируют по числу полюсов на статоре  $Z_S$  и роторе  $Z_R$ , а также по числу фаз  $m$  обмотки статора (см. раздел 1.2). Так, например, ЭМП ВРД, показанный на рис. 4.33.а, относится к трехфазным с  $Z_S/Z_R=6/4$ , а ВРД (рис. 4.33.б) – к четырехфазным с  $Z_S/Z_R=8/6$ .

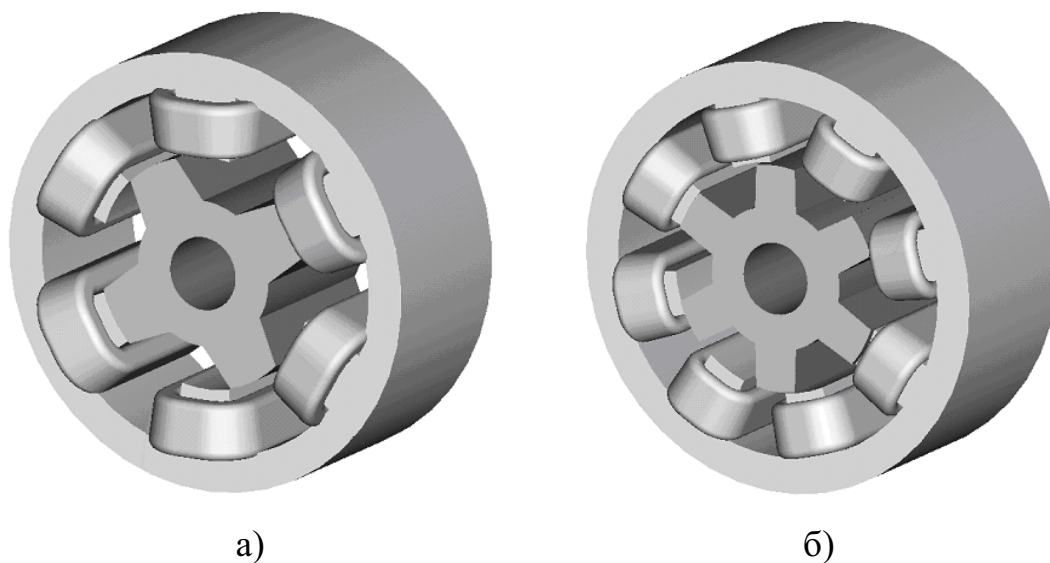


Рисунок 4.33 – Варианты ВРД с различным числом фаз

Число фаз  $m$  является фактором, определяющим многие свойства ВРД. Имеющиеся в литературе данные не позволяют на этапе решения конкретной практической задачи сделать выбор в пользу трех- или четырехфазной модификации двигателя с точки зрения их энергетических показателей. Исходя из этого, необходимо выполнить исследование и сопоставительный анализ трехфазных и четырехфазных ВРД с использованием системы автоматизированного синтеза SRM-CAD [66, 80].

Сравнение проводилось для трех- и четырехфазного ВРД малой мощности, у которых внешний диаметр статора равен 53 мм, активная длина – 28 мм, воздушный зазор – 0.15 мм. Сталь магнитопровода статора и ротора марки 2211 с толщиной листа 0.5 мм. Отличие состояло в числе витков на фазу

ВРД: для трехфазного – 70, для четырехфазного – 60. При таком числе витков на фазу обеспечивается практическое совпадение “естественных” механических характеристик анализируемых ВРД (рис. 4.34).

Спроектированные двигатели имеют практически одинаковые массы активных материалов, что иллюстрируется данными в таблице 4.10.

Зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора, для трех- и четырехфазных ВРД при токе в фазе статора 6 и 9 А представлены на рис 4.35.

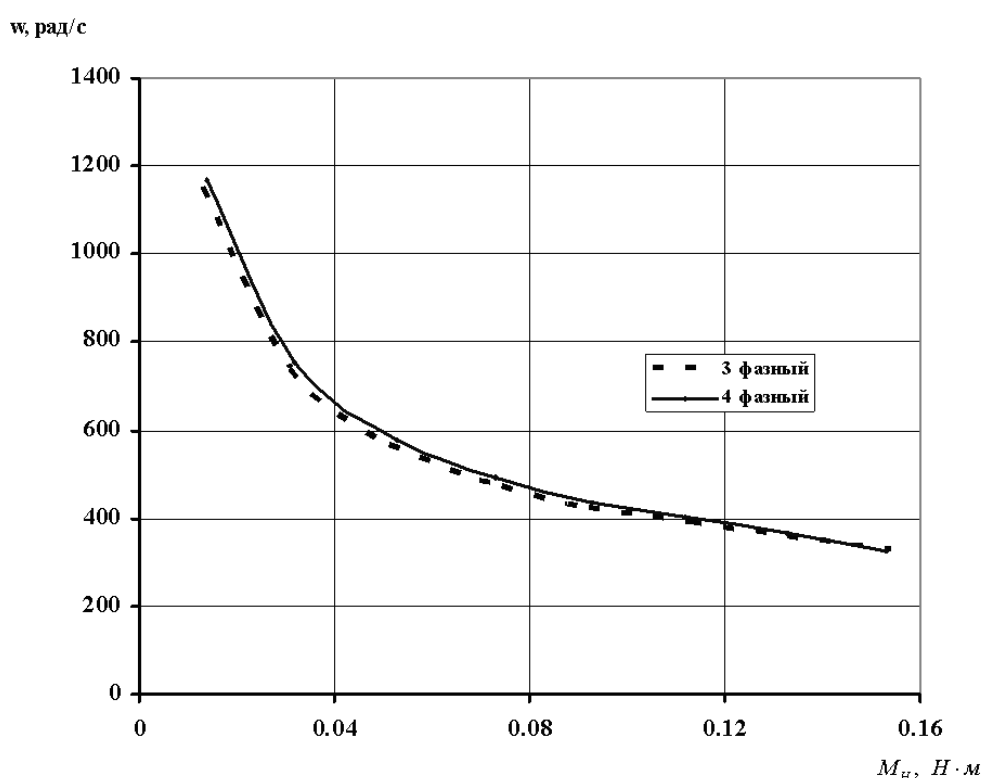


Рисунок 4.34 – Сравнение механических характеристик ВРД

Таблица 4.10 – Массы активных материалов сравниваемых ВРД

Число фаз ЭМП ВРД	3	4
Масса стали ротора, г	85	84
Масса стали статора, г	257	243
Масса меди, г	65	74
Общая масса активных материалов, г	409	401

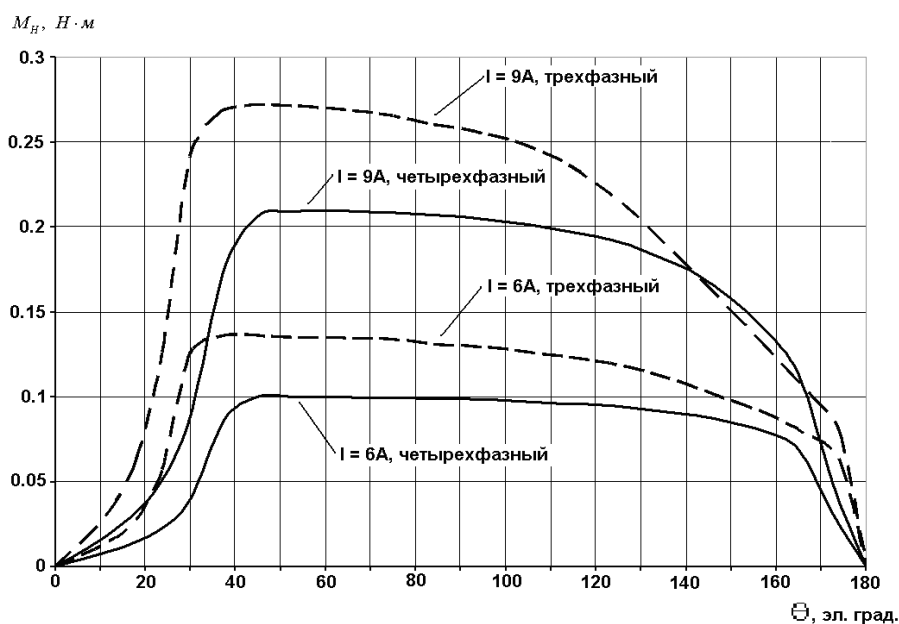


Рисунок 4.35 – Зависимость электромагнитного момента от угла положения ротора для ВРД трех- и четырехфазной конструкции

При сравнении рассчитывались и анализировались следующие величины: потери в меди обмотки статора, потери в стали магнитопроводов статора и ротора (рис. 4.36), коэффициент полезного действия (рис. 4.37), а также коэффициент пульсаций момента (рис. 4.38) в зависимости от нагрузочного момента  $M_H$  на валу двигателя, при его работе на “естественной” механической характеристике.

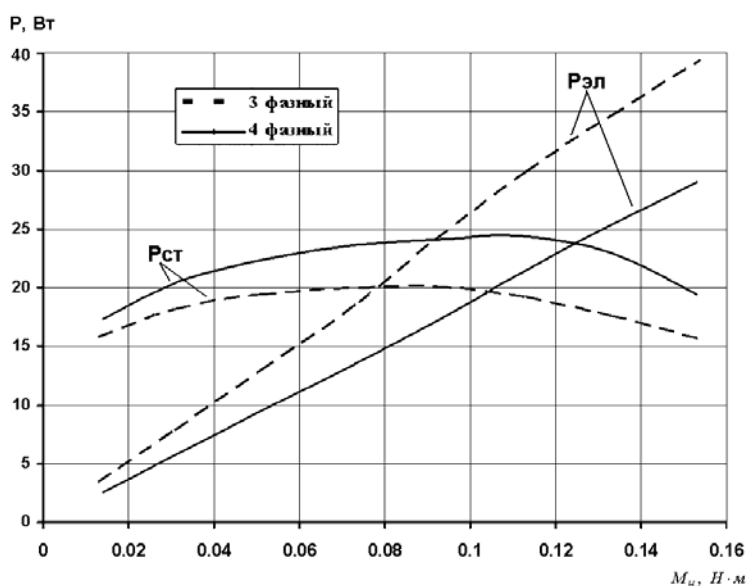


Рисунок 4.36 – Сравнение потерь в ВРД от нагрузочного момента

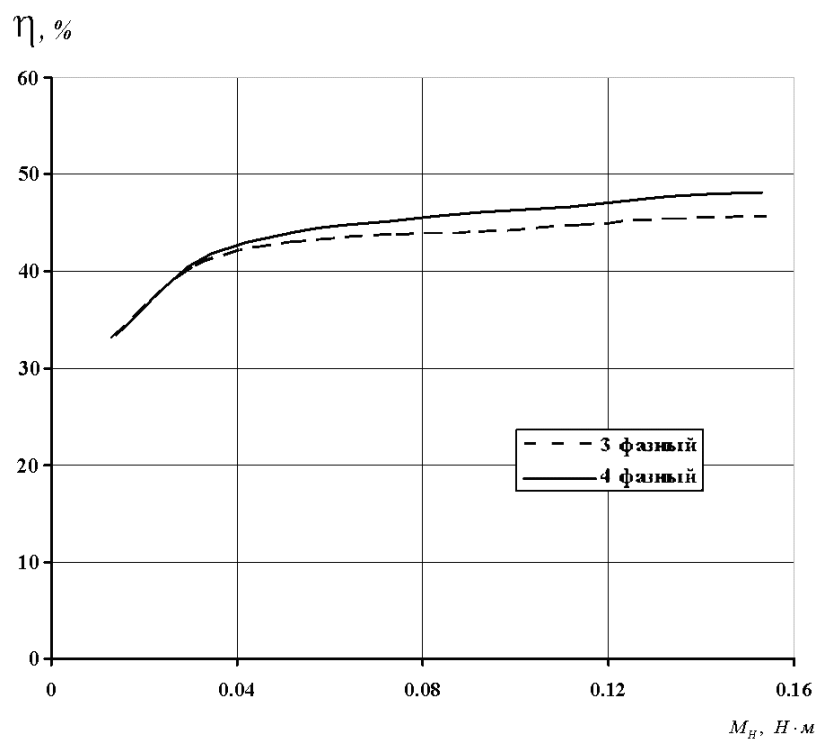


Рисунок 4.37 – Сравнение коэффициента полезного действия от нагрузочного момента для трех- и четырехфазных ВРД

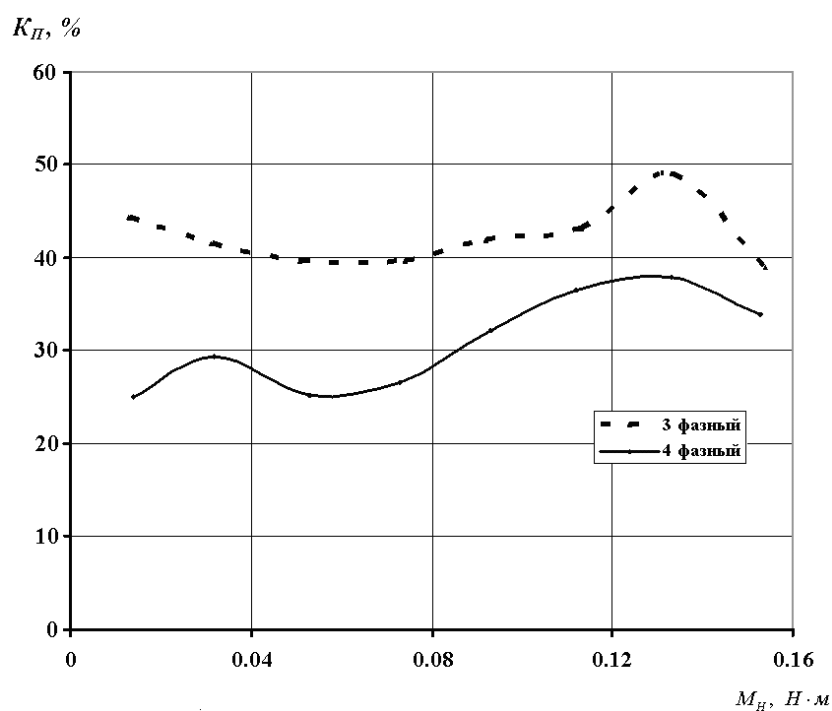


Рисунок 4.38 – Сравнение коэффициента пульсаций от нагрузочного момента для трех- и четырехфазных ВРД

Для определения потерь в стали ЭМП ВРД был разбит на участки. Для каждого из участков была рассчитана индукция и частота перемагничивания (непосредственно потери определялись по формуле Штейнмеца).

Из рис. 4.36 следует, что с ростом нагрузочного момента увеличиваются потери в меди обмотки статора, а потери в стали вначале растут, достигая максимума, а затем начинают уменьшаться. Такой характер изменения потерь в стали связан, с одной стороны, с уменьшением частоты пульсаций магнитного потока в зубцах и ярмах магнитопровода, а с другой стороны – с увеличением магнитной индукции в этих участках в связи с ростом момента на валу двигателя.

Видно, что потери в меди для трехфазного ВРД больше, чем для четырехфазного, а потери в стали больше в четырехфазном варианте. Отличие потерь в стали объясняется тем, что при одинаковой скорости вращения ротора частота коммутации фаз  $f_k = (\omega / 2 \cdot \pi) \cdot Z_R \cdot m$  обмотки статора для четырехфазной машины выше в два раза, чем для трехфазной.

В результате такого своеобразного изменения потерь, значения КПД (см. рис. 4.37) анализируемых двигателей достаточно близки во всем диапазоне изменения момента на валу, хотя КПД четырехфазного ВРД несколько выше. Также интересно отметить, что максимум КПД в ВРД не наблюдается при условии равенства потерь в меди и стали, т.к. для такого типа машин потери в стали не являются постоянными. Из рисунка 4.38 видно, что 4-х фазный ВРД имеет меньшую величину пульсаций момента во всем диапазоне его изменения.

#### 4.5. Синтез вентильно-реактивного двигателя для привода маслобойки

В разделе 2.2 и 2.4 приведены проверки адекватности ММ на базе уравнений магнитного поля и теплового поля, соответственно. В разделах 4.1 – 4.4 рассмотрены различные варианты анализа и выбора конструктивных вариантов, геометрических размеров, параметров СУ. Однако, вышеприведенные ис-

следования выполнены для различных ВРД. Комплексный подход к исследованиям и оптимизации различных параметров одного ВРД представлен ниже. В качестве такой электрической машины рассмотрен ВРД для привода маслобойки.

#### 4.5.1. Проектирование и моделирование

Техническое задание на проектирование и технические требования:

1. Электродвигатель переменного тока предназначен для привода активатора маслобойки “Мотор-Сич МБЭ-6” [76].

2. Двигатель изготавливается на номинальное напряжение питания 220 В  $\pm 10\%$  с частотой 50 Гц  $\pm 2.5\%$ .

3. Габаритные размеры магнитной системы двигателя и способ его крепления должны соответствовать габаритам и присоединительным размерам однофазного конденсаторного двигателя КД-120-4/56Р, производства завода “Орион” г. Николаев. Внешний вид двигателя показан на рисунке 4.39.

4. Основные параметры двигателя, при номинальном напряжении 220 В и частоте 50 Гц в нормальных климатических условиях должны соответствовать [77]:

- номинальная частота вращения вала двигателя 1380-3 % об/мин;
- номинальная мощность двигателя, не более 120 Вт;
- температура перегрева обмоток двигателя, не более 95 °С.

5. Режим работы – длительный S1 по ГОСТ 183-74.

6. Направление вращения вала двигателя – левое.

7. Двигатель должен без повреждений и остаточных деформаций выдержать в течение 2 мин. частоту вращения на 50 % превышающую номинальную.

8. Средняя наработка на отказ должна быть не менее 100 часов. Средний срок службы не менее 2.5 лет со дня начала эксплуатации при условии, что средняя наработка на отказ не превысит установленного выше значения.

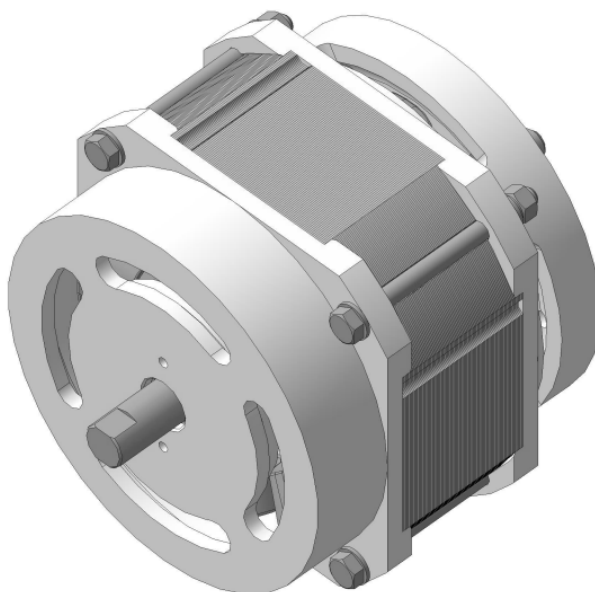


Рисунок 4.39 – Внешний вид двигателя для привода маслобойки

Согласно техническому заданию, с учетом рекомендаций [55, 63], геометрические характеристики магнитной системы приняты следующие:

- число фаз ЭМП ВРД 4;
- число полюсов статора/ротора  $N_S / N_R = 8 / 6$  ;
- габаритные размеры статора 101 на 101 мм;
- длина активной части  $L = 40$  мм;
- диаметр вала  $D_B = 20$  мм;
- величина воздушного зазора  $\delta = 0.3$  мм;
- диаметр ротора  $D_R = 55.9$  мм;
- полюсное деление статора  $\alpha_S = 0.5$  о.е.;
- полюсное деление ротора  $\alpha_R = 0.42$  о.е.;
- высота полюса ротора  $h_R = 6.7$  мм;
- высота полюса статора  $h_S = 16.7$  мм.

Материал магнитной системы – сталь 2211, коэффициент заполнения сталью 0.933 о.е., толщина пластин 0.5 мм. Выполнен предварительный расчет (см. п. 3.2.1) и построена полевая ММ (см. п.п. 2.1 и 3.2.2). На рис. 4.40 показано поперечное сечение магнитной системы ЭМП ВРД с катушками одной фазы.

В результате определены обмоточные данные ЭМП ВРД – число витков в катушке 250, диаметр обмоточного провода 0.5 мм.

На рисунках 4.41 – 4.43 показано разбиение полевой модели ВРД на конечные элементы, распределение магнитного потока и индукции.

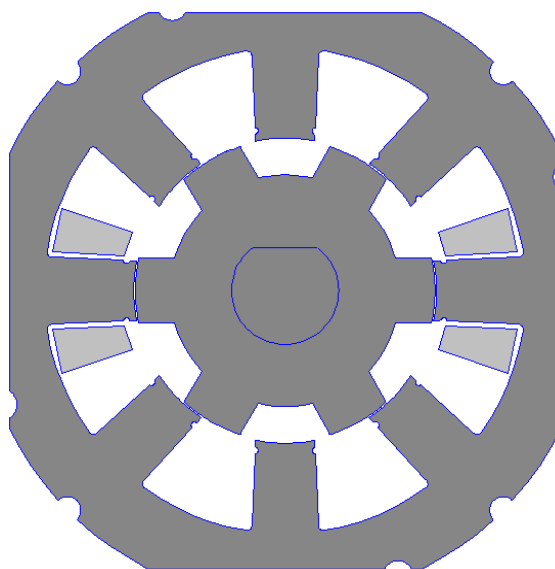


Рисунок 4.40 – Поперечное сечение магнитной системы ЭМП ВРД для полностью согласованного положения статора относительно ротора (в модели показаны катушки только одной фазы)

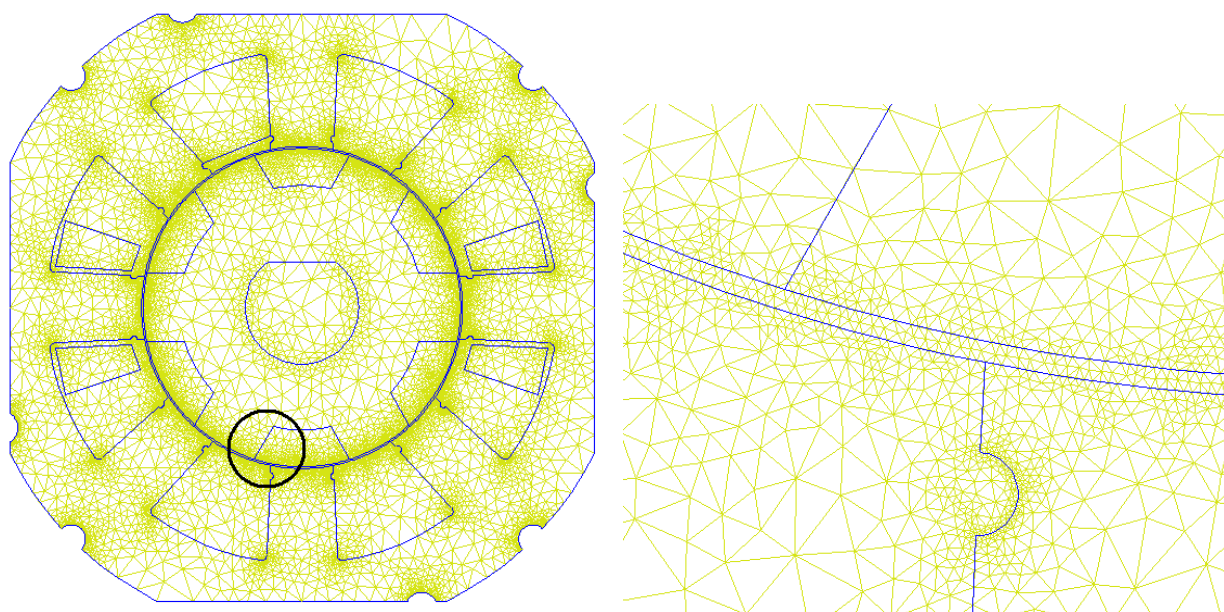


Рисунок 4.41 – Разбиение полевой модели на конечные элементы (справа показан фрагмент деления на конечные элементы в области воздушного зазора)



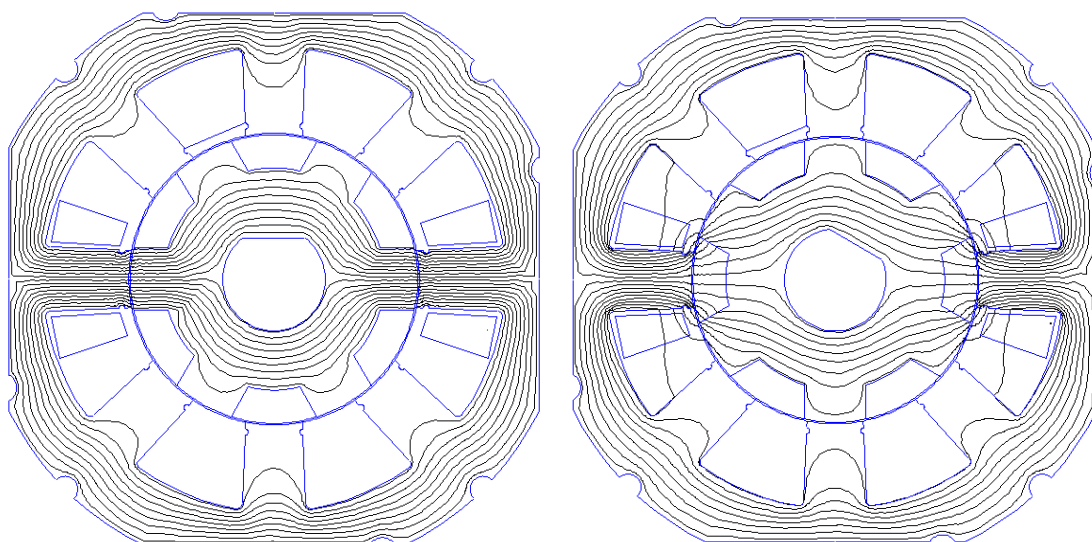


Рисунок 4.42 – Распределение линий магнитного потока при полностью согласованном и полностью рассогласованном положении ротора относительно статора (при токе в катушке фазы статора 2 А)

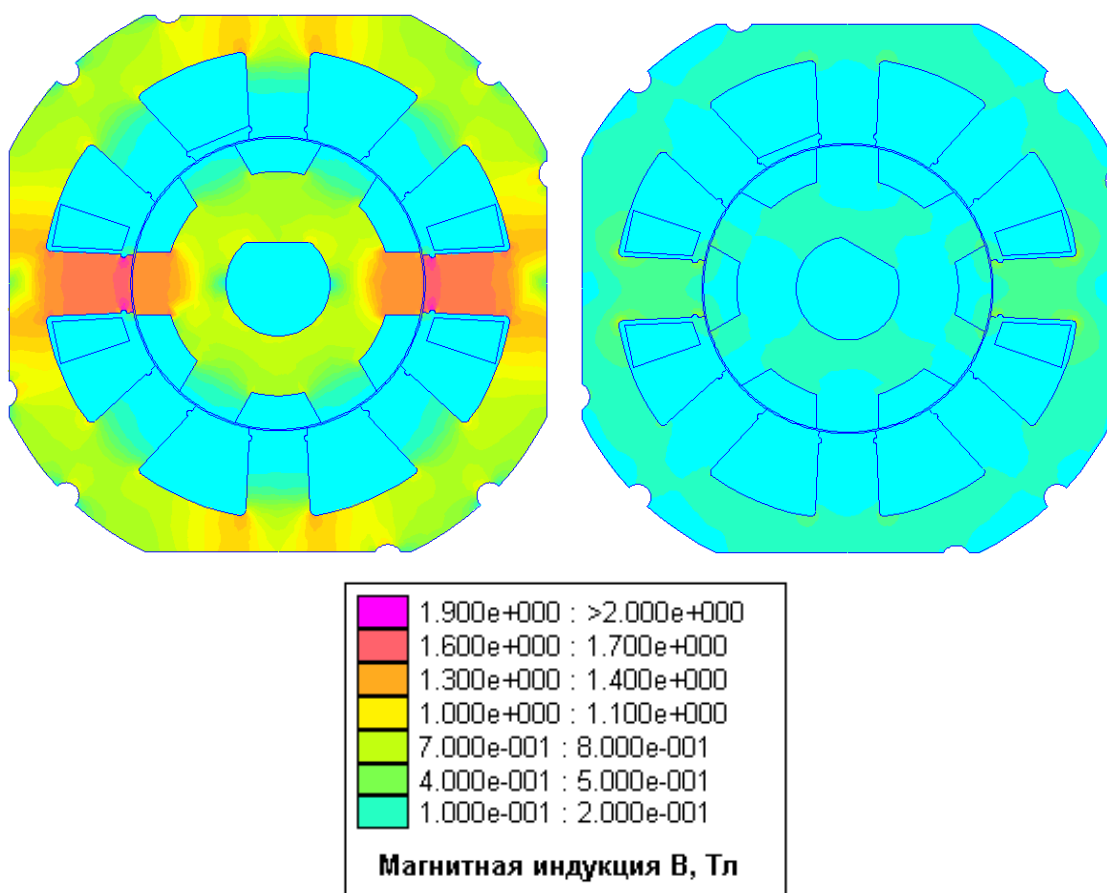


Рисунок 4.43 – Распределение магнитной индукции при полностью согласованном и полностью рассогласованном положении ротора относительно статора (при токе в катушке фазы статора 2 А)

Используя полученную полевую математическую модель ЭМП ВРД рассчитаем таблицы потокосцеплений и моментов для различных токов в обмотках статора и различных положений ротора (формулы 2.3 и 2.3).

Для моделирования квазиустановившихся режимов работы примем следующее:

- заданное значение скорости 1500 об/мин;
- нагрузочный момент  $M_H = 0.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- напряжение постоянного тока 270 В (после выпрямления переменного однофазного тока напряжением 220 В);
- угол включения фазы  $\theta_{ON} = 5$  градусов;
- угол выключения фазы  $\theta_{OFF} = 20$  градусов (ширина зоны коммутации 15 градусов);
- потери в системе управления 6 Вт.

Моделирование квазиустановившегося режима ВРД выполнено в подсистеме расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы (п. 3.2.3).

Результаты расчета представлены на рисунках 4.44 – 4.46 и в таблице 4.11.

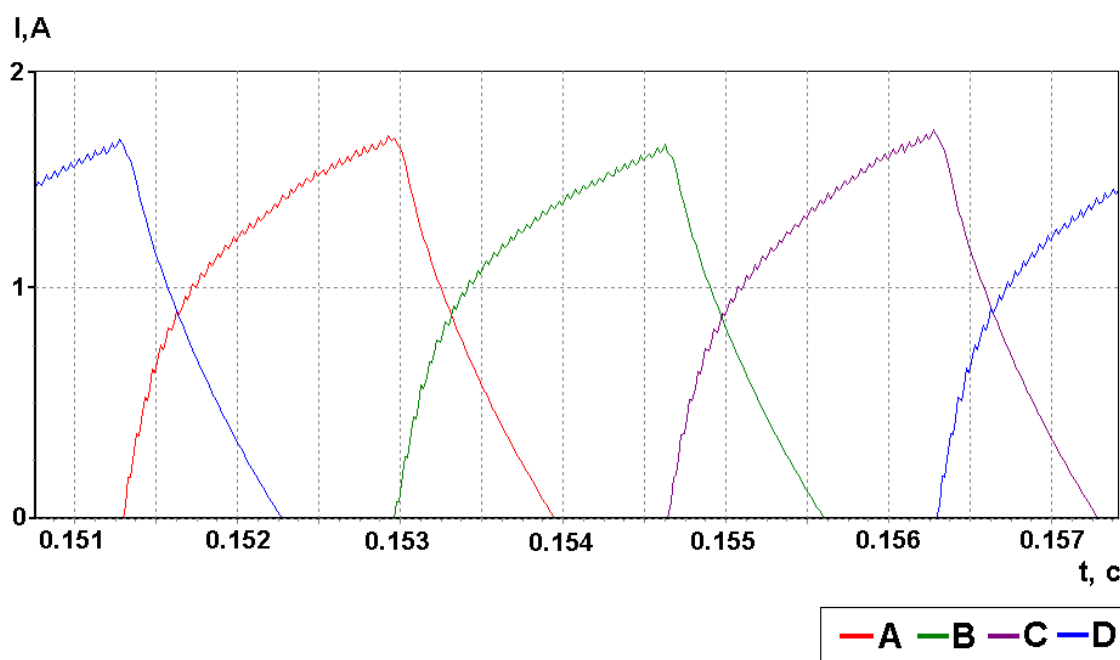


Рисунок 4.44 – Кривые токов в обмотках ВРД

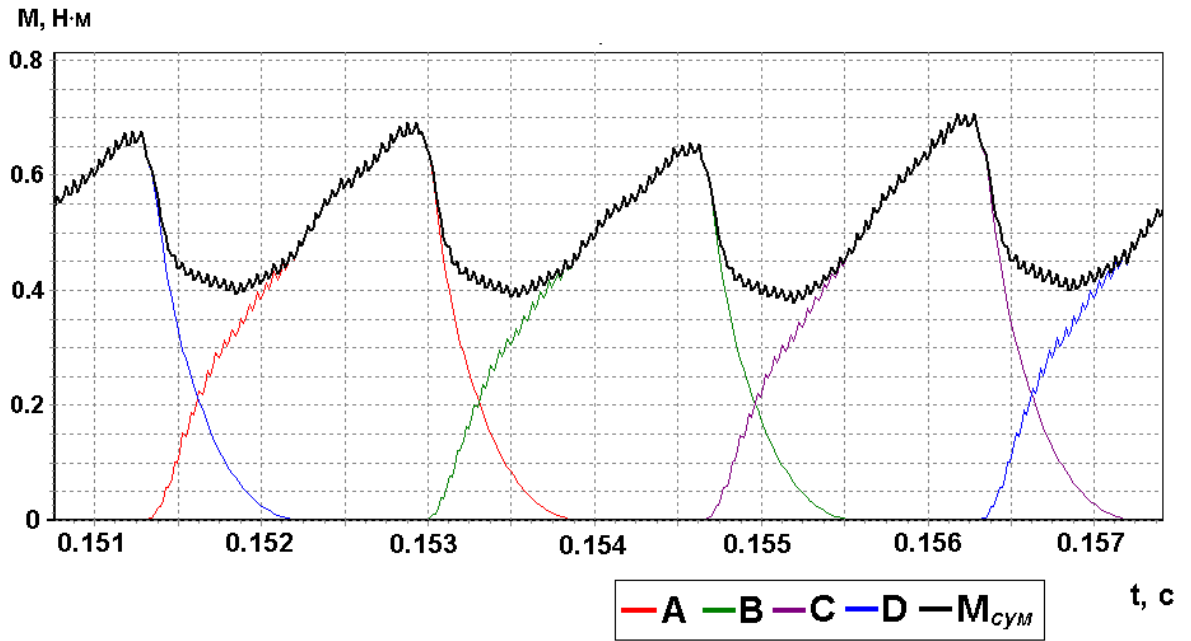


Рисунок 4.45 – Кривые моментов ВРД

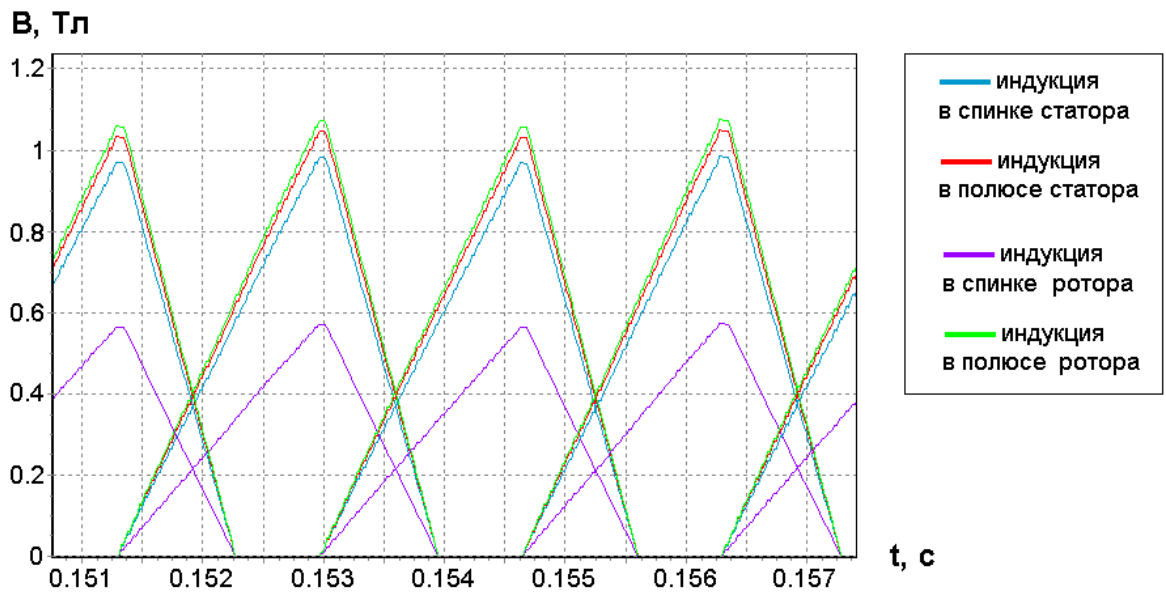


Рисунок 4.46 – Кривые индукции в магнитной системе ВРД

Таблица 4.11 – Результаты моделирования квазиустановившегося режима для углов включения  $\theta_{ON} = 5$  и выключения фазы  $\theta_{OFF} = 20$  градусов

№ п/п	Величина	Значение
1	Потребляемая мощность, Вт	120.4
2	Полезная мощность, Вт	78.7
3	Электрические потери, Вт	16
4	Механические потери, Вт	1.5
5	Потери в стали, Вт	18.2
6	Потери в системе управления, Вт	6
7	Установившаяся скорость, об/мин	1500
8	Ток источника, А	0.45
9	КПД, %	65.5
10	Ток фазы, А	1.4
11	Коэффициент пульсаций момента, о.е.	0.33

#### 4.5.2. Экспериментальная проверка результатов моделирования

Проведем сравнение 3-х вариантов:

- математическое моделирование ВРД (на базе модели из п. 4.5.1);
- экспериментальный образец ВРД;
- экспериментальный образец однофазного конденсаторного электродвигателя КД-120-4/56Р.

Питание экспериментальных образцов осуществлялось от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц. Измерения проводились при помощи измерительного комплекса К-50.

Для каждого из вариантов определялись следующие параметры: потребляемая мощность, полезная мощность на валу, КПД и потребляемый ток.

Результаты сравнения приведены на рисунках 4.47 – 4.49. Результаты испытаний в табличном виде представлены в приложении Д.

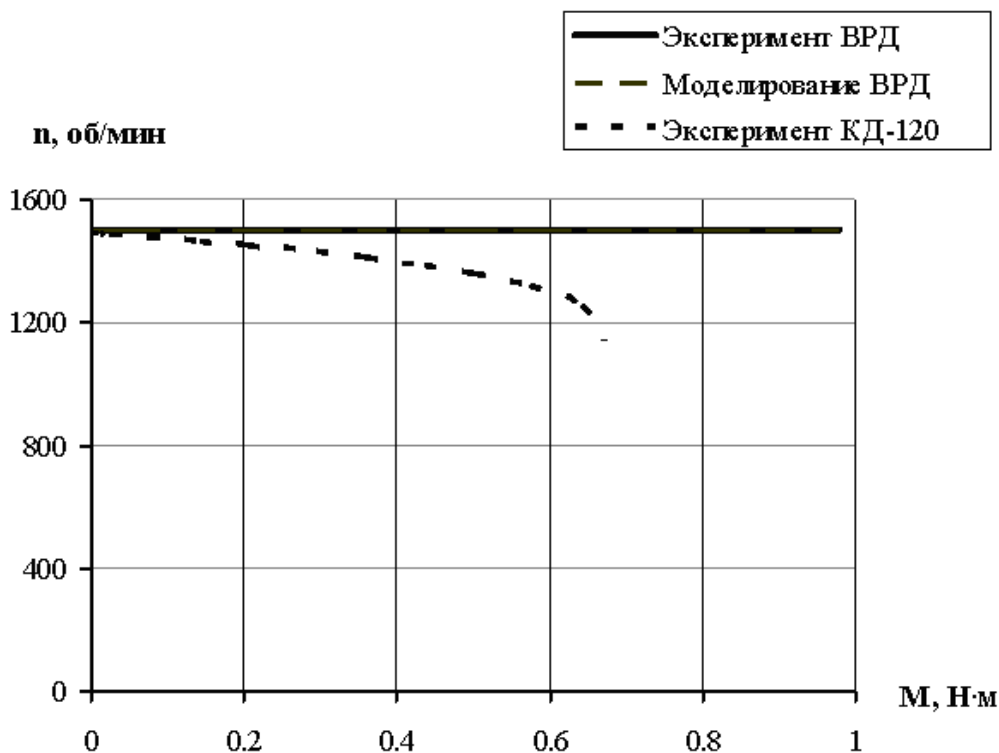


Рисунок 4.47 – Сравнение механических характеристик  
(на данном графике кривые для вариантов  
“Эксперимент ВРД” и “Моделирование ВРД” совпадают)

Из представленных рисунков видно, что ВРД имеет жесткую механическую характеристику, в отличие от электродвигателя КД-120 и более высокий КПД (который в среднем на 15 % больше чем у КД-120). Жесткая механическая характеристика ВРД связана с наличием СУ, которая благодаря обратной связи поддерживает постоянную скорость для различных нагрузочных моментов. При этом потребление тока ВРД прямо пропорционально нагрузке на валу (рисунок 4.49).

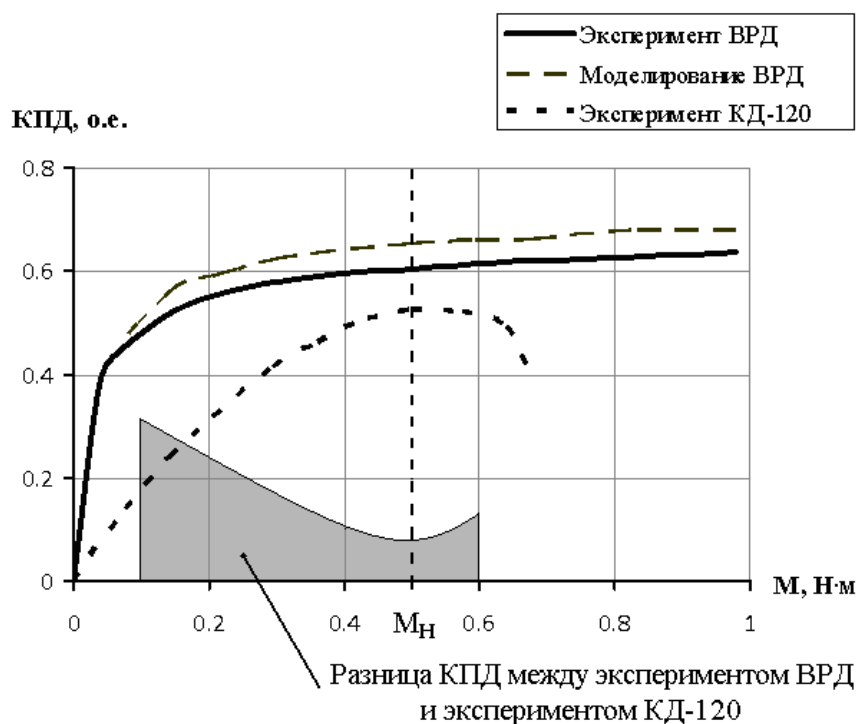


Рисунок 4.48 – Сравнение КПД от момента на валу

Если сравнивать моделирование ВРД с экспериментом, то можно отметить что максимальное расхождение по КПД равно 6.8 %.

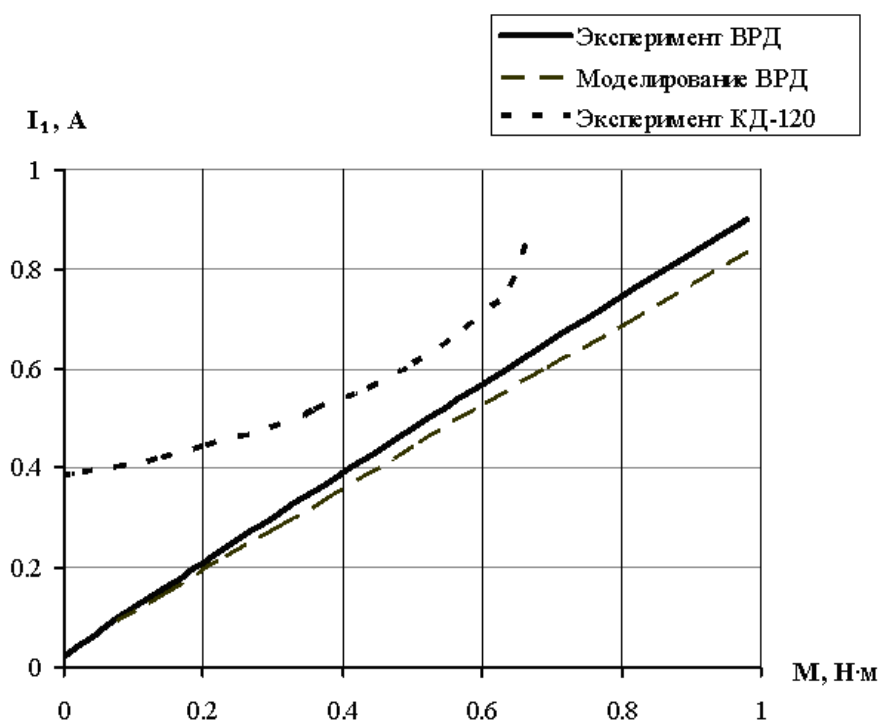


Рисунок 4.49 – Сравнение потребляемого тока от момента на валу

Предоставляемые системой автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD возможности структурного и параметрического синтеза и анализа ВРД продемонстрированы на примере синтеза вентильно-реактивного двигателя для привода маслобойки. При этом точность моделирования ВРД, в сравнении с экспериментом достаточно высока.

#### 4.5.3. Определение оптимальных углов коммутации

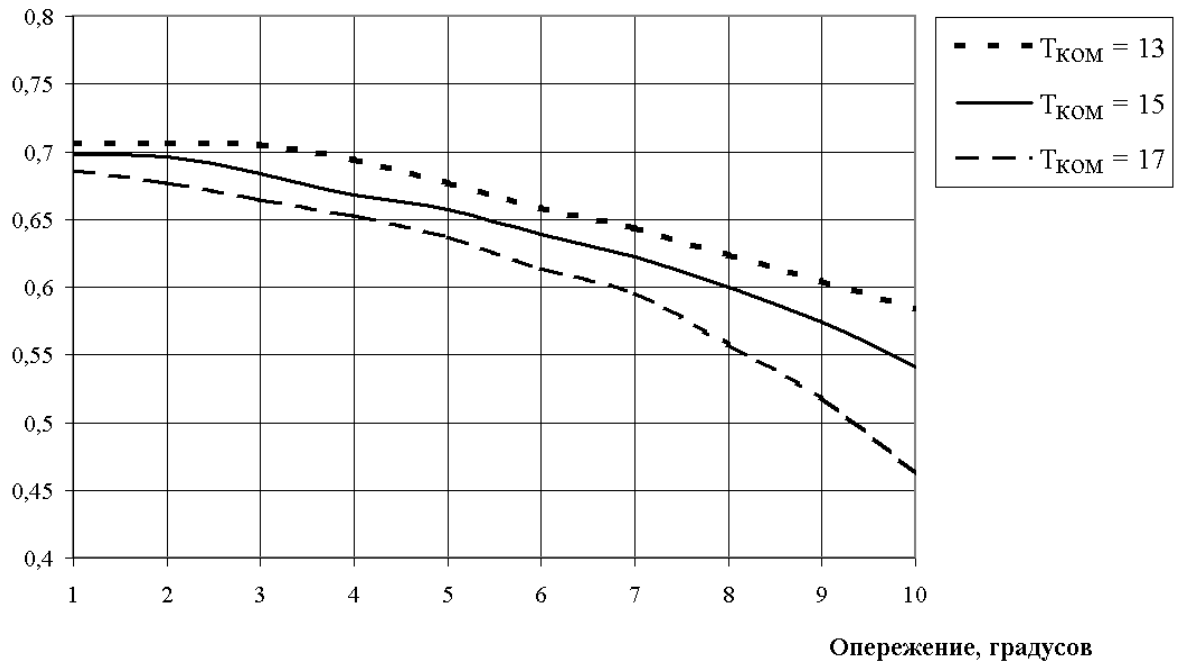
Для определения оптимальных углов коммутации рассмотрим их различные комбинации. Примем изменение угла включения  $\theta_{ON}$  от 1 до 10 градусов, с шагом 1 градус. При этом будем изменять величину зоны коммутации  $T_{КОМ}$  (от 13 до 17 градусов). В качестве иллюстрации приведен рис. 2.7.

Исследования проведем в подсистеме расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы системы SRM-CAD, заданная скорость 1500 об/мин, нагрузочный момент на валу  $M_H = 0.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Анализировать будем  $K_{II}$  (коэффициент пульсаций момента) и КПД для квазиустановившегося режима работы.

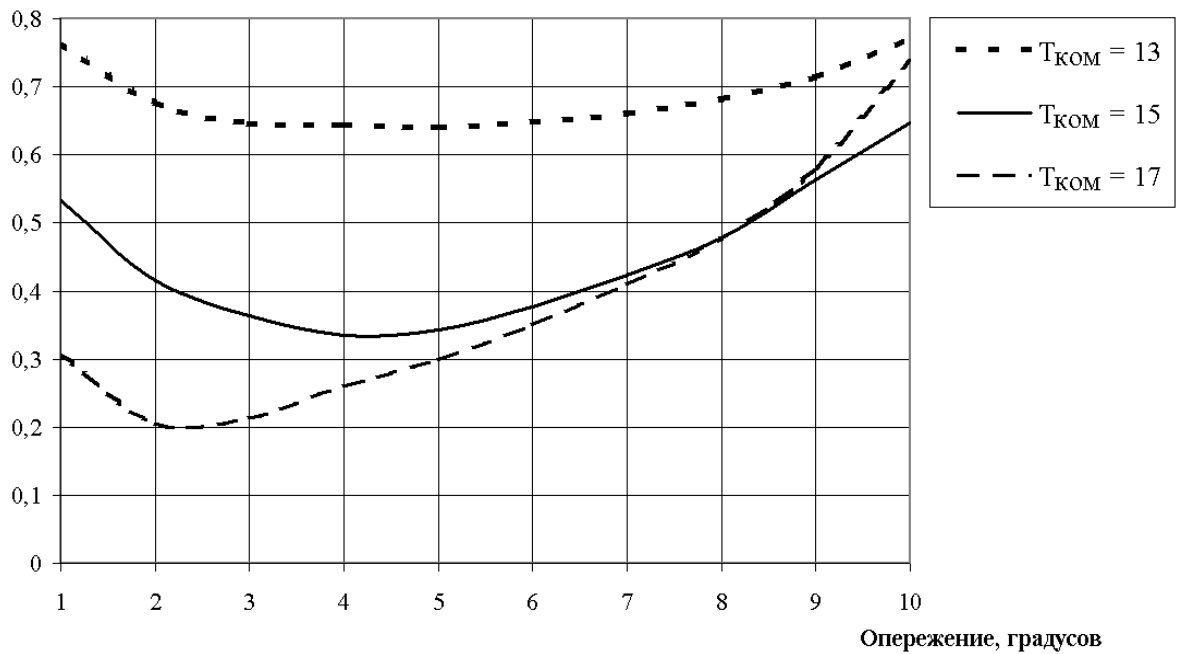
Результаты расчетов в виде таблицы представлены в приложении Д. Графическое отображение зависимостей КПД и  $K_{II}$  от угла включения зоны коммутации ( $\theta_{ON}$ ) для различных зон коммутации ( $T_{КОМ}$ ) (от 13 до 17 градусов) приведены на рисунках 4.50 и 4.51, соответственно.

На рисунках 4.52 и 4.53 приведены диаграммы токов и моментов для углов  $\theta_{ON} = 2$  градуса и  $\theta_{OFF} = 19$  градусов (при этом зона коммутации составляет  $T_{КОМ} = 17$  градусов). Для сравнения диаграмм моментов с “обычным” режимом работы (углы коммутации  $\theta_{ON} = 5$  градусов и  $\theta_{OFF} = 20$  градусов) см. рис. 4.45.

КПД, о.е.

Рисунок 4.50 – Зависимость КПД от угла включения  $\theta_{ON}$ 

Кп, о.е.

Рисунок 4.51 – Зависимость  $K_{II}$  от величины опережения



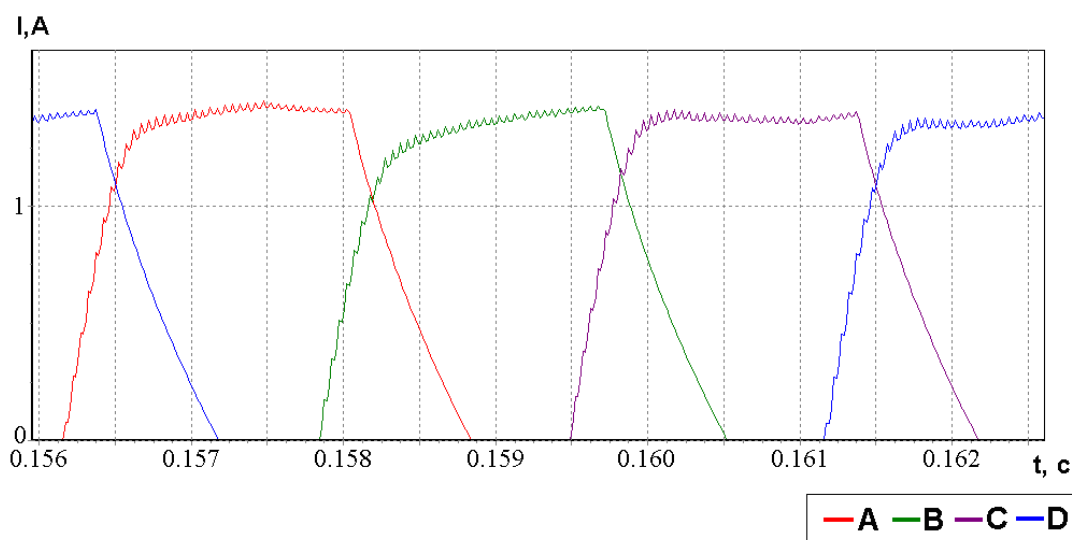


Рисунок 4.52 – Диаграмма токов при углах коммутации

$$\theta_{ON} = 2 \text{ градуса и } \theta_{OFF} = 19 \text{ градусов}$$

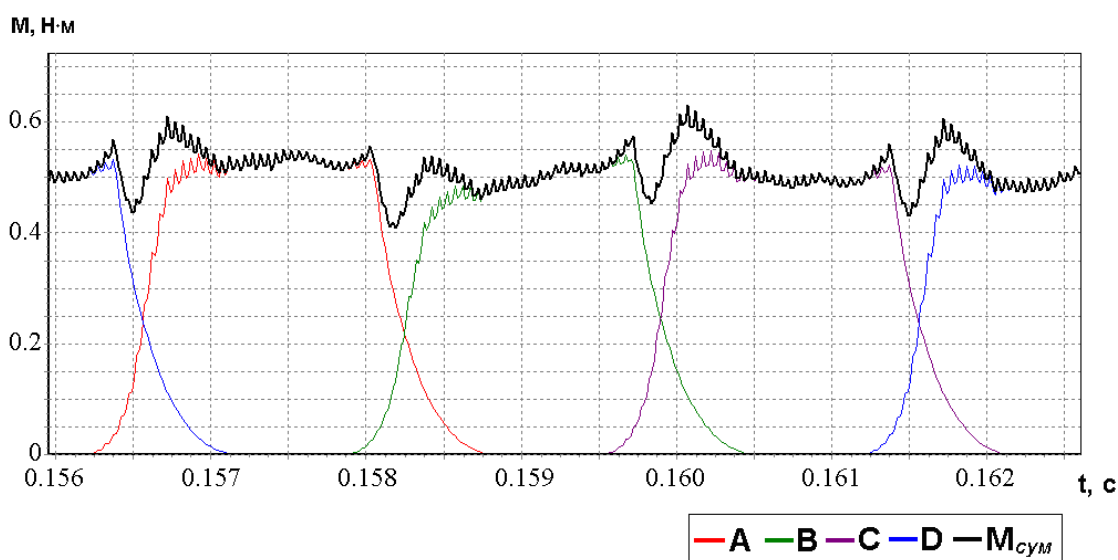


Рисунок 4.53 – Диаграмма моментов при углах коммутации

$$\theta_{ON} = 2 \text{ градуса и } \theta_{OFF} = 19 \text{ градусов}$$

Из приведенных выше рисунков видно, что максимальный КПД достигается при угле включения 1 градус, а коэффициент пульсаций момента  $K_{II}$  имеет явно выраженный минимум при  $\theta_{ON} = 2$  градуса, при использовании зоны коммутации  $T_{KOM} = 17$  градусов. Следовательно, оптимальными углами коммутации будут  $\theta_{ON} = 2$  градуса. и  $\theta_{OFF} = 19$  градусов, величина зоны коммутации

составляет  $T_{КОМ} = 17$  градусов, при этом КДП равен 67.7 %, величина коэффициента пульсаций момента  $K_{П} = 0.206$  о.е.

#### 4.5.4. Тепловой расчет

Кроме расчета электромагнитных свойств, динамических и квазиустановившихся режимов работы ВРД, также важен анализ тепловых процессов в ЭМП. Для расчета двухмерного стационарного теплового поля с использованием МКЭ применим программу FEMM (версия 4.2) [79]. Математическая постановка задачи расчета тепловых полей рассмотрена в пункте 2.3 и описана уравнениями 2.5 – 2.8.

Рассматриваемый ВРД имеет закрытый корпус с естественным охлаждением (рис. 4.39), способ охлаждения IC0040. Режим работы – длительный S1.

В качестве исходных данных для решения тепловой задачи воспользуемся результатами моделирования квазиустановившегося режима ВРД с оптимальными углами коммутации, которые были получены в предыдущем подразделе (4.5.3). Моделирование ВРД выполнено в системе автоматизированного синтеза SRM-CAD [66, 80], с нагрузкой на валу  $0.05 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и частотой вращения вала 1500 об/мин, при этом углы коммутации  $\theta_{ON} = 2$  градуса и  $\theta_{OFF} = 19$  градусов. Результаты расчета квазиустановившегося режима приведены в таблице 4.12.

Граничные условия и коэффициенты теплопроводности выбираем согласно [16]. Магнитная система рассматриваемого ВРД выполнена из электротехнической стали марки 2211. Объемная плотность тепловыделения в статоре и роторе рассчитывается исходя из величины потерь в стали и равна для статора  $56 \text{ кВт/м}^3$ , для ротора  $47 \text{ кВт/м}^3$ . Согласно методике [16] тепловая проводимость паза на единицу длины в радиальном направлении –  $64 \text{ Вт/(К} \cdot \text{м)}$ . В об-

мотках выделяются электрические потери, создающие объемную плотность тепловыделения  $209 \text{ кВт/м}^3$ . Результаты расчета приведены на рис. 4.54.

Таблица 4.12 – Результаты моделирования квазиустановившегося режима

для углов  $\theta_{ON} = 2$  градуса и  $\theta_{OFF} = 19$  градусов

Параметр	Значение
Потребляемая мощность, Вт	116.7
Мощность на валу, Вт	78.7
Мощность электрических потерь, Вт	16.6
Механические потери, Вт	1.6
Потери в стали статора, Вт	10.7
Потери в стали ротора, Вт	3.1
Потери в системе управления, Вт	6

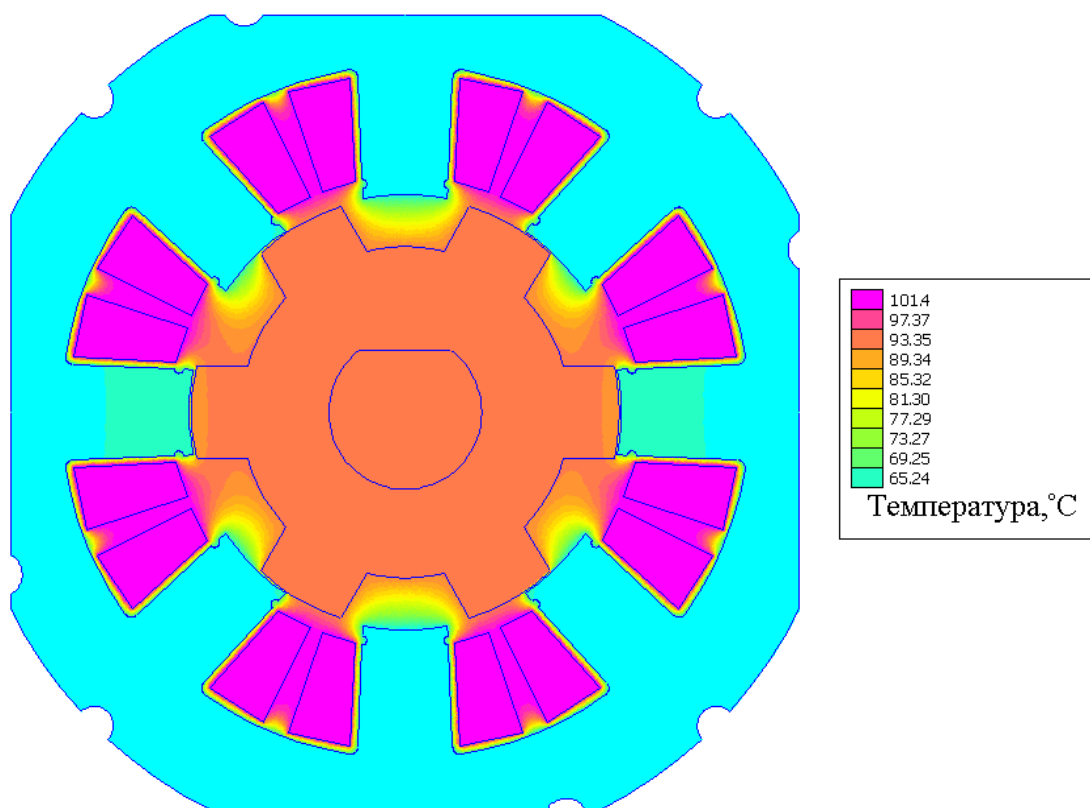


Рисунок 4.54 – Распределение температуры в ЭМП ВРД

Получив распределение температуры в результате расчета полевой тепловой модели можно определить локализацию наиболее нагретых участков ЭМП ВРД. Максимальная температура сосредоточена в обмотках статора и составляет порядка  $101^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.6. Выводы

1. В результате анализа девяти базовых конфигураций зубцовой зоны четырехфазного электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя классической конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору  $8/6$ , с использованием численных методов расчета магнитного поля, можно рекомендовать применять активную зону с параллельными стенками полюсов на статоре и роторе.

2. Для оптимальной конфигурации активной зоны четырехфазного ВРД конструкции  $8/6$  определены оптимальные соотношения коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора, они составляют для статора  $\alpha_S = 0.63$  о.е. и для ротора  $\alpha_R = 0.35$  о.е. При этом обеспечивается максимальный средний момент на периоде коммутации.

3. На базе высокоточных полевых математических моделей ЭМП ВРД получены рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора, для трехфазного ЭМП конфигурации  $6/4$ , которые обеспечивают максимальный средний электромагнитный момент на периоде коммутации. При этом рекомендуемые коэффициенты полюсного перекрытия статора  $\alpha_S = 0.63$  о.е. и ротора  $\alpha_R = 0.42$  о.е.

4. Значительное улучшение энергетических характеристик и рабочих свойств ВРД возможно путем незначительного усложнения датчика положения ротора, что не приводит к значительному удорожанию двигателя в целом. При этом соответствующая настройка параметров коммутации с расширением и смещением зоны коммутации в сторону опережения угла включения дает зна-

чительный выигрыш в виде увеличения КПД, в среднем на 12 % и снижения уровня пульсаций момента, в среднем на 23 %, а также увеличения степени использования ЭМП ВРД.

5. Приведены рекомендации по численным значениям параметров коммутации (углов включения и выключения) для 2-х рассмотренных электродвигателей (SRM-115 и SRM-130). При использовании других ВРД необходимо провести аналогичные расчетные исследования по изложенной выше методике.

6. Созданная система автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD предоставляет возможность структурного и параметрического синтеза ВРД, а также его оптимизации, что и продемонстрировано на примере синтеза вентильно-реактивного двигателя для привода маслобойки. При оптимизации углов коммутации фазы получено увеличение КПД на 2.2 % при значительном уменьшении коэффициента пульсаций момента на 38 %.

7. Сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами математического моделирования показало достаточно высокую точность рассмотренных моделей, что позволяет с высокой точностью решать задачи анализа и оптимизации ВРД.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Моделирование динамических и квазиустановившихся режимов работы ВРД осуществляется на базе разработанных полевых ММ высокой степени детализации с учетом магнитных потерь в магнитопроводе. ММ является основой для разработки программного обеспечения автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD. Адекватность разработанной математической модели подтверждается экспериментальными исследованиями на макетных образцах.

2. Разработана ММ стационарного теплового поля ВРД на основе МКЭ. Результаты сопоставления физического эксперимента и математического моделирования стационарного теплового поля ВРД совпадают с точностью до пяти процентов.

3. Сформированы системные принципы, на базе которых разработана система автоматизированного синтеза ВРД SRM-CAD. Модульная структура системы позволяет выполнять ее расширение и модернизацию по мере необходимости. Разработанная система инвариантна к ряду конструктивных исполнений ВРД, что позволяет в процессе проектирования варьировать структуру ЭМП и осуществлять выбор оптимальной структуры. Для оперативного изменения структуры используется параметризация геометрии ЭМП ВРД. Использование системы SRM-CAD позволяет реализовать решение основных проектных задач: от технического задания до расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы, а также проверку теплового состояния ЭМП ВРД с использованием полевых ММ. Система реализована на компилируемом языке высокого уровня, что существенно ускоряет время расчетов, в сравнении с реализациями, которые основаны на системах MatLab Simulink, LabView и MathCad.

4. Разработанные программные средства симуляции электромеханических процессов позволяют оперативно проводить исследования влияния различных факторов на процессы в ВРД. Эти средства

выступают основой для проведения оптимизации ВРД на базе цепно-полевой ММ высокой степени детализации с возможностью расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы. Для избегания попадания в локальный оптимум при оптимизации используется генетический алгоритм.

5. Выполнен анализ, с использованием МКЭ расчета магнитного поля, девяти базовых конфигураций зубцовой зоны четырехфазного ЭМП ВРД классической конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6. Рекомендуется применять активную зону с параллельными стенками полюсов на статоре и роторе.

6. Выполнена оптимизация конфигурации активной зоны четырехфазного ЭМП ВРД конструкции 8/6. Получены оптимальные коэффициенты полюсного перекрытия для статора  $\alpha_S = 0.63$  о.е. и для ротора  $\alpha_R = 0.35$  о.е. При этих значениях обеспечивается максимальный средний момент на периоде коммутации.

7. Также определены оптимальные коэффициенты полюсного перекрытия статора  $\alpha_S = 0.63$  о.е. и ротора  $\alpha_R = 0.42$  о.е. для трехфазного ЭМП конфигурации 6/4, при которых обеспечивается максимальный средний электромагнитный момент.

8. Существенное улучшение рабочих свойств и энергетических характеристик ВРД можно обеспечить путем расширения и смещения зоны коммутации в сторону опережения угла включения. Это приводит к увеличению КПД (в среднем на 12 %) с одновременным снижением уровня пульсаций момента (в среднем на 23 %).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей / Д.А. Аветисян – М.: Высшая школа, 1988. – 271 с.
2. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский – Москва: изд. ДМК Пресс, 2004. – 426 с.
3. Апсит В.В. Физический смысл расчетных уравнений метода конечных элементов при расчете стационарного двухмерного магнитного поля и их связь с уравнениями Максвелла / В.В. Апсит, Я.А. Новик // Изд. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1976. – № 3. – С. 60 - 66.
4. Борисов С.А. Способы создания параметризованной геометрической модели / С.А. Борисов, В.В. Смолянинов, М.Н. Терентьев // источник: <http://www.cosmos.rcnet.ru/articles/param.html>
5. Бородулин Ю.Б. Автоматизированное проектирование электрических машин / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов и др.; под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высшая школа, 1989. – 280 с.
6. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. – 336 с.
7. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М.: Издательский центр “Академия”, 2006. – 288 с.
8. Бут Д.А. Модификации вентильно – индукторных двигателей и особенности их расчетных моделей / Д.А. Бут // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 34 - 44.



9. Бычков М.Г. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентиляно-индукторной машины / М.Г. Бычков, Сусси Риах Самир // Электротехника. – 2000. – № 3. – С. 15 - 19.

10. Васьковський Ю.Н. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб / Ю.Н. Васьковський – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 192 с.

11. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): Учеб. пособие для вузов / В.М. Вержбицкий – М.: Высш. шк., 2001. – 382 с.: ил.

12. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентиляно-реактивного двигателя / Г.В. Пуйло, А.С. Порайко, И.Н. Радимов [и др.] // Вестник НУ “Львовская политехника”. Тематический выпуск: Электроэнергетические и электромеханические системы. - 2003. – № 485. – С. 112 - 117

13. Галайко Л.П. Выбор размеров зубцового слоя в вентиляно-индукторном двигателе малой мощности / Л.П. Галайко // Вестник НТУ “ХПИ”. – 2008. – № 45. – С. 13 - 16.

14. Галайко Л.П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентиляно – индукторного двигателя / Л.П. Галайко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – № 1. – С. 24 - 26.

15. Галайко Л.П. Учет магнитных потерь при проектировании вентиляных индукторных двигателей / Л.П. Галайко // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 2. – С. 17 - 18.

16. Гандшу В.М. / Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT / В.М. Гандшу // источник: <http://elcut.ru/articles/gandshou/block.pdf>

17. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Ю.А. Голландцев – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 148 с.

18. Губарь Ю.В. Введение в математическое моделирование / Ю.В. Губарь // источник: <http://www.intuit.ru/department/calculate/intromathmodel/>

19. Гулый М.В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции легких: Дис. канд. наук: 05.09.01 / Одесский национальный политехнический университет – Одесса, 2010. – 169 с.

20. Гулый М.В. Влияние смещения зоны коммутации на характеристики вентильно-реактивного электропривода / М.В. Гулый, З.П. Процина, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2007. – С. 94 - 96.

21. Гулый М.В. Тормозной режим вентильно-реактивного электродвигателя / М.В. Гулый, И.Н. Радимов, В.В. Рымша, З.П. Процина // Електромашинобудування і електрообладнання. – 2009. – № 73. – С. 59 - 62.

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

23. Жигулин В. О том, как твердое тело может быть слишком твердым, или Взгляд на параметризацию сбоку / В. Жигулин // источник: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=6646>

24. Зинченко Е.Е. Повышение энергетических показателей вентильных реактивных двигателей, питающихся от сети переменного тока: Дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Харьковская национальная академия городского хозяйства – Харьков, 2012. – 221 с.

25. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский – М.: Энергия, 1980. – 928 с., ил.

26. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский – М.: Высш.шк., 1989. – 312 с.

27. Ильинский Н.Ф. Тепловые модели вентильно-индукторного электродвигателя / Н.Ф. Ильинский, А.Л. Докукин, В.А. Кузьмичев // Электричество. – 2005. – № 8. – С. 27 - 33.

28. Карпович О.Я. Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 42 - 45.
29. Каша Л.В. Моделювання електромеханічних процесів в керованому вентильному реактивному двигуні: Дис. канд. наук: 05.09.01 / Львівська політехніка – Львів, 2012. – 167 с.
30. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам / В.Ф. Козаченко // *CHIP NEWS*. – 1999. - № 1. – С. 16 - 28.
31. Коломийцев Л.Ф. К расчету реактивного индукторного двигателя малой мощности / Л.Ф. Коломийцев, С.А. Пахомин, И.А. Квятовский // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1999. – № 1. – С. 15 - 17.
32. Коломийцев Л.Ф. Расчет тягового усилия линейного индукторного двигателя методом конечных элементов / Л.Ф. Коломийцев, В.М. Павлюков, Г.К. Птах // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1988. – № 2. – С. 10 - 14.
33. Копорушкин П.А. Алгоритм расчета параметризованных геометрических объектов / П.А. Копорушкин, А.С. Партин // *Электронный журнал “Исследовано в России”* <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/018.pdf>
34. Копылов И.П. / Проектирование электрических машин // И.П. Копылов, Б.В. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993, Т. 1 - 2.
35. Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2004. – 404 с.
36. Крамсков С.А. Компьютерное моделирование процессов в вентильно-индукторном электроприводе с использованием пакета MathCAD / С.А. Крамсков, А.В. Киреев // *Электровозостроение: сб. научн. тр. / ОАО “Всерос. НИИ проектно-конструкторский институт электровозостроения” (ОАО “ВЭЛНИИ”)*. – Т. 45 – Новочеркасск, 2003. – С. 239 - 257.

37. Красовский А.Б. Физические особенности и алгоритмы компенсации пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе / А.Б. Красовский // Мат. второй междунар. конф. "Сост. разработ. и персп. прим. ВИП", М.: ИНТЕРЭЛЕКТРО. 2001. – С. 40 - 45.

38. Крылов О.В. Метод конечных элементов и его применение в инженерных расчетах / О.В. Крылов – М.: Радио и связь, 2002. – 104 с.

39. Кузнецов В.А. Вентильно-индукторные двигатели. Учебное пособие / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев – М.: Изд-во МЭИ, – 2002. – 57 с.

40. Кузнецов В.А. К вопросу определения числа витков обмотки фазы вентильного индукторного двигателя / В.А. Кузнецов, А.В. Матвеев // Электротехника. – 2000. – № 3. – С. 10 - 15.

41. Морозов А.Г. Расчет электрических машин постоянного тока / А.Г. Морозов – М.: Высш. школа, 1974. – 20 с.

42. Назарян А.Г. Определение электромагнитных сил при расчетах магнитного поля / А.Г. Назарян, Э.Х. Аджемян, А.Л. Маилян // Электричество. – 1985. – № 4. – С. 58 - 60.

43. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций / И.Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.

44. Описание возможностей программы ELCUT // источник: [http://elcut.ru/feat\\_r.htm](http://elcut.ru/feat_r.htm)

45. Осталин С.Ю. Методы и алгоритмы поисковой оптимизации электромеханических устройств и систем: учебное пособие по курсу «Инженерное проектирование» / С.Ю. Осталин, С.С. Маслов. – М.: Изд-во МЭИ, 2001 – 48 с.

46. Отчет по научно-исследовательской теме № 560-51 “Разработка математических моделей и исследование процессов в электрических машинах и трансформаторах”. Номер государственной регистрации 0107U001962.

47. Отчет по научно-исследовательской теме № 625-51 “Разработка средств автоматизированного синтеза высокоэффективных электромагнитных и электромеханотронных устройств”. Номер государственной регистрации 0106U0113174.

48. Официальный сайт ООО “Электротехника – Новые технологии” // [www.ukrainemotors.com](http://www.ukrainemotors.com)

49. Параметрическое моделирование. Словарь терминов // источник: <http://www.niac.ru/graphinfo.nsf/>

50. Пахомин С.А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вентильного реактивного индукторного двигателя / С.А. Пахомин // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 1. – С. 30 - 36.

51. Пахомин С.А. О пульсациях электромагнитного момента в трехфазном реактивном индукторном двигателе / С.А. Пахомин // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 34 - 37.

52. Процына З.П. Оптимизация углов включения и выключения фаз вентильно-реактивного двигателя / З.П. Процына // Вестник Национального технического университета “ХПИ” – 2009. – № 7 С. 118 - 125.

53. Процына З.П. Параметризация геометрии вентильно-реактивного двигателя / З.П. Процына // Электротехнические и компьютерные системы – 2016. – № 22 (98). – С. 239 - 243.

54. Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей / Г.К. Птах // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 7 - 11.

55. Пуйло Г.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя / Г.В. Пуйло, А.С. Порайко, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // Вестник НУ “Львовская политехника”. Тематический выпуск: Электроэнергетические и электромеханические системы. – 2003. – № 485. – С. 112 - 117.

56. Пуйло Г.В. Оптимальный параметрический синтез однофазных коллекторных двигателей на основе генетического алгоритма / Г.В. Пуйло, С.Н. Пирковский, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2004. – № 62. – С. 129 - 132.

57. Радимов И.Н. Влияние параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного электропривода / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2006. – № 67. – С. 82 – 87.

58. Радимов И.Н. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, Т.Т.Х. Чан, З.П. Процына // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 5. – С. 26-28.

59. Радимов И.Н. Коэффициенты полюсного перекрытия трехфазного вентильно-реактивного двигателя / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2009. – № 73. – С. 63-67.

60. Радимов И.Н. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, О.Е. Малеванный // Электротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60 - 64.

61. Розанов Ю.К. Электронные устройства электромеханических систем: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Ю.К. Розанов, Е.М. Соколова. – М.: издательский центр “Академия”, 2004. – 272 с.

62. Русаков А.М Моделирование тепловых процессов в вентильном индукторном двигателе с электромагнитным возбуждением / А.М. Русаков, И.В. Шатова // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 42 - 49.

63. Рымша В.В. Анализ конфигурации зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, О.Е. Малеванный // Вестник Восточнoукраинского национального университета. – 2003. – № 4 (62). – С. 76 - 82.

64. Рымша В.В. Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентильно-реактивного электродвигателя / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, Т.Т.Х. Чан // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 56 - 58.

65. Рымша В.В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей: Дис. докт. наук: 05.09.01 / ОНПУ – Одесса, 2004. – 336 с.

66. Рымша В.В. Подсистема компьютерного моделирования вентильно-реактивных электродвигателей / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, З.П. Процына // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. – № 2 (25). – С. 437 - 442.

67. Рымша В.В. Расчет двумерного стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов / В.В. Рымша, З.П. Процына, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 26 - 28.

68. Рымша В.В. Расчет статического электромагнитного момента вентильно-реактивного двигателя модифицированным методом натяжений / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, А.С. Порайко // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2003. – Вып. 60. – С. 35 - 38

69. Рымша В.В. Расчет стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов / В.В. Рымша, З.П. Процына, С.К. Демьяненко // источник: <http://www.elcut.ru/articles/opu/index.htm>

70. Рымша В.В. Расчет электромагнитных сил в линейных индукторных двигателях постоянного тока / В.В. Рымша, И.В. Меркулов // Электромашиностроение и электрооборудование – 1991. – Вып. 45. – С. 75 - 78.

71. Рымша В.В. Рациональные соотношения геометрических размеров в вентильном двигателе с постоянными магнитами и дополнительными полюсами / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, Т.Т.Х. Чан, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2008. – № 70. – С. 50 - 54.

72. Рымша В.В. Синтез регрессионных моделей по результатам численных расчетов магнитного поля в линейном индукторном двигателе постоянного тока / В.В. Рымша // Электромашинобудування та електрообладнання. – 1999. – Вип. 53. – С. 74 - 80.

73. Рымша В.В. Сопоставительный анализ энергетических свойств вентильно-реактивных двигателей с различным числом фаз / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, З.П. Процина, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 39 - 41.

74. Рымша В.В. Технология расчета стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе ANSYS Workbench / Рымша В.В., Радимов И.Н., Баранцев М.В. // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 6. – С. 25 - 32.

75. Рымша В.В. Вентильно-реактивні електродвигуни спеціального призначення / В.В. Рымша, І.М. Радимов, О.Є. Мальований, М.В. Баранцев, З.П. Процина // Електроінформ – 2006. – № 2. – С. 28 - 30.

76. Сайт завода “Мотор Січ”. Описание продукции – маслобойка бытовая электрическая “Мотор Січ МБЭ-6” // ист.: <http://www.motorsich.com/rus/products/consumers/separators/mbe6/>

77. Сайт “Красногорского завода”. Каталог продукции – электродвигатели однофазные конденсаторные КД 60-4/56 Р, КД 90-4/56 РТ (РТК), КД 120-4/56 Р (РМ6), КД 160-4/56 Р, КД 180-4/56 Р (Р1М) по АМИВ 521.723.000 ТУ // ист.: <http://www.krzed.ru/catalog/119/46/>

78. Сайт лаборатории SPEED: <http://www.speedlab.co.uk>

79. Сайт программы FEMM: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

80. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30929. Комп'ютерна програма “Система автоматизованого аналізу та синтезу вентильно-реактивних двигунів SRM-CAD” / М.В. Гулий, О.Є. Мальований, З.П. Процина, І.М. Радимов, В.В. Рымша. Україна, м. Київ: Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, 10.11.2009 р.



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

82. Слободниченко Б.И. Магнитное поле и электромагнитный момент вентильного индукторного двигателя / Б.И. Слободниченко, В.В. Рымша, А.С. Порайко // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 5. – С. 33 - 34.

83. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр “Академия”, – 2006. – 272 с.

84. Стариков А. GeneBase – библиотека компонентов для Delphi / А. Стариков // ист.: <http://www.basegroup.ru/download/freecomponents/genebase/>

85. Тазов Г.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Г.В. Тазов, В.В. Хрущев. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 336 с.

86. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин / А.А. Терзян – М.; Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

87. Ткачук В. Електромеханотроніка: Підручник / В. Ткачук – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”. 2006. – 440 с.

88. Ткачук В. Електромеханотроніка – нове перспективне напрямлення розвитку електромеханіки. / В. Ткачук // Електроінформ 2007, № 4, С. 6 - 9.

89. Ткачук В.І. Явнополюсні вентильні реактивні двигуни з буферами енергії: Автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.09.01 // ДУ “Львівська політехніка” – Львів, 1999. – 37 с.

90. Уваров А.С. AutoCAD 2006 для конструкторов / А.С. Уваров // Изд.: ДМК Пресс, 2006 г. 360 стр.

91. Чернов Е.А. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: справочное пособие / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин – Горький: Волго-Вятское кн. изд., 1989, – 320 с., ил.

92. Шаббаев В.А. Алгоритмы управления вентиляно-индукторным электроприводом, обеспечивающие уменьшение неравномерности электромагнитного момента / В.А. Шаббаев, М.В. Лазарев, А.В. Захаров // Электротехника 2005., № 5, С 54 - 56.

93. Шевченко А.Ф. Новый электродвигатель с переменным магнитным сопротивлением воздушного зазора (SR-двигатель) для высокоскоростных электроприводов / А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко // Электротехника № 11, 2000, С. 20 - 23.

94. Шмелев В.Е. Заметки по использованию системы FEMLAB / В.Е. Шмелев // источник: <http://matlab.exponenta.ru/femlab/default.php>

95. Щучинский С.Х. / Расчет стационарного температурного поля электромагнитного привода методом конечных элементов / С.Х. Щучинский, А.Г. Никитенко, О.Ф. Ковалев, Б.Н. Лобов // Изв. ВУЗов “Электромеханика”, 1993, – № 4, – С. 69 - 77

96. Эглайс В.О. Синтез регрессионной модели объекта на основе табличных данных / В.О. Эглайс // Изв. АН Латв.ССР. Сер.физ. и техн. наук. – 1980. – № 4. – С. 109 - 112.

97. Эглайс В.О. Синтез регрессионных моделей по результатам численного расчета магнитного поля в электрической машине / В.О. Эглайс, Я.А. Дирба, Я.А. Новик // Изв. АН Латв.ССР. Сер.физ. и техн. наук. – 1980. – № 4. – С. 113 - 118.

98. About Lazarus. Source: <http://www.lazarus.freepascal.org>

99. Arkkio. Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations. Acta Polytechnica Scandinavica. 1987.

100. Bhiwapurkar N., Jain A.K., Mohan N. Study of new stator pole geometry for improvement of SRM torque profile // Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference. – 15 May 2005. – P. 516 - 520.

101. David Meeker. User's Manual. Fenite Element Method Magnetics. Version 4.2 / David Meeker // source: <http://www.femm.info/Archives/doc/>

102. G. Dunlop. A switched-reluctance motor drive with zero torque ripple and a constant inverter bus current // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Jun 1994. Vol. 208, № 1. P. 61 - 68.

103. Dynamic vibration analysis of switched reluctance motor using magnetic charge force density and mechanical analysis / Joon-Ho Lee, Young-Hwan Lee, Dong-Hun Kim, Ki-Sik Lee, Il-Han Park // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, Mar 2002, Volume: 12 Issue: 1, P. 1511 - 1514.

104. D. Miljavec, B. Benedicic Optimal turn-on and turn-off angle calculation of a high-speed two-phase switched reluctance motor // International journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2000, Vol.: 19, № 2, P. 388 - 395.

105. Fisch, J.H.; Yun Li; Kjaer, P.C.; Gribble, J.J.; Miller T.J.E. Pareto-optimal firing angles for switched reluctance motor control // Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, 1997. GALESIA 97. 1997, P. 90 - 96.

106. F. Henrotte, G. Deliege, K. Hameyer. The eqqshell method for the computation of electromagnetic forces on rigid bodies in 2D and 3D. The Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Perugia, Italy, June 16-19, 2002.

107. Iglesias I.J., Garcia-Tabares L., Lafoz M., Calero J., Portillo S., Cruz I., Toral F., Abramian P. "A Flywheel Switched Reluctance Motor Drive for Wind Energy Applications" ICEM 2002 Conference Proceedings.

108. Ki-Bong Kim, "Toroidal Switched Reluctance Motor part 1. fundamentals", Korea-Germany symposium 11, 1998, P. 135 - 141.

109. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p.

110. Luiz Lebensztajn, Carina A.R. Marretto, Fabio A.B. Perdiz, Mauricio C. Costa, ets / A multi-objective analysis of a special switched reluctance motor // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2005. – Volume 24 Issue 3. – Pages 931-941.
111. Michael Van Canneyt / User's Guide for Free Pascal // Michael Van Canneyt, Florian Klampfl, 178 p. source: <http://freepascal.org/docs.var>
112. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.
113. Pan Seok Shin, Pedro J. Otaduy, John McKeever, Don Adams. Interactive Design and Analysis Program for Switched Reluctance Motor using an Analytical Method // source: <http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2002/pres/114123.pdf>
114. Pengov Wayne A., Carr Douglas L. US Patent 6.028.385, Feb, 22, 2000
115. P.O. Rasmussen, "Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors", Ph.D thesis, ISBN 87-89179-40-4, January 2002.
116. Roberto Ierusalimschy, Luiz Henrique de Figueiredo, Waldemar Celes / Lua 5.1 Reference Manual // Publishing: Lua.org, 2006. – 112 p.
117. Sahoo N.C., Xu J.X. at al. Determination of current waveforms for torque ripple minimization in switched reluctance motor using iterative an investigation // IEE Proc. EPA. 1999. vol. 146, № 4. P. 369 - 377.
118. Virginie Raulin Modeling of Losses in Switched Reluctance Machines / Virginie Raulin, Art Radun, Iqbal Husain // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40, № 6. – P. 1560 - 1569.
119. Wei Wu, Dunlop J.B., Collocott S.J., Kalan B.A. Design optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis // Magnetics, IEEE Transactions on. – Sept. 2003. – Volume 39 Issue 5. – P. 3334 - 3336.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

Материалы внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Директор ООО «Электротехника –  
 Новые технологии»  
 О.Е. Малеваный  
 / 2016 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Процыны Зиновия Павловича  
 “Автоматизированный синтез вентильно-реактивных двигателей малой мощности”  
 представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Предприятием ООО «Электротехника – Новые технологии» освоен серийный выпуск вентильно-реактивных двигателей SRM-80-215-IE, состоящих из вентильного электродвигателя SRM-80 и блока управления, интегрированных в общий корпус. Вентильно-реактивные электродвигатели предназначены для замены универсальных коллекторных двигателей УЛ-061, УЛ-062, используемых в приводе разъединителя контактной сети высокого напряжения типа УМП-II.

При разработке электродвигателей были использованы предложенные в диссертационной работе Процыны Зиновия Павловича геометрические соотношения активной зоны электромеханического преобразователя вентильно-реактивного двигателя, обеспечивающие максимальный средний момент на периоде коммутации. По данным соотношениям была изготовлена оснастка для производства статора и ротора таких двигателей.

Проведенные испытания и результаты эксплуатации электроприводов с вентильно-реактивными двигателями в разъединителе контактной сети высокого напряжения типа УМП-II показали справедливость выбора предложенных геометрических соотношений активной зоны электромеханического преобразователя.

С использованием разработанной в диссертационной работе Процыны Зиновия Павловича системы автоматизированного синтеза вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD, были проведены исследования по изменению параметров коммутации в электроприводе SRM-80-162-IE. Результаты исследований внедрены в серийно выпускающийся электропривод SRM-80-162-IE для комплектации морских радаров «Буревестник-1» производства Киевского государственного завода «Буревестник». Данные электроприводы предназначены для установки на морские, речные и скоростные суда, а также на береговые посты наблюдения.

Данный акт подтверждает внедрение авторских разработок аспиранта Процыны Зиновия Павловича в ООО «Электротехника – Новые технологии».

Главный инженер – электроник

 М.В. Гулуй

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової та  
науково педагогічної роботи  
Одеського національного  
політехнічного університету

  
Дмитришин Д.В.  
“ 18 ” червня 2015 р.


**АКТ**

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Процини Зіновія Павловича «Автоматизований синтез вентильно-реактивних  
двигунів малої потужності», поданої на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

На кафедрі електричних машин в рамках для підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальностями «Електричні машини і апарати» та «Електричний транспорт» у навчальний процес впровадженні результати дисертаційної роботи Процини Зіновія Павловича «Автоматизований синтез вентильно-реактивних двигунів малої потужності». Матеріали дисертаційної роботи використовуються в лекційних курсах з дисциплін «Моделювання електромеханічних систем» та «Моделювання магнітних полів в електричних машинах», в курсовому і дипломному проектуванні. В лабораторному практикумі використовується створений здобувачем програмний комплекс автоматизованого аналізу та синтезу вентильно-реактивних двигунів – SRM-CAD.

Зав каф. електричних машин  
д.т.н., проф.

  
Петрушин В.С.



УКРАЇНА  
Міністерство освіти і науки України  
Державний департамент інтелектуальної власності

# СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір  
№ 30929

Комп'ютерна програма "Система автоматизованого аналіза и синтеза  
вентильно-реактивних двигателів SRM - CAD"

(вид, назва твору)

Автор(и) Гулий Михайло Вікторович, Мальований Олег Євгенович, Проциня  
Зіновій Павлович, Радимов Ігор Миколайович, Римша Віталій Вікторович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

10.11.2009

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності



М.В.Паладій



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

Руководство пользователя системы автоматизированного синтеза  
вентильно-реактивных двигателей SRM-CAD

## Содержание:

1. Интерфейс пользователя
  - 1.1. Главное окно
  - 1.2. Диалог открытия/сохранения файлов
  - 1.3. Окно “О программе”
  - 1.4. Окно “Помощь ”
2. Подсистема параметризации геометрии
  - 2.1. Возможности подсистемы генерации геометрии
  - 2.2. Внесение исходных данных
  - 2.3. Экспертная система проверки правильности исходных данных
  - 2.4 Коды ошибок подсистемы генерации геометрии
3. Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов
4. Подсистема оптимизации

# 1. Интерфейс пользователя

## 1.1. Главное окно

При запуске программы SRM-CAD (необходимо запустить файл MatModel.exe) открывается главное окно, показанное на рис. 1.1.

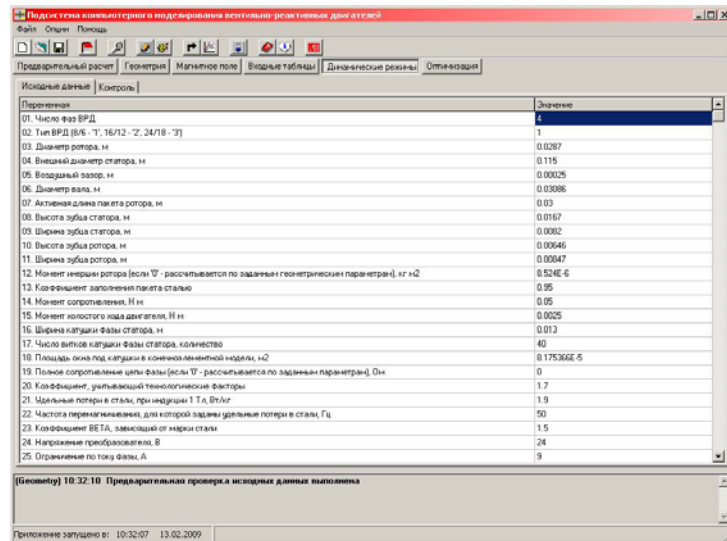


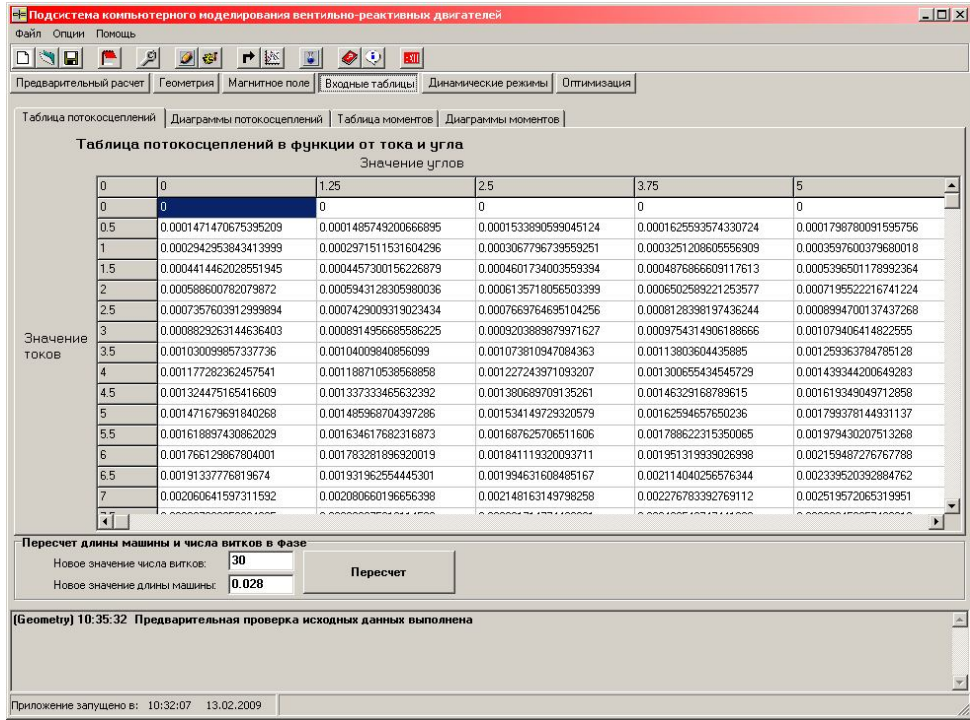
Рисунок 1.1 – Главная форма программы SRM-CAD

На главной форме располагаются следующие элементы интерфейса: главное меню (пункты “Файл”, “Опции” и “Помощь”), панель быстрого запуска (рис. 1.2.).

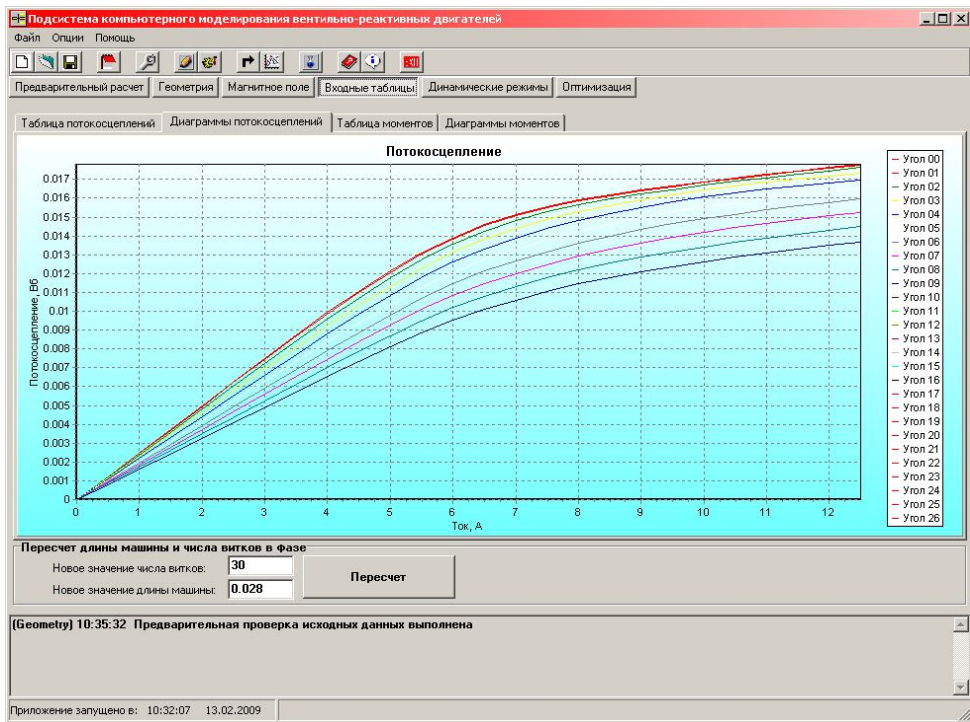


Рисунок 1.2 – Назначение кнопок панели быстрого запуска





а)



б)

Рисунок 1.5 – Модуль ввода табличных данных для расчета динамических и квазиустановившихся режимов

а) вывод табличных значений потокоцепления,

б) визуализация таблицы потокоцепления

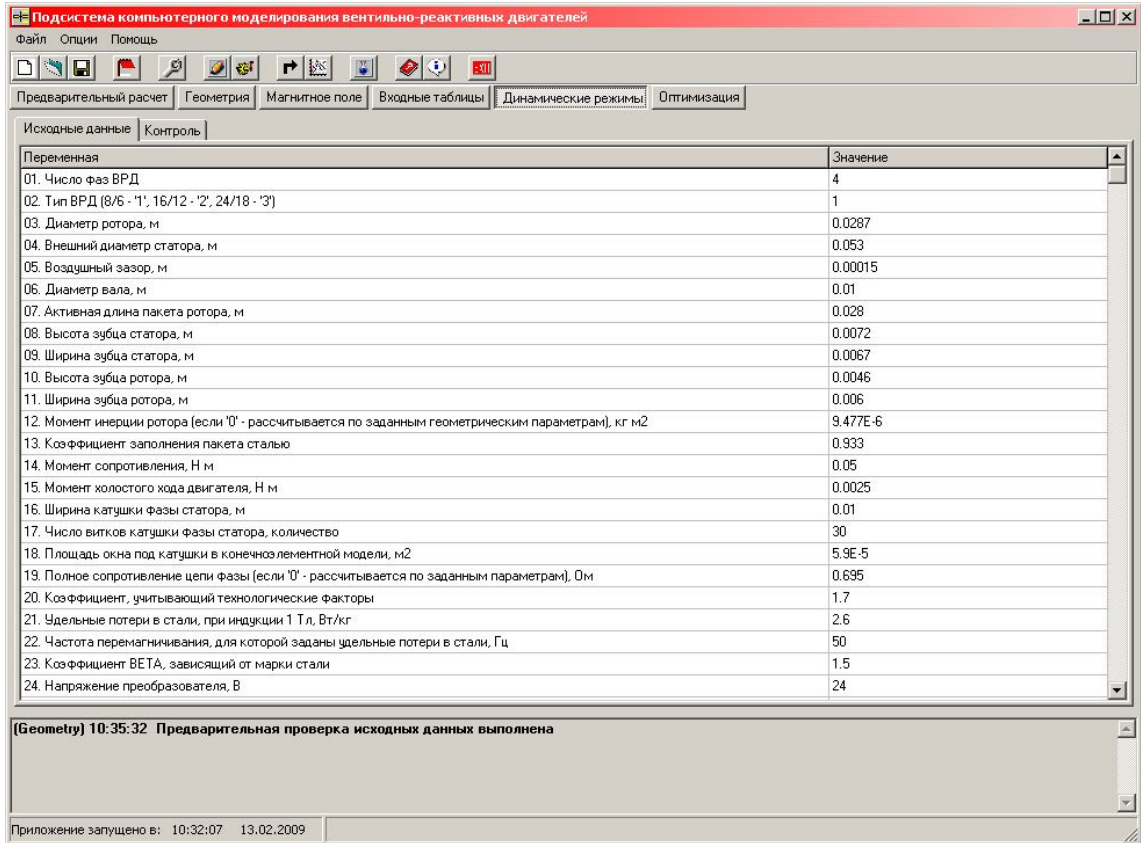


Рисунок 1.6 – Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов

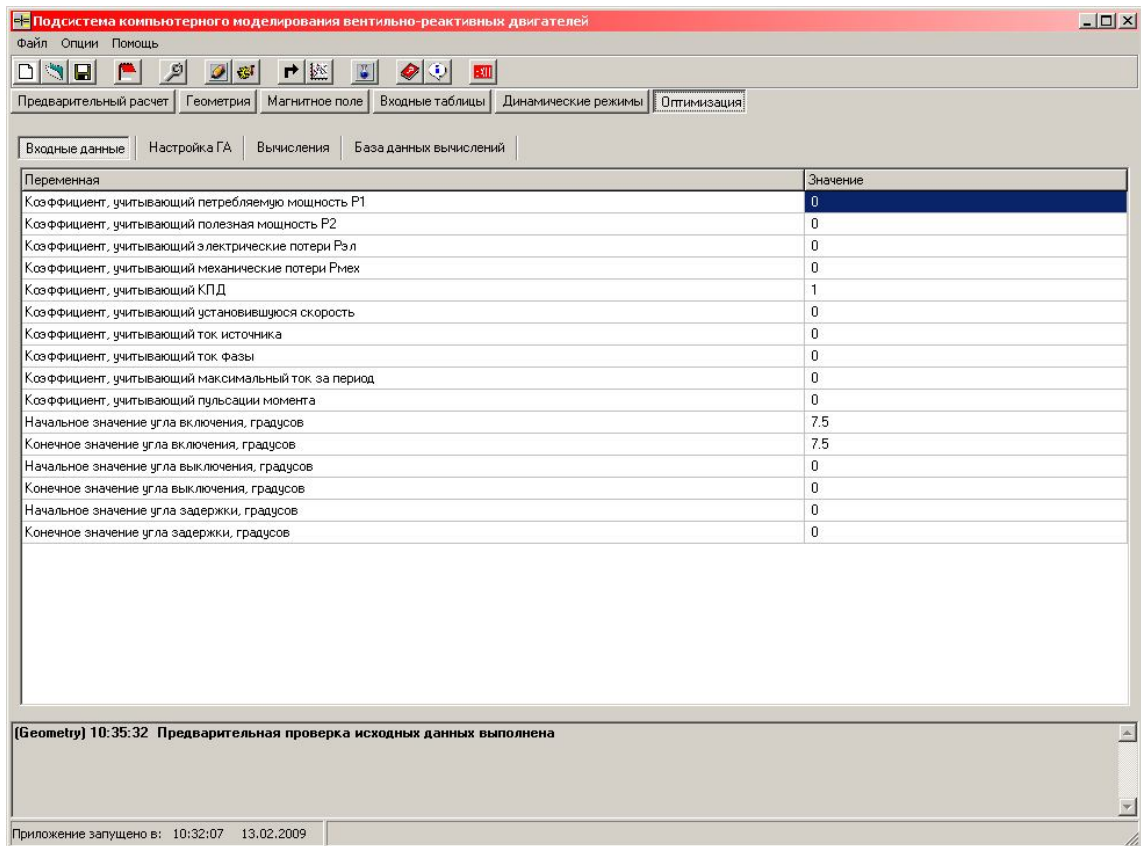


Рисунок 1.7 – Подсистема оптимизации

На рис. 1.6. показано главное окно – окно ввода исходных данных. На рис. 1.8 показано окно вывода результатов предварительно расчета для подсистемы расчета динамики и квазиустановившегося режима. В этом же окне показана принципиальная схема моделируемой системы управления для одной фазы.

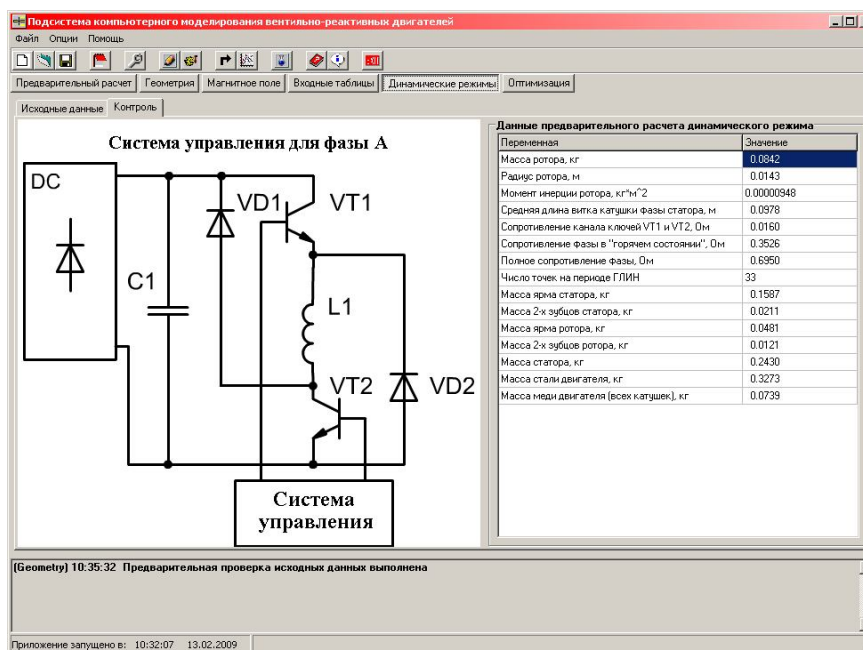


Рисунок 1.8 – Окно вывода результатов предварительно расчета для подсистемы расчета динамики

Задав исходные данные и загрузив таблицы момента и потокосцепления от тока в катушках статора и положения ротора (выполняется в форме, показанной на рис. 1.5) можно выполнить расчет (нажать кнопку на панели быстрого запуска).

В зависимости от исходных данных и имеющейся в распоряжении ресурсов процессора изменяется и время расчета. Для отображения хода выполнения расчета используется форма показанная на рис. 1.9.

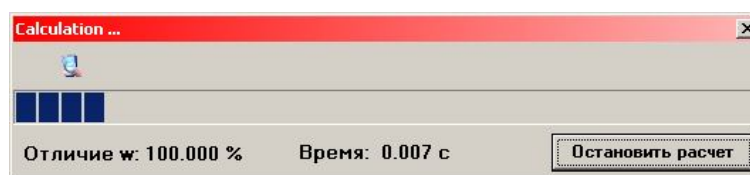


Рисунок 1.9 – Форма, отображающая ход расчета в подсистеме расчета динамики

После расчета становится доступной вкладка “Диаграммы”. На ней можно просмотреть мгновенные значения в виде диаграмм в функции от времени.

Для просмотра доступны следующие величины (все данные моделирования приведены для ВРД АИВЛ–1М):

- потокосцепление рис. 1.10,
- ток (рис. 1.11 – 1.12),
- напряжение (рис. 1.13),
- развиваемый момент (рис. 1.14 – 1.15),
- скорость и положение ротора относительно статора (рис. 1.16),
- ток от источника (рис. 1.17 – 1.18),
- мощность и потери (рис. 1.19),
- энергия (рис. 1.20),
- индукция (рис. 1.21 – 1.22),
- ЭДС (рис. 1.23).

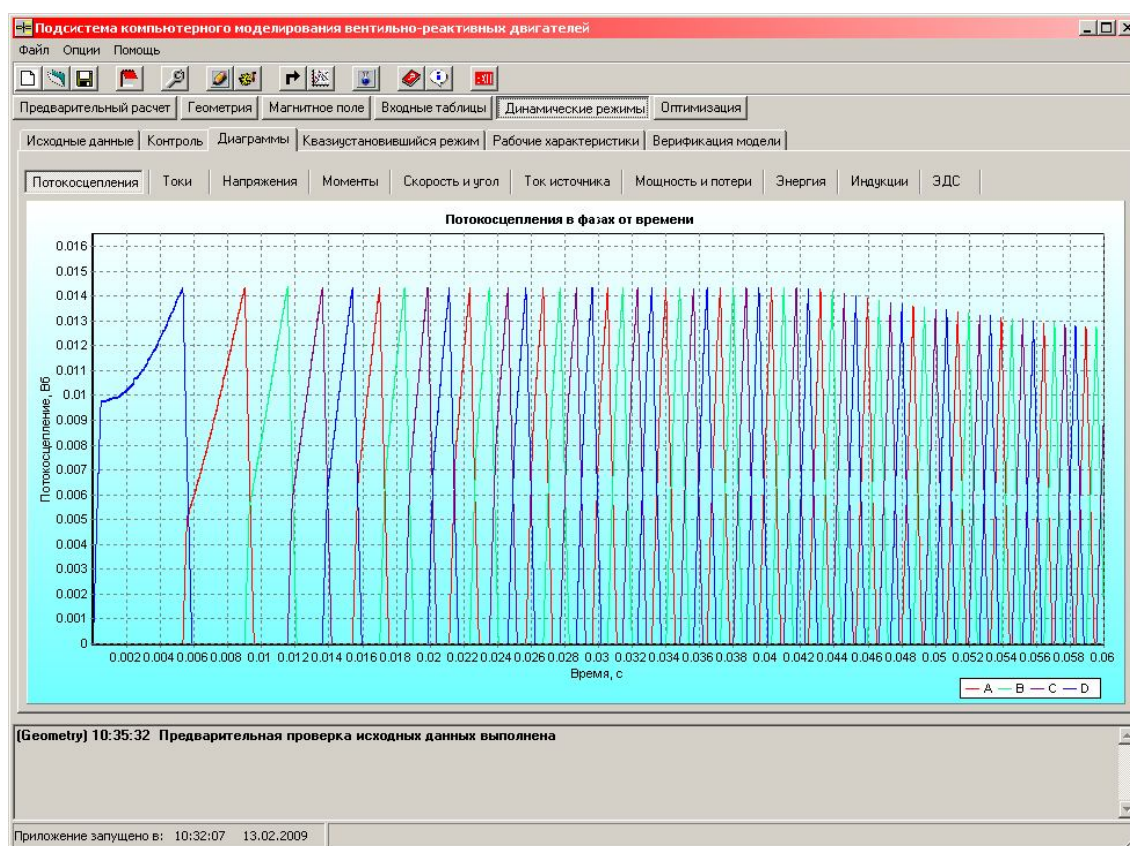


Рисунок 1.10 – Диаграммы потокосцепления в функции от времени



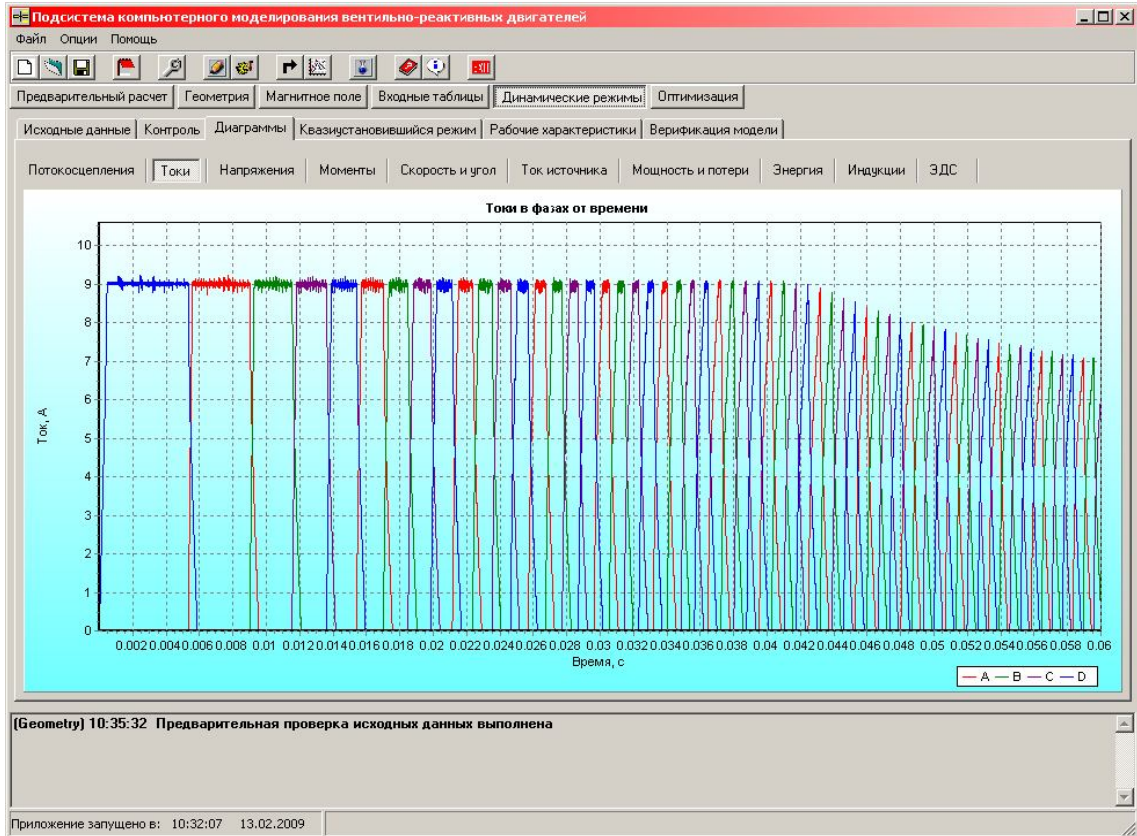


Рисунок 1.11 – Диаграммы тока в функции от времени

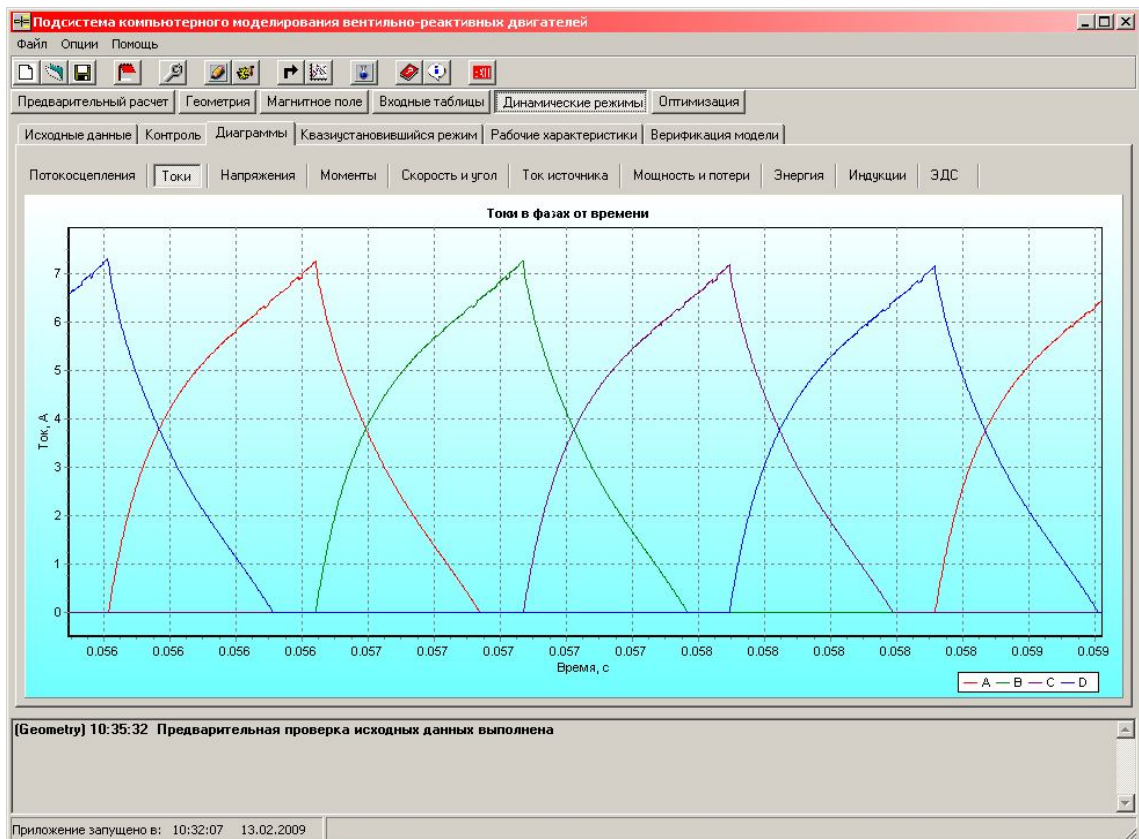


Рисунок 1.12 – Диаграммы тока в функции от времени (фрагмент)

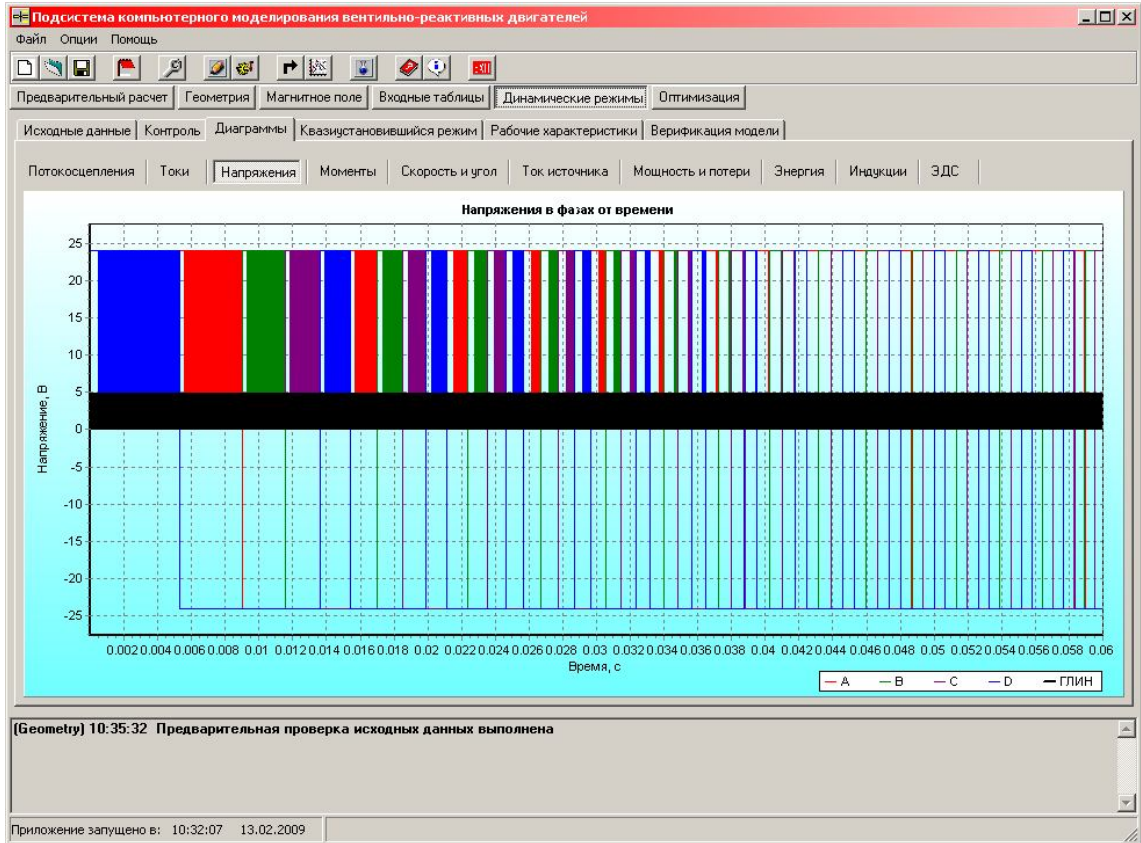


Рисунок 1.13 – Диаграммы напряжения в функции от времени

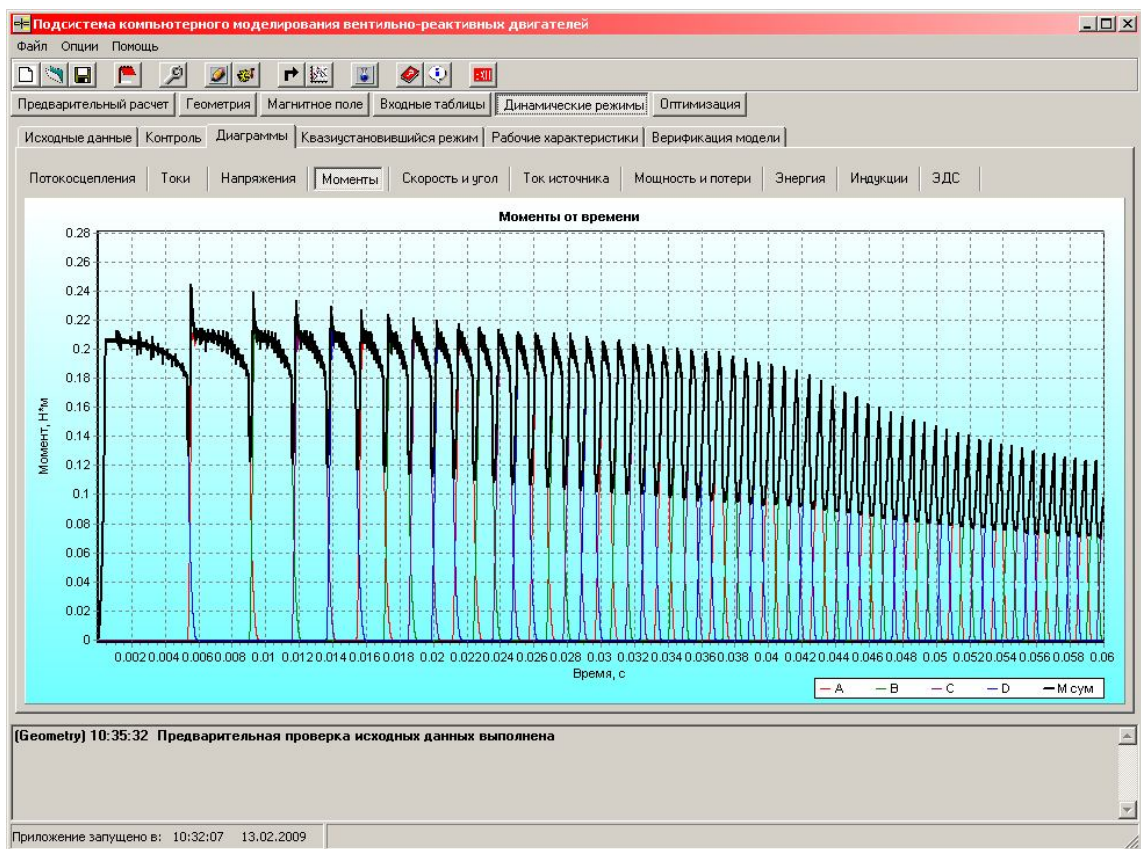


Рисунок 1.14 – Диаграммы моментов в функции от времени

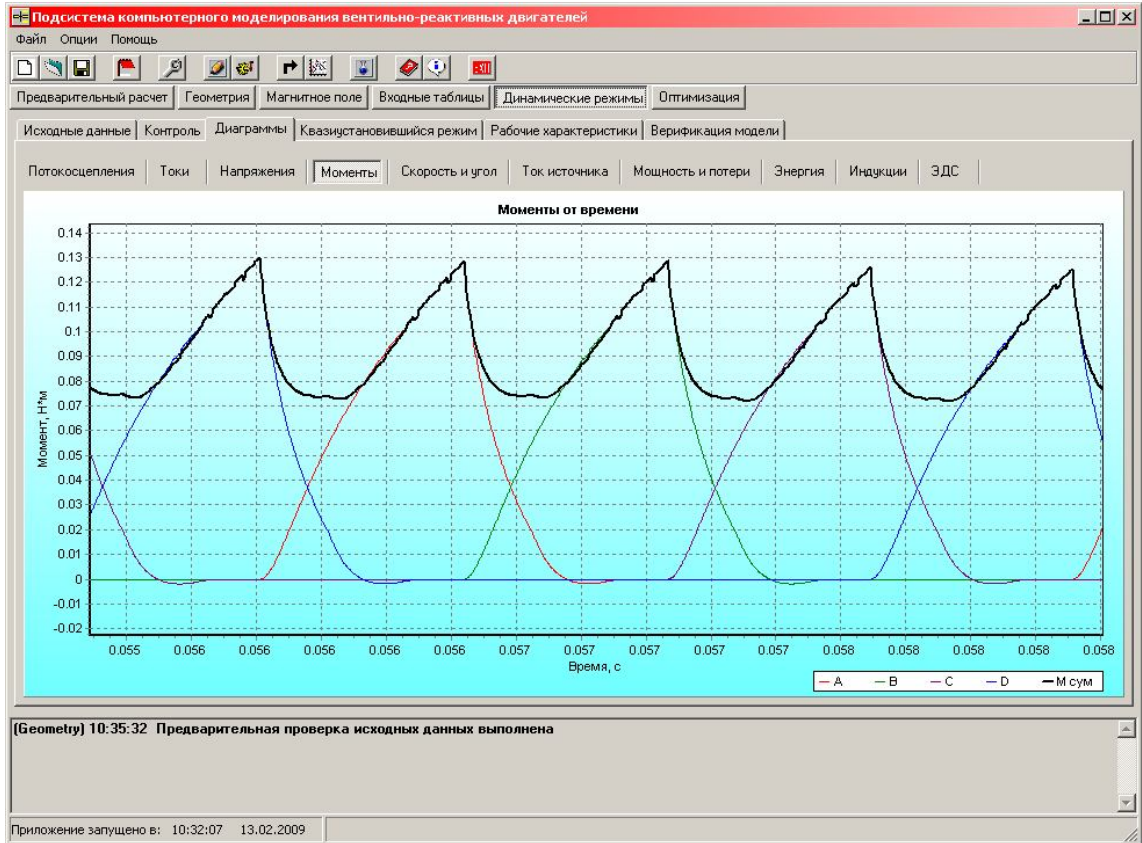


Рисунок 1.15 – Диаграммы моментов в функции от времени (фрагмент)

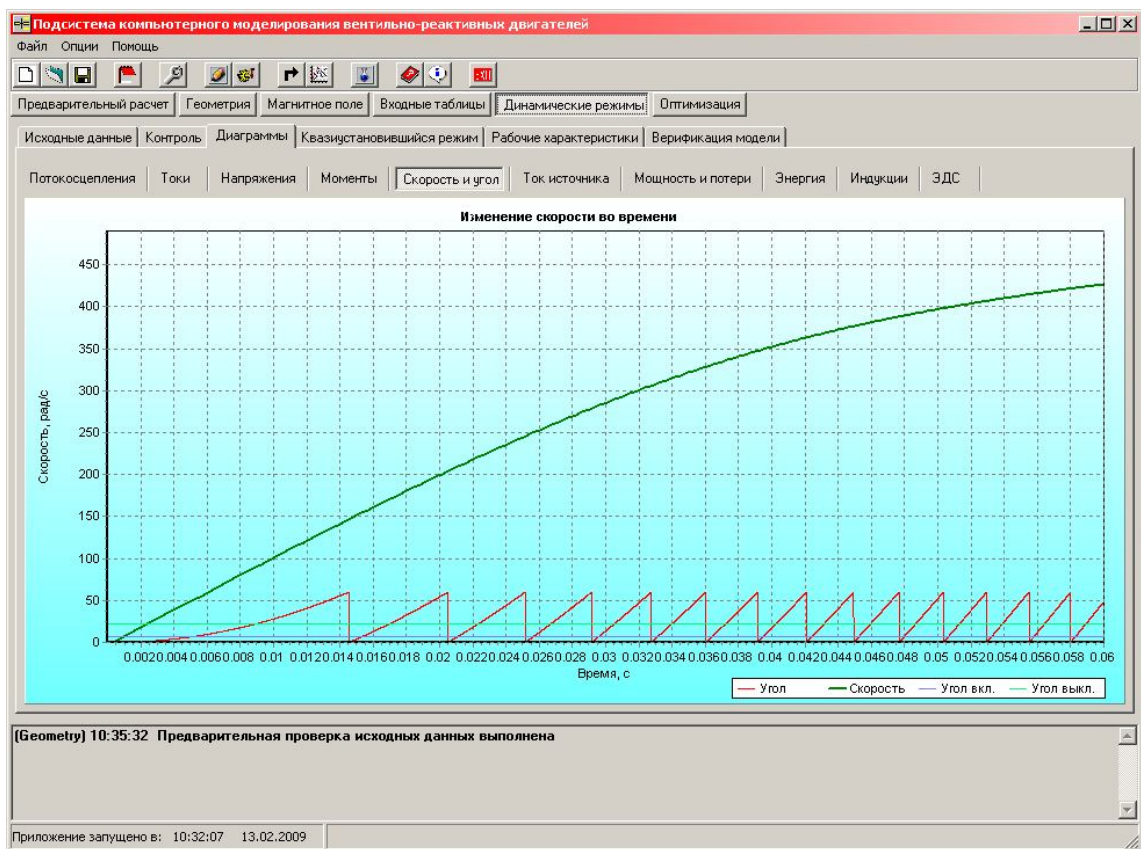


Рисунок 1.16 – Диаграммы скорости и положения в функции от времени

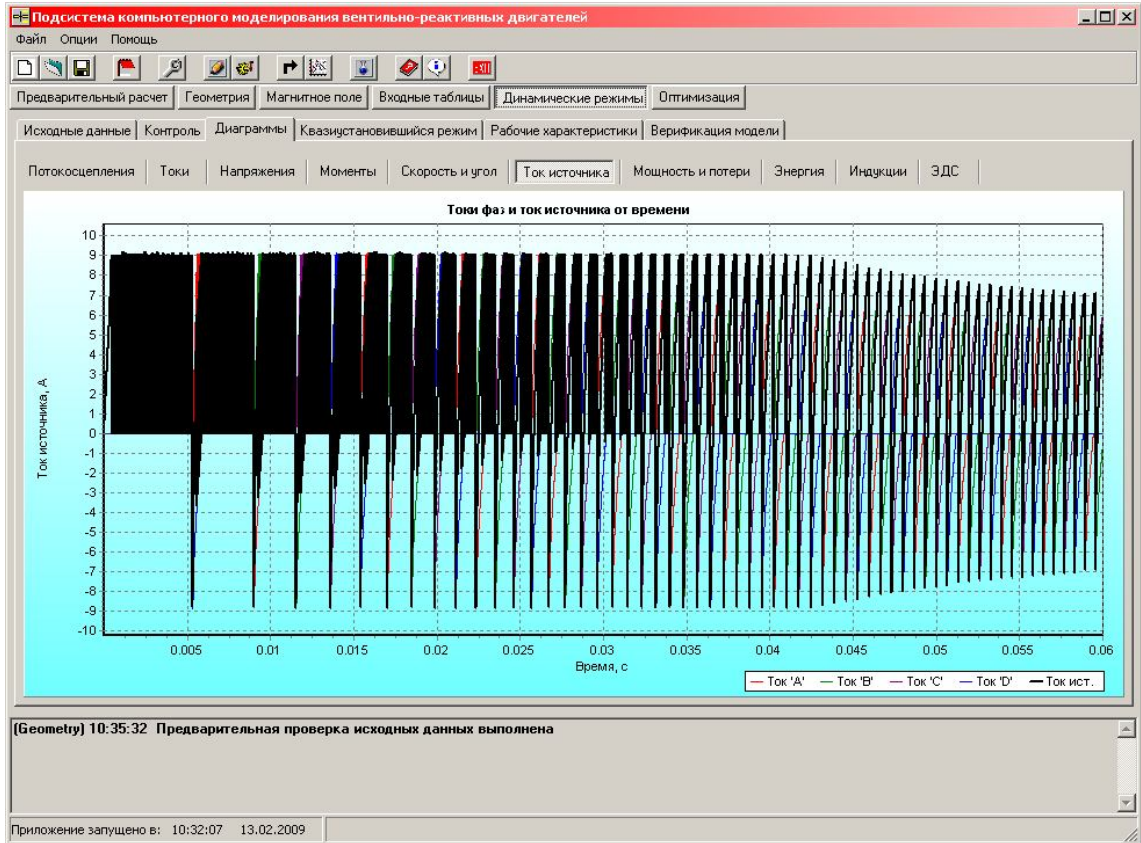


Рисунок 1.17 – Диаграммы тока источника в функции от времени

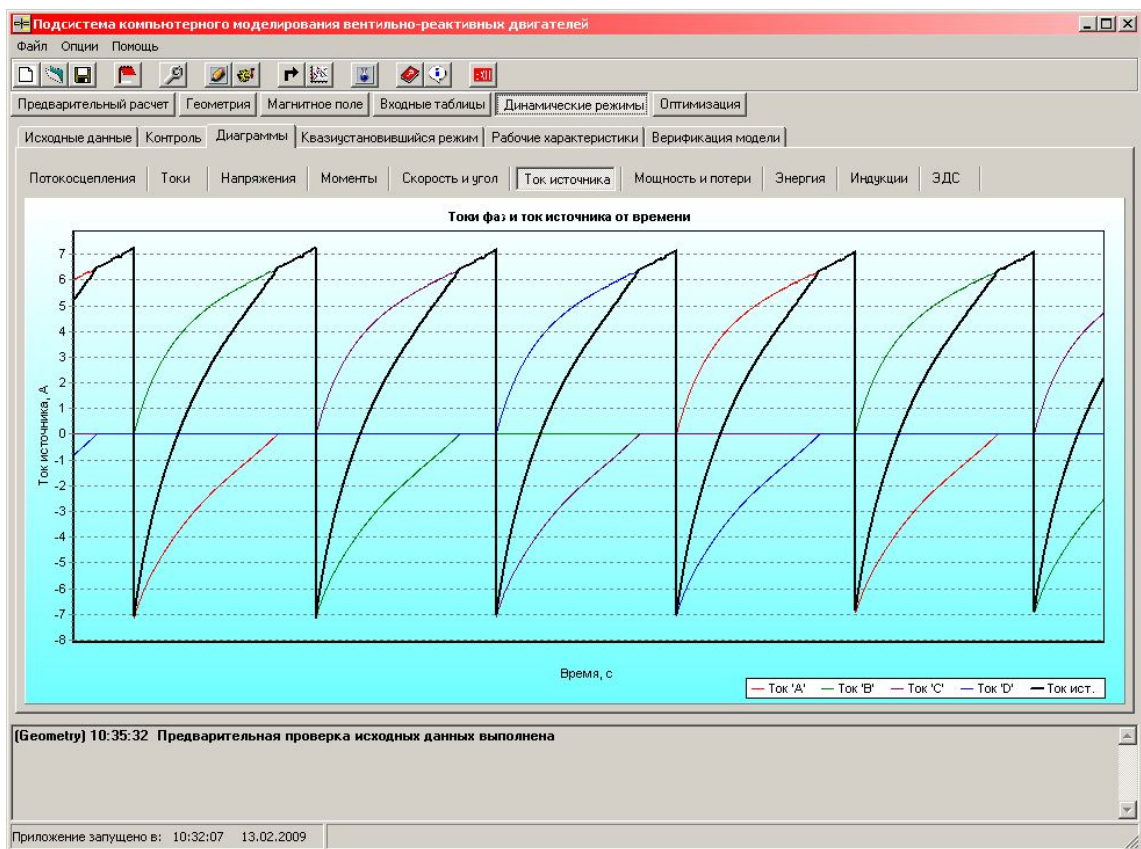


Рисунок 1.18 – Диаграммы тока источника в функции от времени (фрагмент)

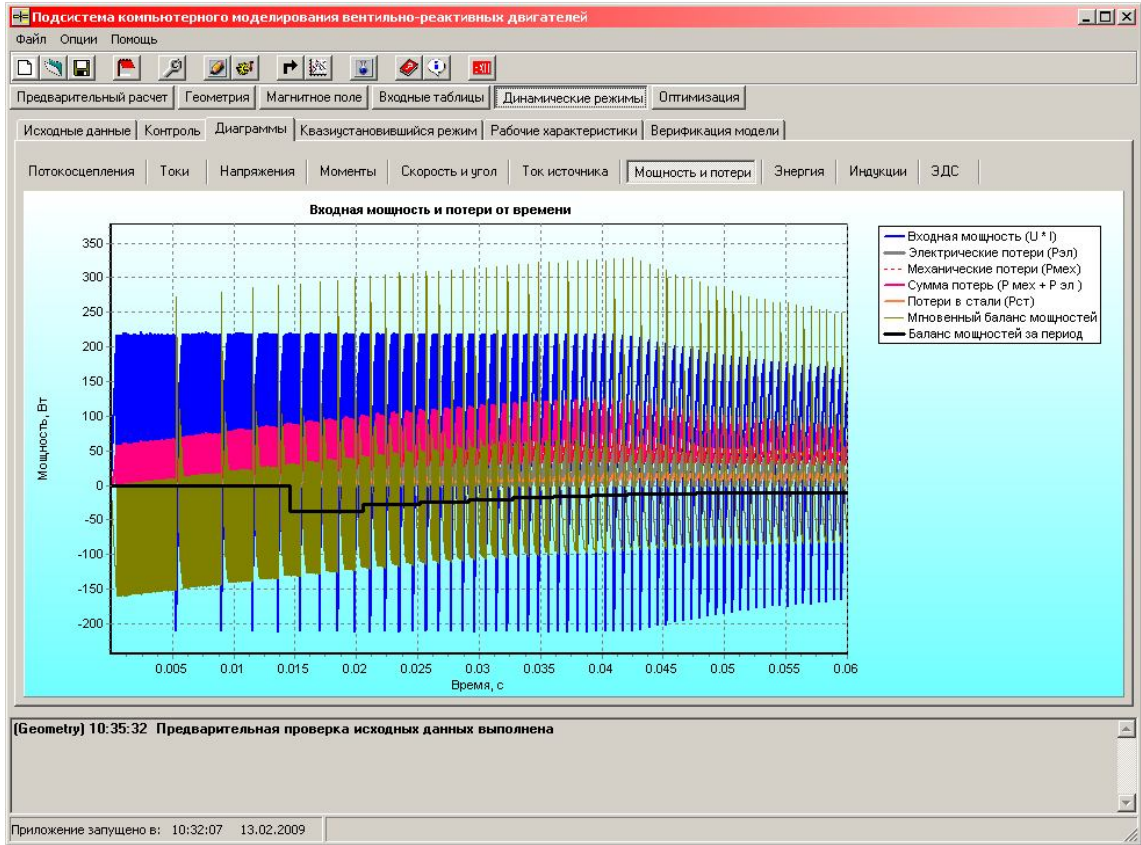


Рисунок 1.19 – Диаграммы мощностей и потерь в функции от времени

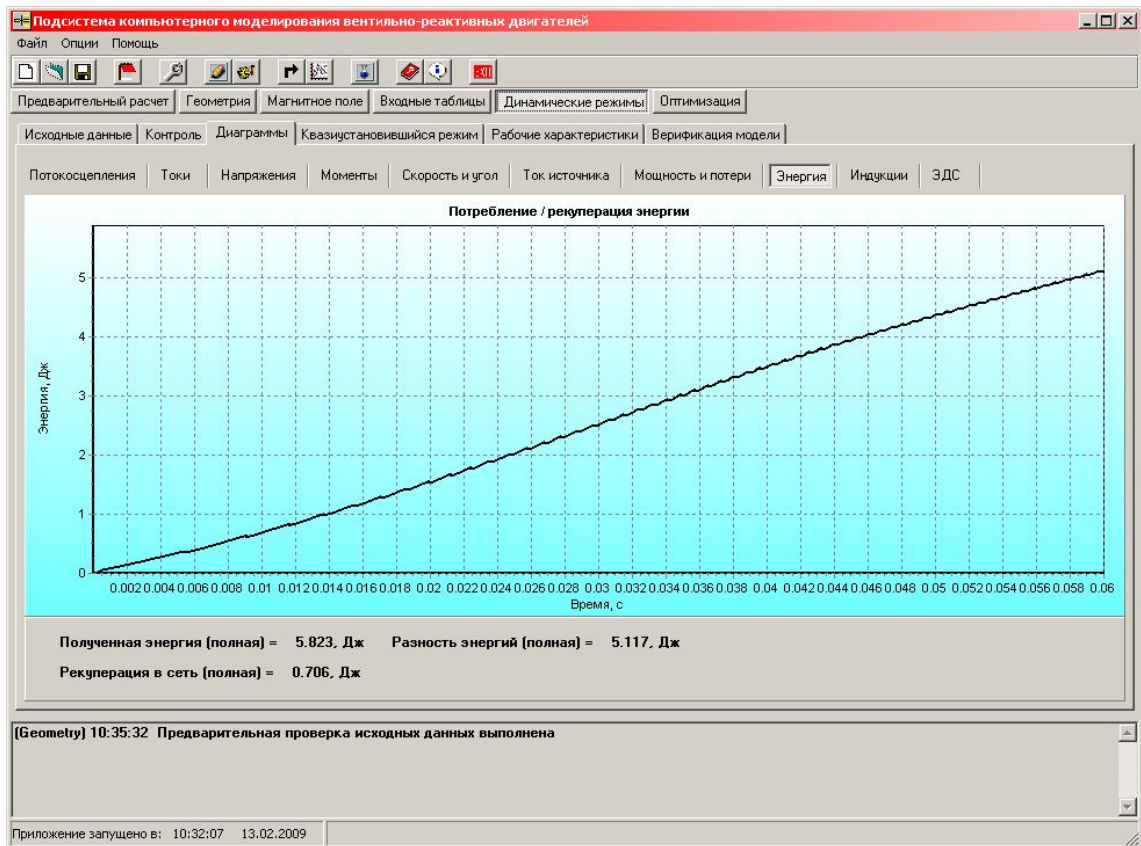


Рисунок 1.20 – Диаграммы энергий в функции от времени

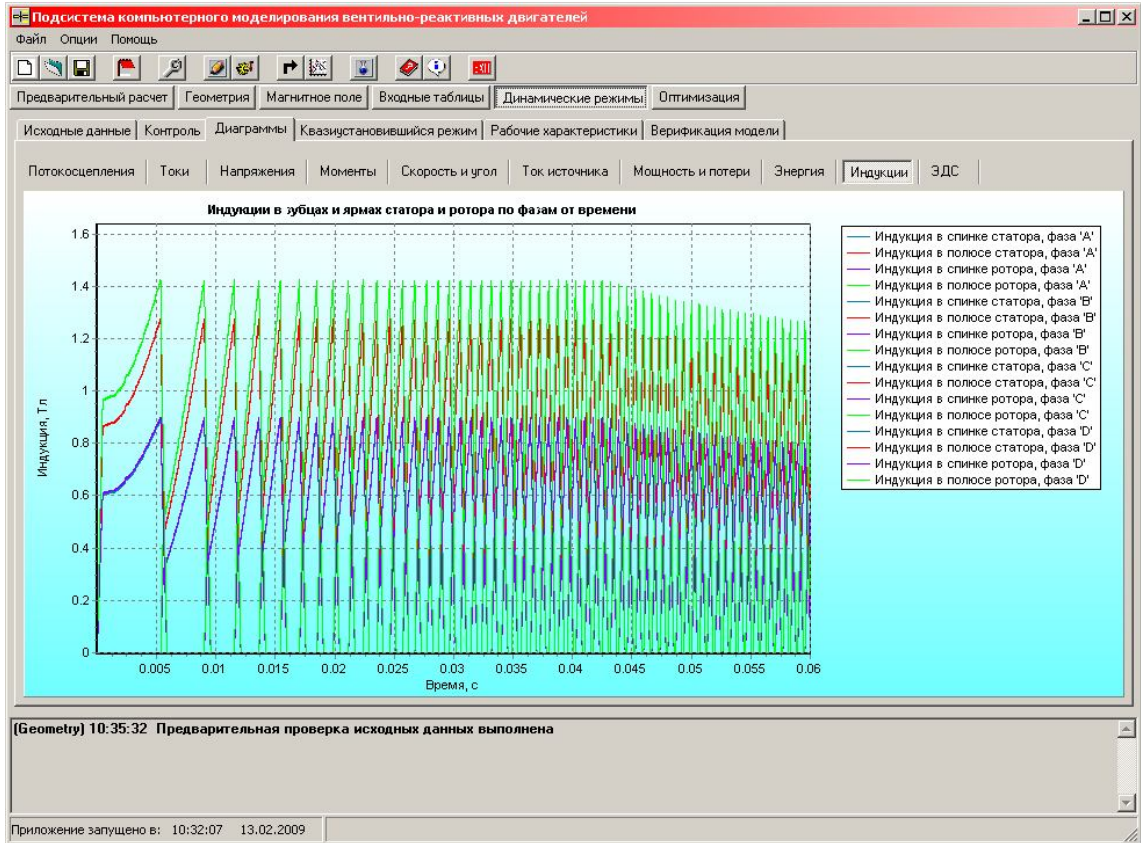


Рисунок 1.21 – Диаграммы индукции в функции от времени

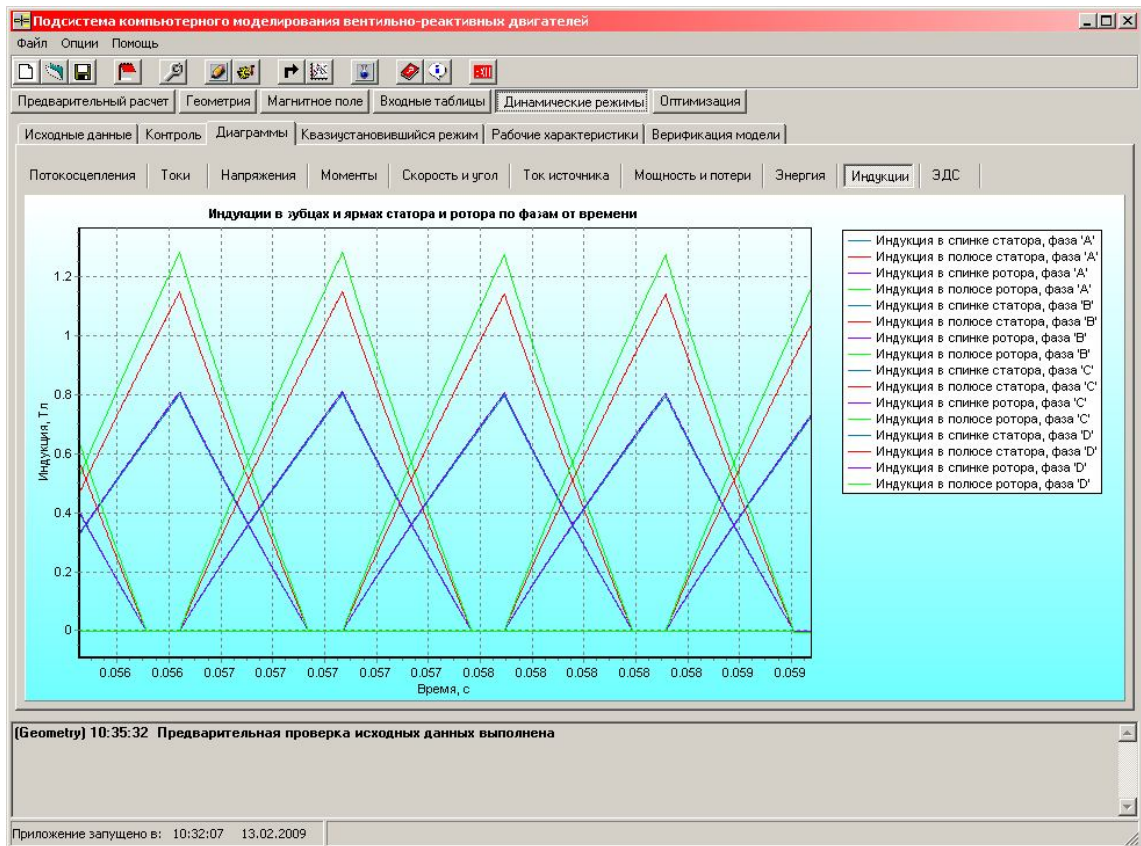


Рисунок 1.22 – Диаграммы индукции в функции от времени (фрагмент)

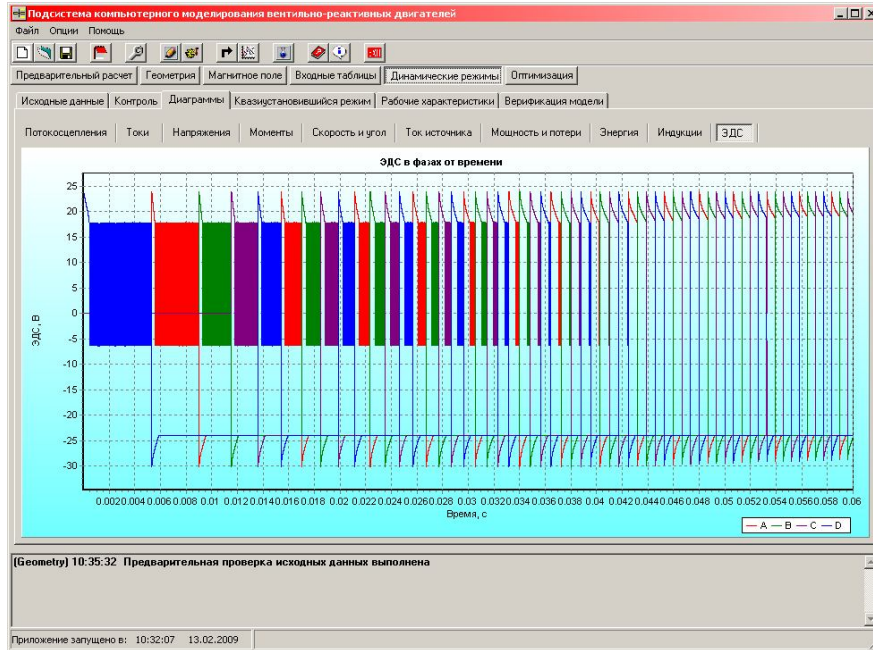


Рисунок 1.23 – Диаграммы ЭДС в функции от времени

В подсистеме расчета динамических и квазиустановившихся режимов также присутствуют следующие окна: результаты расчета квазиустановившегося режима, без учета влияния потерь в стали на скорость (рис. 1.24) и с учетом влияния потерь в стали на скорость (рис. 1.25).

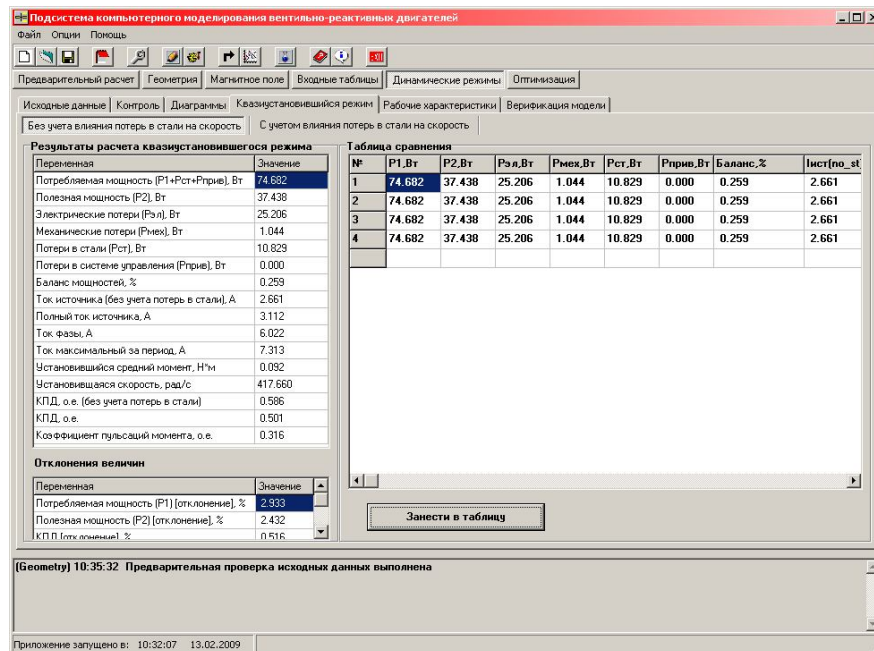


Рисунок 1.24 – Результаты расчета квазиустановившегося режима без учета влияния потерь в стали на скорость

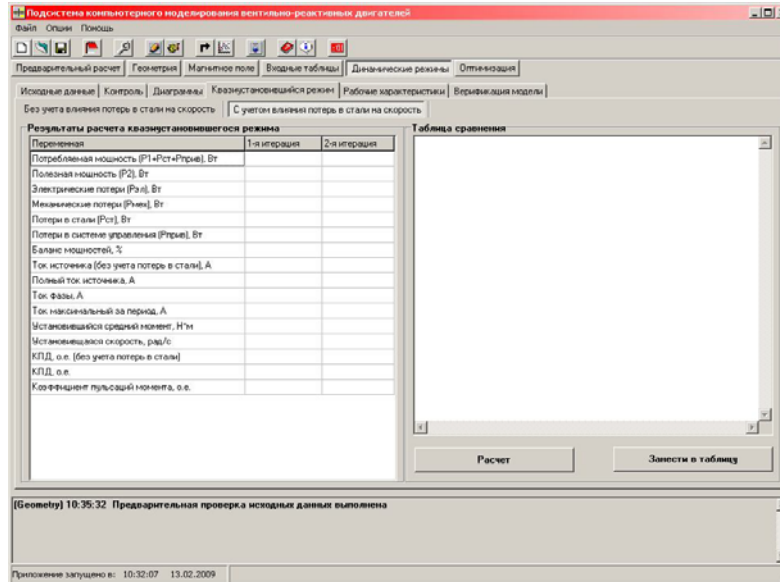


Рисунок 1.25 – Результаты расчета квазиустановившегося режима с учетом влияния потерь в стали на скорость

Процедура сравнения эксперимента и математического моделирования в системе SRM-CAD реализована на отдельной вкладке программы. Окно с этой вкладкой показано на рис. 1.27.

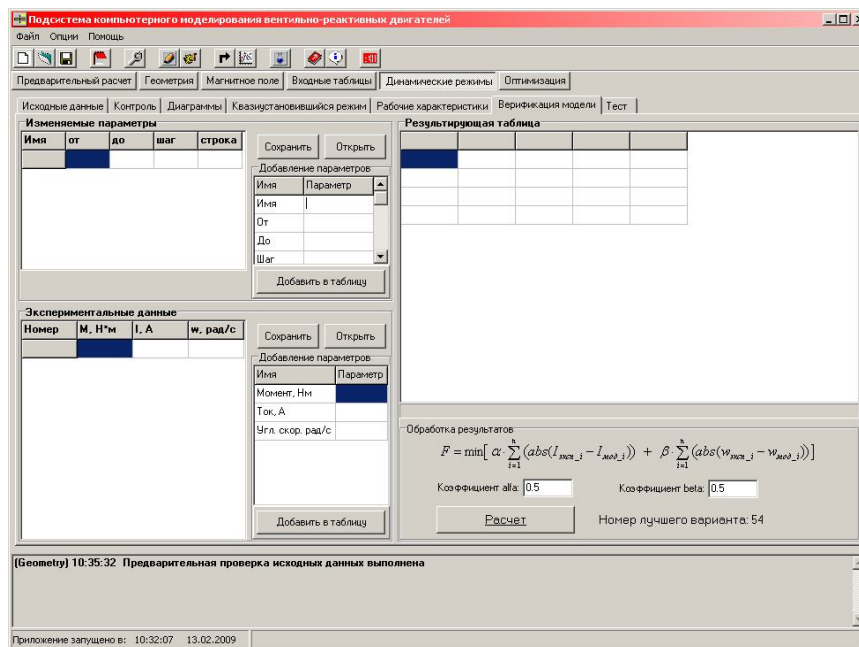


Рисунок 1.27 – Форма “Верификации модели”

В подсистеме расчета динамических и квазиустановившихся режимов предусмотрены 2-е формы для моделирования по данным эксперимента и для



автоматизированного тестирования. Вызов этих окон осуществляется из главного меню “Опции”. Наличие галочки напротив соответствующих пунктов означает отображение этих форм в программе SRM-CAD.

В подсистеме оптимизации реализовано 2-а алгоритма поиска: метод полного перебора (в зарубежной литературе называется как метод сеток) и метод генетического алгоритма. Управление настройкой и работой метода генетических алгоритмов осуществляется с представленных ниже форм.

Модуль оптимизации, кроме формы задания значений варьируемых переменных (см. выше рис. 1.7) содержит формы “Настройки ГА” (рис. 1.28), “Вычисления” (рис. 1.29) и “База данных вычислений”.

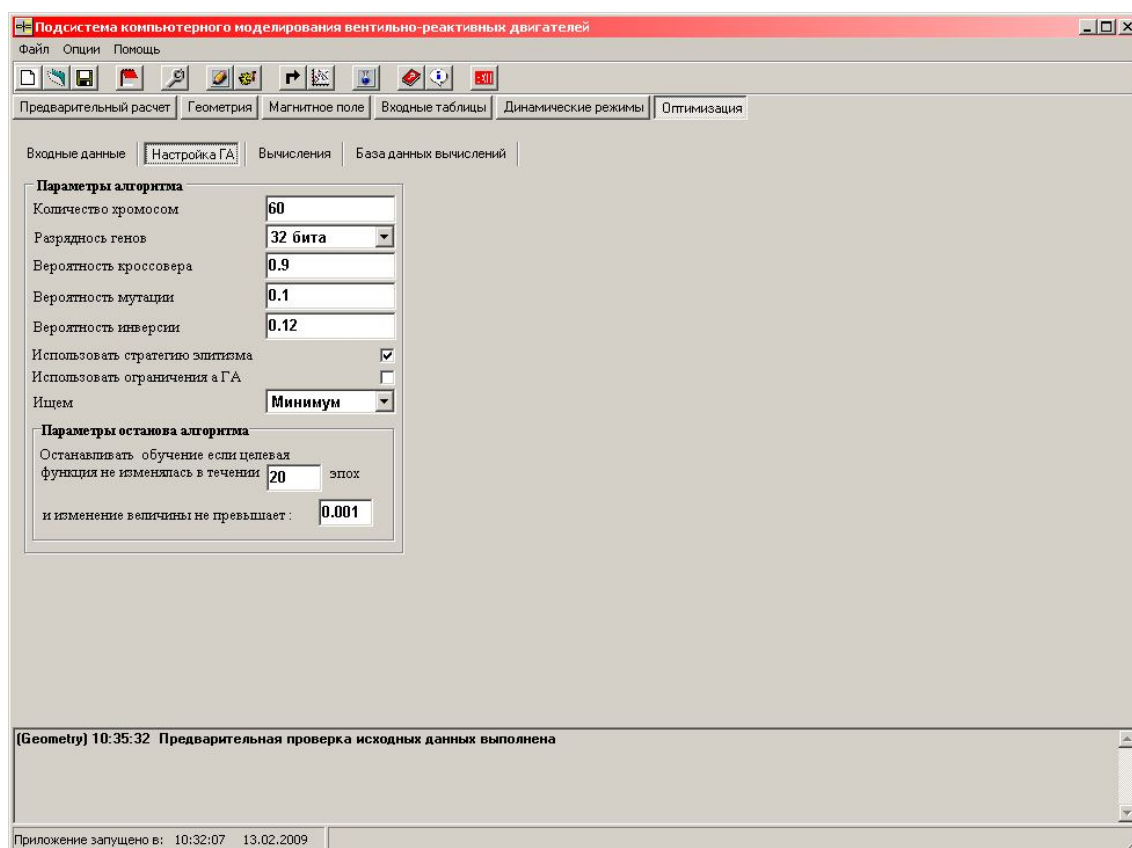


Рисунок 1.28 – Форма “Настройки ГА”

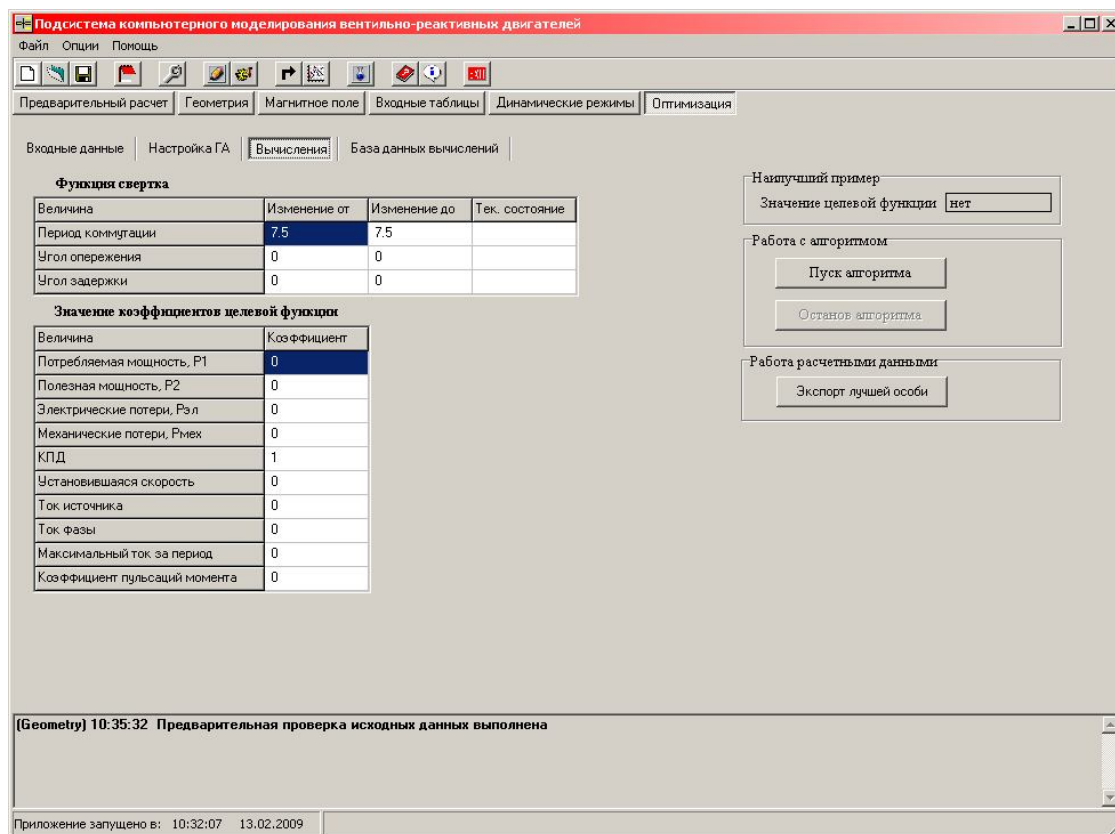


Рисунок 1.29 – Форма “Вычисления”

## 1.2. Диалог открытия/сохранения файлов

Для создания новых, открытия ранее созданных и сохранения файлов была разработана единая форма (рис. 1.30).

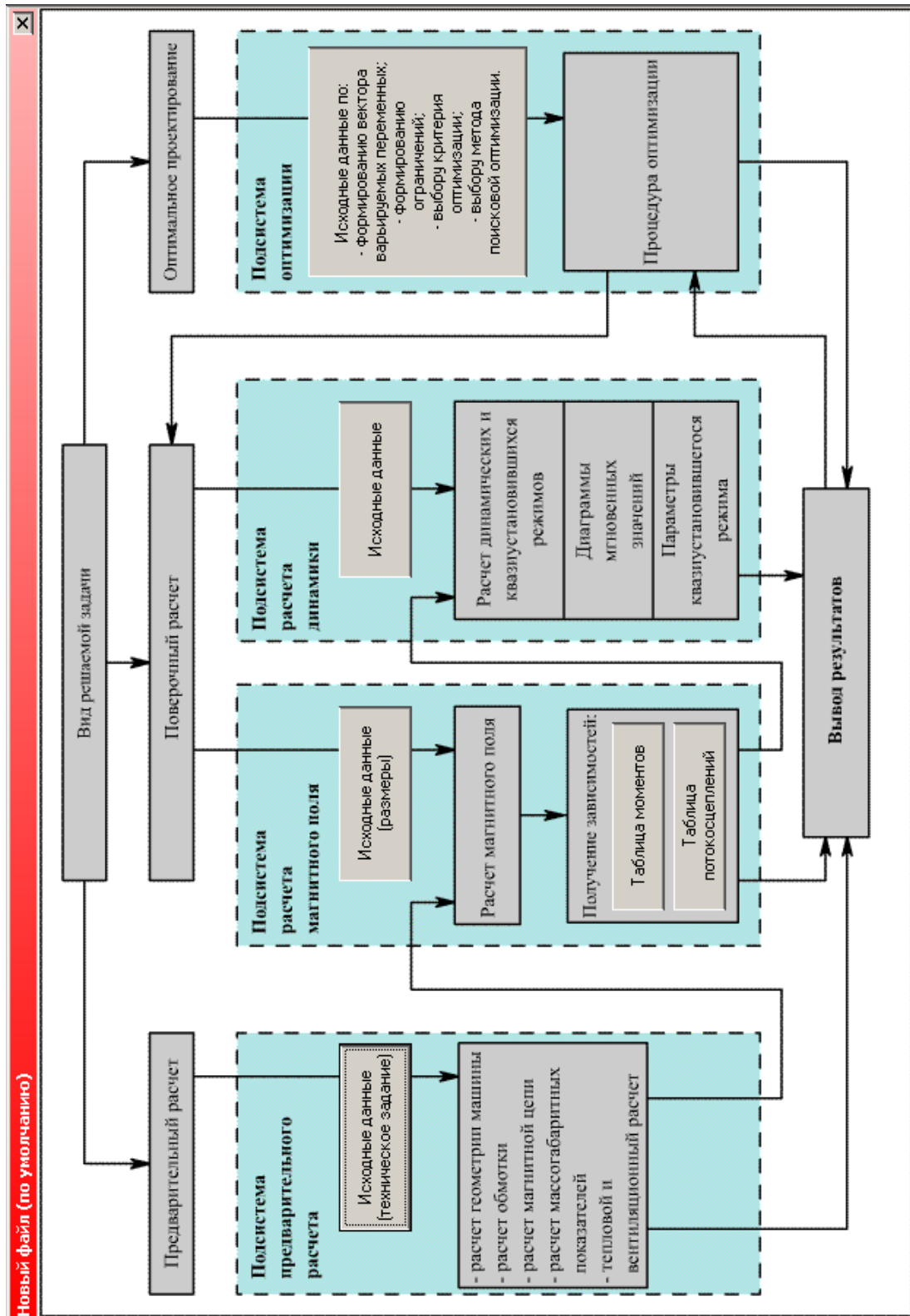


Рисунок 1.30 – Форма для создания, открытия и сохранения файлов

### 1.3. Окно “О программе”

Форма “О программе” представлена на рис. 1.31.



Рисунок 1.31 – Форма “О программе”

## 1.4. Окно “Помощь”

Форма “Помощь” представлена на рис. 1.32.



Рисунок 1.32 – Форма “Помощь”

## 2. Подсистема параметризации геометрии

Существует три подхода к созданию параметризованной геометрической модели изделия:

- параметрическое конструирование (parametric/variational - associative design)
- ассоциативная геометрия (associative geometry)
- объектно-ориентированное конструирование с использованием базовых операций добавления/удаления материала (feature-based modeling)

В данной работе реализовано параметрическое конструирование с полным набором связей.

**Параметрическое конструирование**, как методология автоматизированной разработки, является основой для быстрого ведения проектно-конструкторских работ. Что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства на едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели. Поэтому пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются также легко, как и изменения значений размеров на чертежах.

Параметрическое конструирование с полным набором связей или “жесткая” параметризация — интеллектуальное моделирование, где геометрия и конструкторские намерения заложены в самом определении модели. “Жесткая” параметризация — режим параметрического конструирования, при котором

известны все необходимые связи, однозначно определяя тем самым форму геометрической модели изделия. В этом случае изменение значения какого-либо параметра или переопределение связей влечет за собой автоматическое изменение геометрии модели и не требует от конструктора выполнения каких-либо действий по модификации геометрической модели.

Для режима “жесткой” параметризации характерно наличие случаев, когда при изменении параметров геометрической модели решение вообще не может быть найдено, так как часть параметров и установленные связи вступают в противоречие друг с другом. Другими словами, такая технология позволяет, при необходимости, управлять изменением формы конструкции в некоторых пределах, которые определяются интервалом взаимной непротиворечивости всей совокупности параметров и наложенных связей (По материалам <http://www.cosmos.com.ru/articles/param.html>).

## 2.1. Возможности подсистемы генерации геометрии

В основе подсистемы генерации геометрии лежит параметрическое конструирование ВРД. Внешний вид подсистемы представлен на рис 2.1.

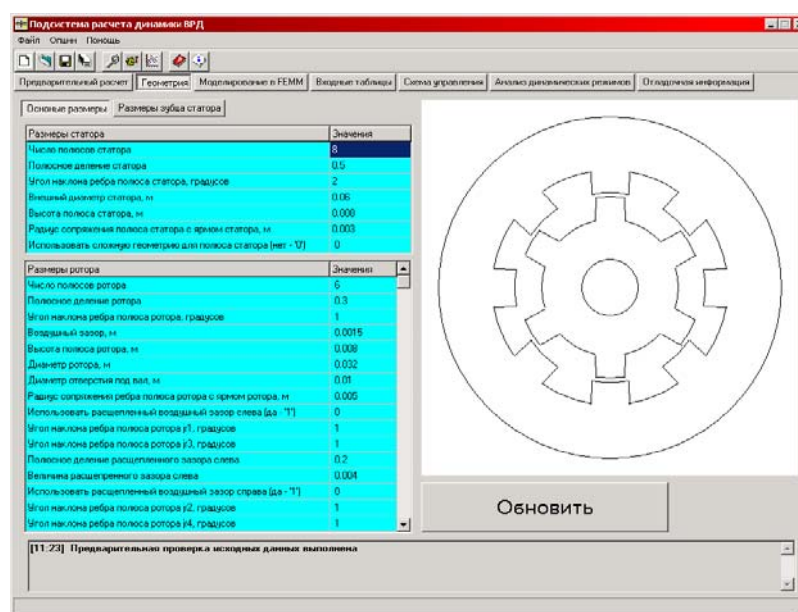


Рисунок 2.1 – Внешний вид подсистемы генерации геометрии

Подсистема интегрирована в программную оболочку SRM-CAD, которая позволяет осуществлять обмен данными между различными подсистемами. Например, созданную геометрию ВРД можно передать в программу численного расчета магнитного поля Femm. Данные, полученные при расчете магнитного поля, передаются в подсистему расчета динамических и квазиустановившихся режимов.

Подсистема позволяет генерировать различные варианты геометрии. Например, на рис. 2.2, представлен двухфазный ВРД с расщепленным воздушным зазором, число полюсов статора и ротора равно 2/2. На рисунках 2.3 – 2.5 изображены двухфазные ВРД конструкций 4/4, 6/6 и 8/8 соответственно.

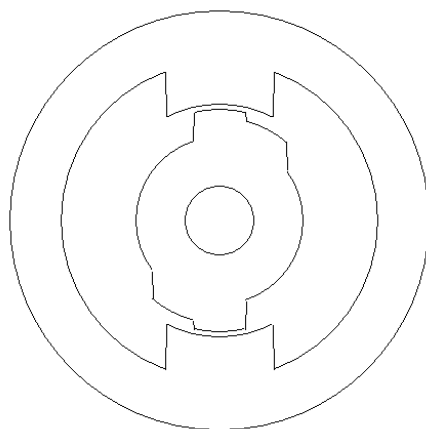


Рисунок 2.2 – Двухфазный ВРД 2/2 с расщепленным воздушным зазором

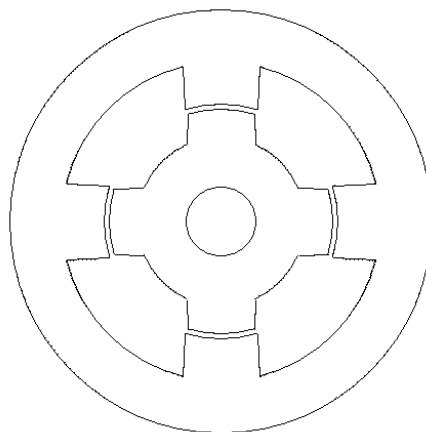


Рисунок 2.3 – Двухфазный ВРД конструкции 4/4



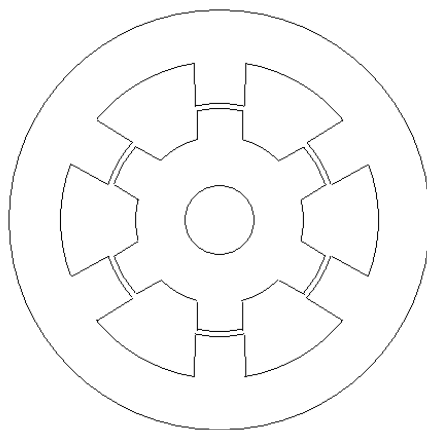


Рисунок 2.4 – Двухфазный ВРД конструкции 6/6

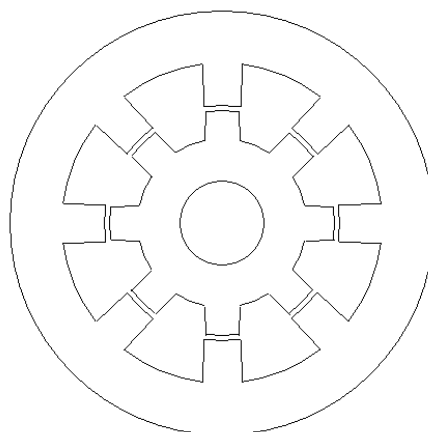


Рисунок 2.5 – Двухфазный ВРД конструкции 8/8

На рисунках 2.6 – 2.8 представлены трехфазные ВРД конструкции 6/2, 6/4 и 6/8 соответственно.

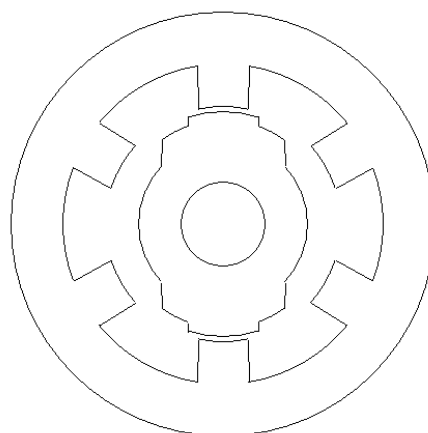


Рисунок 2.6 – Трехфазный ВРД 6/2 с расщепленным воздушным зазором

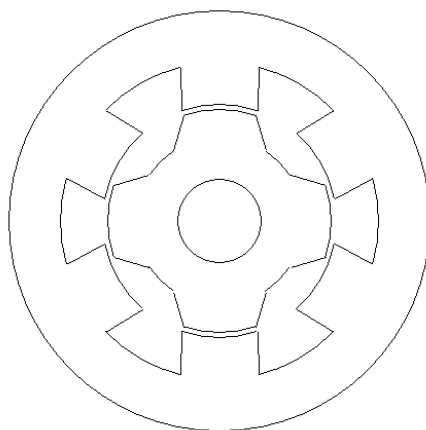


Рисунок 2.7 – Трехфазный ВРД конструкции 6/4

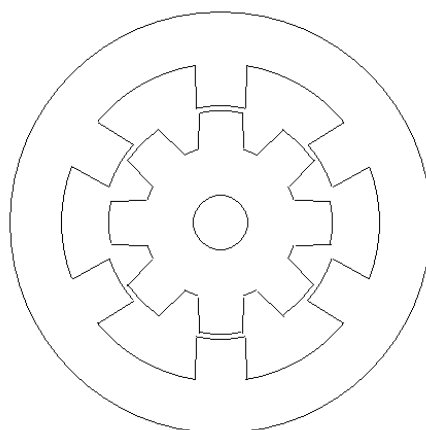


Рисунок 2.8 – Трехфазный ВРД конструкции 6/8

На рисунках 2.9 и 2.10 представлены четырехфазные ВРД конструкции 8/6 и 24/18 соответственно.

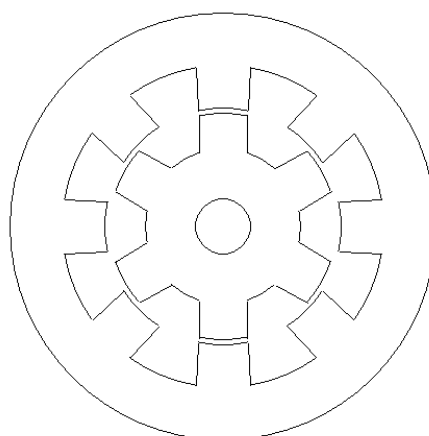


Рисунок 2.9 – Четырехфазный ВРД конструкции 8/6

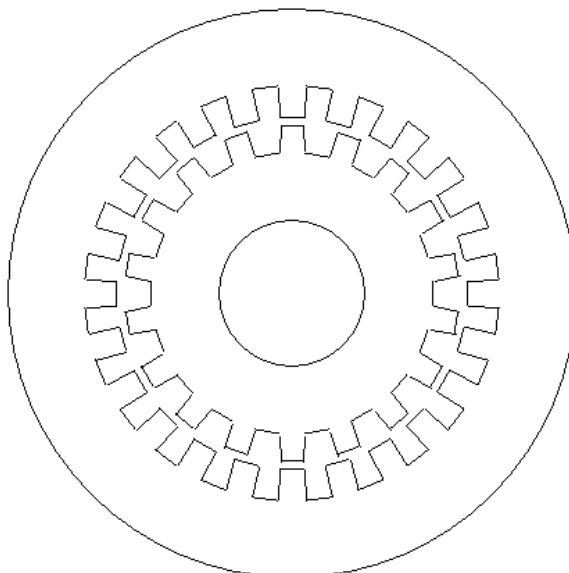


Рисунок 2.10– Четырехфазный ВРД конструкции 24/18

## 2.2. Внесение исходных данных

Исходными данными для подсистемы являются геометрические размеры ВРД. Занесение данных разделено на две таблицы: исходные данные размеров ротора и статора (рис. 2.11). Предварительные размеры ВРД можно получить в подсистеме предварительного расчета.

Перед описанием исходных данных, необходимо отметить, что ВРД при построении геометрии делится на правую и левую части, иллюстрация приведена на рис. 2.12.

Рассмотрим внесение всех исходных данных по порядку:

1. *Число полюсов ротора/статора.* Необходимо задавать только целые значения.
2. *Полюсное деление ротора/статора.* Задается в относительных величинах. Например, при числе полюсов ротора 4 и полюсном делении 0.5, полюс ротора в угловых величинах будет занимать 45 градусов.

3. Угол наклона ребра ротора, градусов. Угол определяется как отклонение от вертикальной линии проходящей через край полюса. Угол может принимать отрицательные значения (это касается всех углов, определяющих наклоны стенок полюсов). Данный угол обозначен как *Gama* на рисунке 2.13. Если используются расщепленные воздушные зазоры, то углы наклона ребер полюса ротора определяются по рисунку 2.14. При использовании расщепленного воздушного зазора только слева, или справа, данный угол определяет наклон ребра только с той стороны, где нет расщепленного воздушного зазора. Подобный пример приведен на рисунке 2.15, где один расщепленный зазор находится слева

Размеры ротора	Значения
Число полюсов ротора	8
Полюсное деление ротора	0.3
Угол наклона ребра полюса ротора, градусов	1
Воздушный зазор, м	0.0015
Высота полюса ротора, м	0.008
Диаметр ротора, м	0.032
Диаметр отверстия под вал, м	0.01
Радиус сопряжения ребра полюса ротора с ярмом ротора, м	0.005
Использовать расщепленный воздушный зазор слева (да - '1')	0
Угол наклона ребра полюса ротора $\beta_1$ , градусов	1
Угол наклона ребра полюса ротора $\beta_3$ , градусов	1
Полюсное деление расщепленного зазора слева	0.2
Величина расщепленного зазора слева	0.004
Использовать расщепленный воздушный зазор справа (да - '1')	0
Угол наклона ребра полюса ротора $\beta_2$ , градусов	1
Угол наклона ребра полюса ротора $\beta_4$ , градусов	1
Полюсное деление расщепленного зазора справа	0.2
Величина расщепленного зазора справа	0.004

а)

Размеры статора	Значения
Число полюсов статора	8
Полюсное деление статора	0.5
Угол наклона ребра полюса статора, градусов	2
Внешний диаметр статора, м	0.06
Высота полюса статора, м	0.008
Радиус сопряжения полюса статора с ярмом статора, м	0.003
Использовать сложную геометрию для полюса статора (нет - '0')	0

б)

Рисунок 2.11 – Исходные данные

а) размеры ротора; б) размеры статора

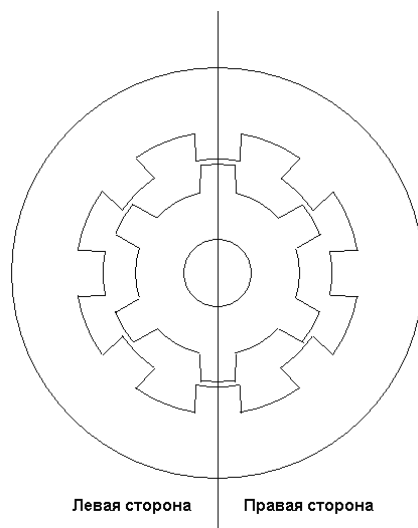


Рисунок 2.12 – Деление на правую и левую части геометрии ВРД

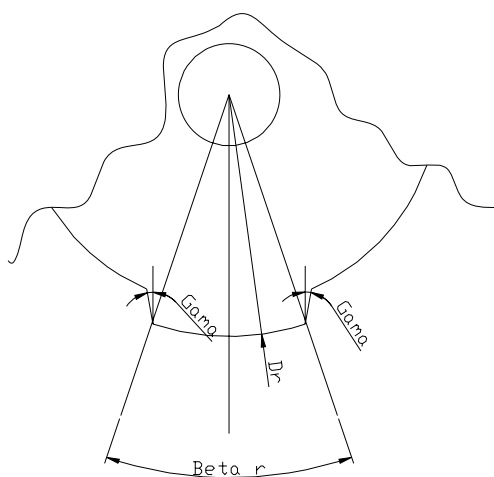


Рисунок 2.13 – Размеры ротора

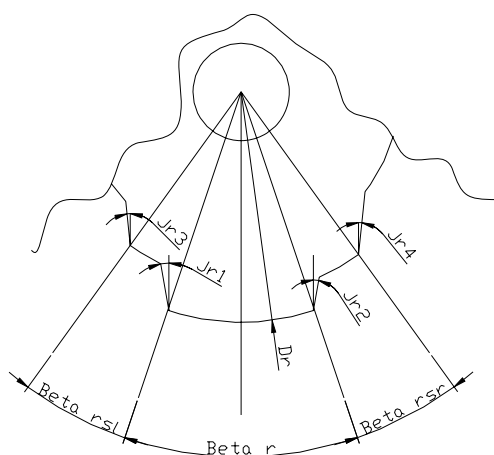


Рисунок 2.14 – Размеры ротора при наличии  
двух расщепленных воздушных зазоров

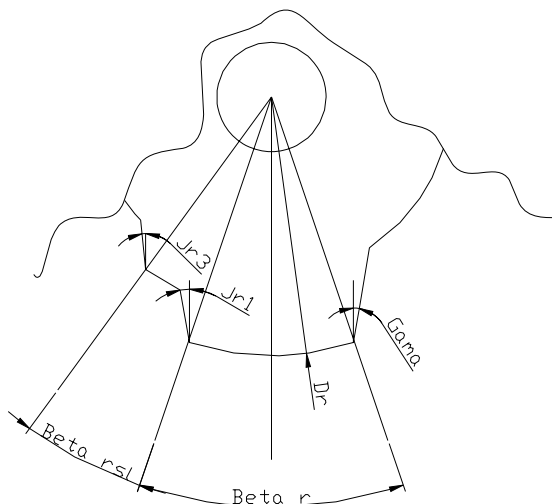


Рисунок 2.15 – Размеры ротора при одном расщепленном воздушном зазоре слева

4. *Воздушный зазор, м. См. рисунок 2.16, размер Delta*
5. *Высота полюса ротора, м. См. рисунок 2.17, размер hzr.*
6. *Диаметр ротора, м. См. рисунок 2.16, размер Dr.*
7. *Диаметр отверстия под вал, м. См. рисунок 2.16, размер  $d_0$ .*
8. *Радиус сопряжения ребра полюса ротора с ярмом ротора, м. См. рисунок 2.18, размер Rr*

Размеры 4 – 8 это размеры в абсолютных единицах. При параметризации возможно наличие такой комбинации, когда решение не может быть найдено в принципе, так как часть параметров и установленные связи вступают в противоречие друг с другом. В этом случае необходимо исправить ошибку используя в качестве подсказок сообщения программы.

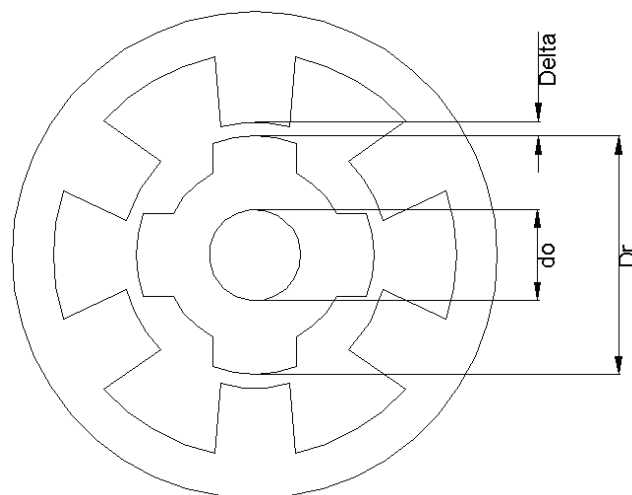


Рисунок 2.16 – Размеры: диаметр вала, диаметр ротора и воздушный зазор, для трехфазного ВРД конструкции 6/4

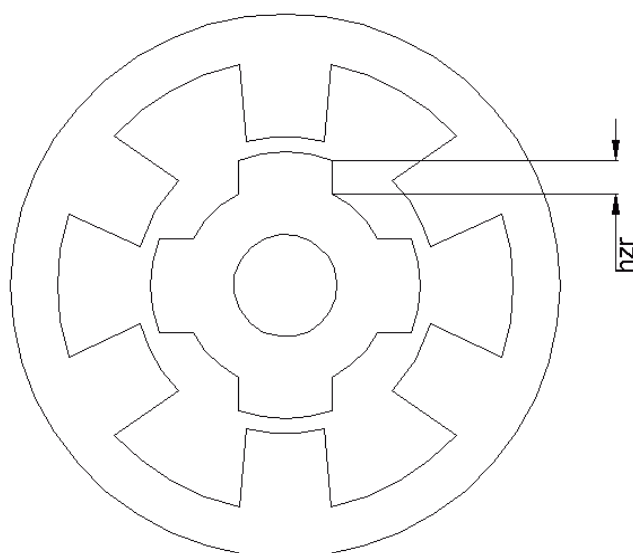


Рисунок 2.17 – Высота полюса ротора, для трехфазного ВРД конструкции 6/4

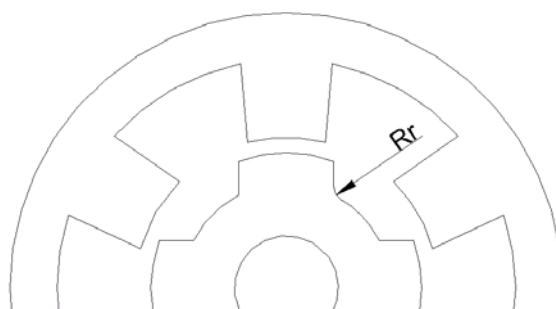


Рисунок 2.18 – Радиус сопряжения ребра полюса ротора с ярмом ротора, для трехфазного ВРД конструкции 6/4

9. *Использовать расщепленный воздушный зазор слева (да – ‘1’)*. Если необходимо на полюсе ротора слева (см. рисунок 2.12) выполнить расщепленный воздушный зазор, то необходимо ввести число ‘1’. В противном случае ввести ‘0’, при этом необходимо помнить про то, что угол наклона стенки полюса ротора определяется согласно пункту 3.
10. *Углы наклона ребер полюса ротора  $j_{r1}$  и  $j_{r3}$ , градусов*. Величины углов определяются по рисунку 2.14.
11. *Полюсное деление расщепленного воздушного зазора слева*. См. рисунок 2.14 размер Beta\_rsl.
12. *Величина расщепленного воздушного зазора слева, м*. Определяется как минимальное расстояние от края полюса статора до расщепленного слева полюса ротора.

Пункты 10 – 12 необходимо заполнять только в том случае, если используется расщепленный воздушный зазор слева.

13. *Использовать расщепленный воздушный зазор справа (да – ‘1’)*. Если необходимо на полюсе ротора справа выполнить расщепленный воздушный зазор, то необходимо ввести число ‘1’, если такой зазор не нужен – ввести ‘0’.
14. *Углы наклона ребер полюса ротора  $j_{r2}$  и  $j_{r4}$ , градусов*. Величины углов определяются соответственно рисунку 2.14.
15. *Полюсное деление расщепленного воздушного зазора справа*. См. рисунок 2.14 размер Beta\_rsr.
16. *Величина расщепленного воздушного зазора справа, м*. Определяется как минимальное расстояние от края полюса статора до расщепленного справа полюса ротора.

Пункты 14 – 16 необходимо заполнять только в том случае, если используется расщепленный воздушный зазор справа.



17. Угол наклона ребра полюса статора, градусов. См. рисунок 2.19, размер  $\text{Beta}_s$ . Угол может принимать отрицательные значения (как и все углы наклона стенок полюсов).

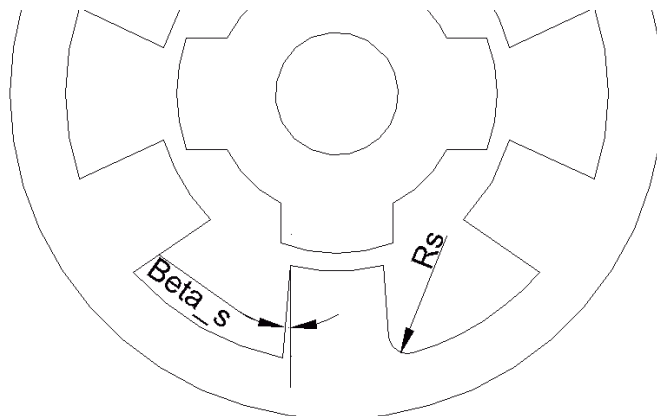


Рисунок 2.19 – Угол наклона ребра полюса статора и радиус сопряжения полюса статора с ярмом статора, для трехфазного ВРД конструкции 6/4

18. Внешний диаметр статора, м. См. рисунок 2.20, размер  $D_s$ .

19. Высота полюса статора, м. См. рисунок 2.20, размер  $h_{zs}$ .

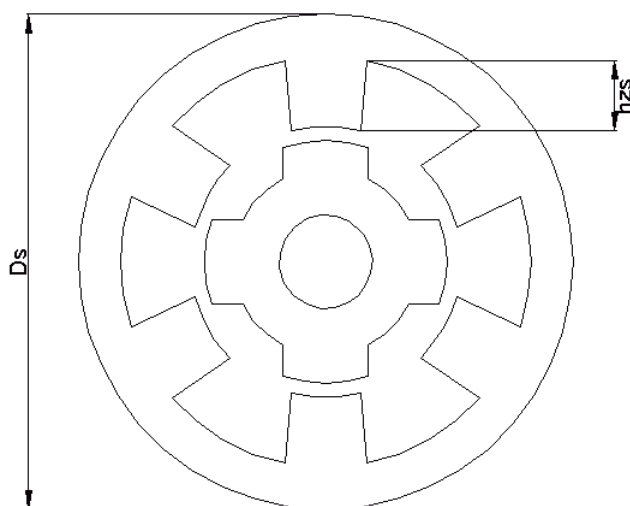


Рисунок 2.20 – Внешний диаметр статора и высота полюса ротора, для трехфазного ВРД конструкции 6/4

20. *Радиус сопряжения полюса статора с ярмом статора, м.* См. рисунок 2.19, размер Rs.

21. *Использовать сложную геометрию для полюса статора (нет – '0').* При необходимости использования сложной геометрии полюса статора, нужно выставить значение '1' и перейти на вкладку формирования геометрии полюса статора. По умолчанию, сложная геометрия полюса статора не используется, значение – '0'.

Если, после внесения всех геометрических данных, появляются сообщения о неверной геометрии, то следуя сообщениям необходимо откорректировать параметры ЭМП и его размеры. В разделе 2.4 текущего руководства приведены коды возможных ошибок и развернутые причины их возникновения.

### **2.3. Экспертная система проверки правильности исходных данных**

В ходе предварительных расчетов проходит проверка входных исходных данных. Для быстрой локализации ошибок служит система проверки, результатом работы которой служат сообщения о возникших ошибках и рекомендации для их устранения. Дополнительным источником информации служит данное руководство.

Для информирования пользователя имеется информационная панель располагающаяся в нижней части программы, рис. 2.21.



Рисунок 2.21 – Информационная панель в программе САПР ВРД

В программный комплекс SRM-CAD входят несколько подсистем, для каждой из них выделен определенный диапазон кодов ошибок. Дополнительно сообщается в какой подсистеме произошла ошибка. Соответствие номеров кодов ошибок подсистемам указано в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коды ошибок

№ п/п	Название подсистемы	Обозначение подсистемы	Номера кодов
1	Предварительный расчет	Predesign	151-200
2	Построение геометрии	Geometry	001-050
3	Взаимодействие с программой Femm 4.0	Femm	051-100
4	Динамические и квазиустановившиеся режимы	Dynamics	101-150
5	Тепловой расчет	Thermal design	201-250

Все сообщения имеют определенный формат: тип сообщения; от какой подсистемы получено сообщение; код ошибки; время когда произошла ошибка; сообщение и рекомендации по локализации ошибки. Например:

**ошибка (Dynamics): 102 [11:25:46] невозможно выполнить преобразование таблиц, нет таблицы моментов**

Если сообщение носит информационный характер (не влияет на работу программы), то в нем сообщается: от какой подсистемы получено сообщение; время сообщения и непосредственно сообщение. Например:

**(Geometry) [18:43:12] предварительная проверка исходных данных выполнена**

## 2.4 Коды ошибок подсистемы генерации геометрии

При параметризации модели ВРД бывают ситуации, когда по введенным исходным данным невозможно выполнить построение геометрии, в этом случае пользователь получает сообщения с кодом ошибки. По этому коду можно быстро исправить исходные данные.

Коды ошибок:

- *001. Полюсное деление статора больше 1.* Полюсное деление задается в относительных величинах, 1 – это максимальное значение.
- *002. Число полюсов статора больше 60.* В текущей версии программы установлено ограничение на максимальное число полюсов ротора – 60.
- *003. Слишком большой угол наклона ребра полюса статора.* Сообщение появляется, если угол наклона стенки (ребра) статора превышает 60 градусов (при проверке берется абсолютная величина угла).
- *004. Проверьте значение высоты полюса статора и внешнего диаметра статора.* Ошибка генерируется на основе проверки соотношения:  $2 \cdot h_{zs} > D_s$  (здесь и далее, если условие соблюдается, то генерируется ошибка).

Коды 001 – 004 соответствуют предварительной проверке размеров статора.

- *005. Число полюсов статора больше 300.* В текущей версии программы установлено ограничение на максимальное число полюсов статора – 300.
- *006. Полное полюсное деление ротора больше 1.* Полюсное деление задается в относительных величинах, 1 – это максимальное значение.
- *007. Проверьте диаметры статора и ротора.* Проверяется соотношение:  $D_R > D_S$ .

- 008. Проверьте следующие размеры: диаметр ротора, воздушный зазор, высота полюса статора и внешний диаметр статора. Проверяемое соотношение:  $D_R + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{ZS} > D_S$ .
- 009. Проверьте правильность размеров ротора. Проверяется соотношение:  $d_0 > D_R - 2 \cdot h_{ZR}$
- 010. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора. Угол наклона стенки (ребра) ротора превышает 60 градусов.
- 011. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора: Jr1. Угол наклона Jr1 стенки (ребра) ротора превышает 60 градусов.
- 012. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора: Jr3. Угол наклона Jr3 стенки (ребра) ротора превышает 60 градусов.
- 013. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора: Jr2. Угол наклона Jr2 стенки (ребра) ротора превышает 60 градусов.
- 014. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора: Jr4. Угол наклона Jr3 стенки (ребра) ротора превышает 60 градусов.

Коды ошибок 005 – 014 соответствуют предварительной проверке размеров ротора. Появление ошибок 011 – 014 возможно только при использовании расщепленных воздушных зазоров справа и слева.

- 015. Невозможно построение, уменьшите размеры полюсных дуг ротора.
- 016. Нет пересечения окружности с линией. Откорректируйте размеры. Данная ошибка возникает в функции вычисления точки пересечения окружности и прямой.
- 017. Большой расщепленный воздушный зазор слева. Проверяется соотношение:  $\delta_{SRL} > h_{ZR}$

- 018. Большой расщепленный воздушный зазор справа. Проверяется соотношение:  $\delta_{SRR} > h_{ZR}$
- 019. Невозможно построение, уменьшите размеры полюсной дуги статора.

### 3. Подсистема расчета динамических и квазиустановившихся режимов

#### Задание исходных данных

Все данные вводятся в системе СИ.

Ввод исходных данных для расчета динамических и квазиустановившихся режимов осуществляется в таблицу, из вкладки: “Анализ динамических режимов” (рис. 3.1).

#### Электромеханический преобразователь

##### Ввод геометрических размеров ЭМП ВРД.

1. *Число фаз ВРД.* Вносится число фаз рассматриваемого ЭМП ВРД. На практике применяются ЭМП с числом фаз от 1 до 5.

2. *Тип ВРД.* В зависимости от соотношения чисел полюсов статора и ротора определяем необходимый коэффициент по табл. 3.1:

3. *Диаметр ротора  $D_r$ , м*

4. *Внешний диаметр статора  $D_s$ , м*

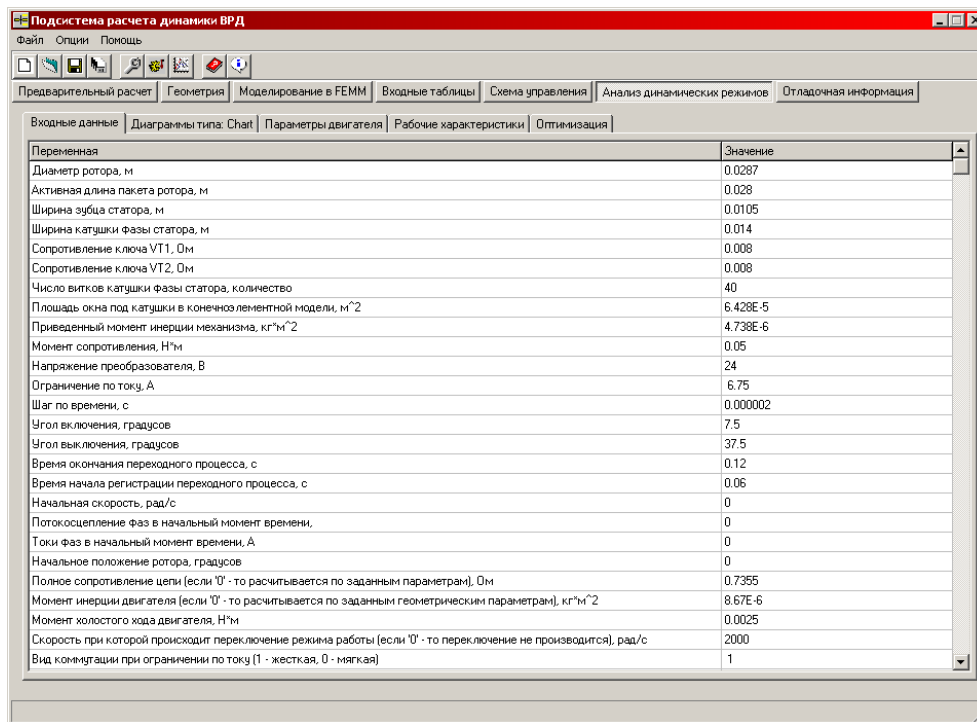


Рисунок 3.1 – Окно ввода данных для электромеханического преобразователя

Таблица 3.1 – Определение коэффициента “*Тип ВРД*”

Соотношение числа полюсов статора и ротора	Коэффициент
8/6 или 6/4	1
16/12 или 12/8	2
24/18 или 18/12	3
32/24 или 24/16	4

5. Воздушный зазор  $\delta$ , м

6. Диаметр вала  $d_0$ , м

Пункты 3 – 6 определяются в соответствии с рис. 3.2.

7. Активная длина пакета ротора  $l_\delta$ , м – активная длина магнитной системы (считается, что длины ротора и статора равны). Если имеется файл расчета в программе FEMM (здесь и далее приведено описание и даны рисунки из руководства пользователя для пакета FEMM версии 4), то данная величина определяется как глубина (Depth) в окне Problem Definition (рис. 3.3).

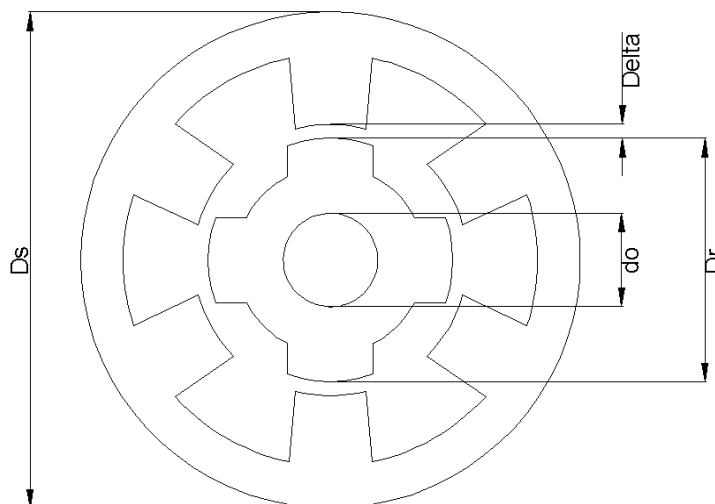


Рисунок 3.2

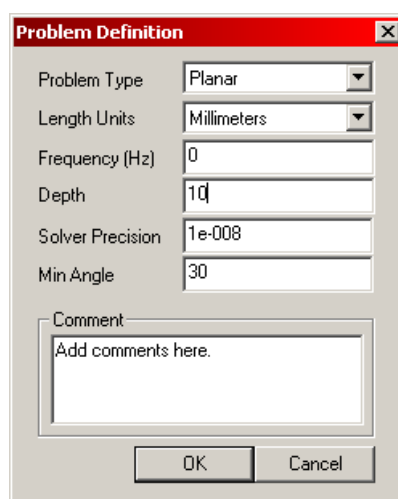


Рисунок 3.3 – Окно Problem Definition программы FEMM

8. Высота зубца статора  $h_{zs}$ , м
9. Ширина зубца статора  $b_{zs}$ , м
10. Высота зубца ротора  $h_{zr}$ , м
11. Ширина зубца ротора,  $b_{zr}$ , м

Пункты 8 и 10 определяются по рис. 3.4, пункты 9 и 11 определяются как среднее расстояние между стенками зубца (рис. 3.5).



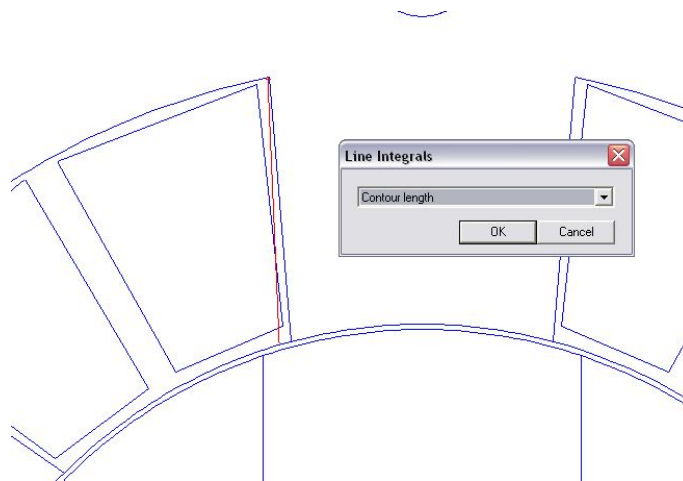


Рисунок 3.4 – Определение высоты зубца статора

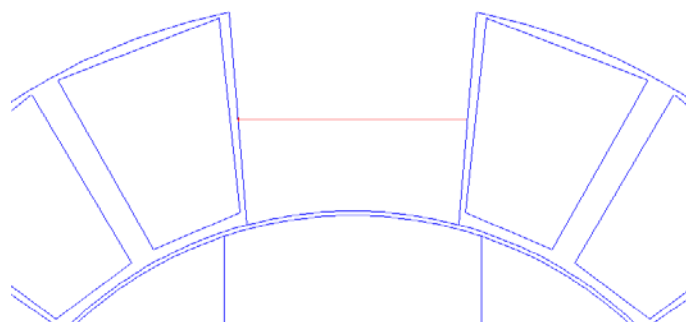




Рисунок 3.5 – Определение ширины зубца статора

Для определения линейных размеров в пакете FEMM выбирается пиктограмма  на панели инструментов. Затем, используя правую кнопку мыши проводим линию, соответствующую величине, которую требуется определить. Выбираем кнопку , из выпадающего меню выбираем пункт “contour length”, нажимаем кнопку “OK”. В окне результатов получаем необходимую длину в метрах (рис. 3.6).

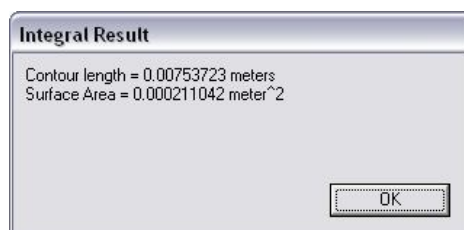




Рисунок 3.6 – Определение длины линии из программы FEMM

12. *Момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>*. Возможны два варианта его определения. Первый – расчет по заданным выше геометрическим размерам, в этом случае вводим 0. Второй вариант (более точный) – расчет момента инерции ротора с использованием программы FEMM (данная возможность появилась в 4-й версии программы). Для этого необходимо выделить ротор (пиктограмма ) и нажать на кнопку . Как необходимо выделить ротор показано на рис. 3.7.

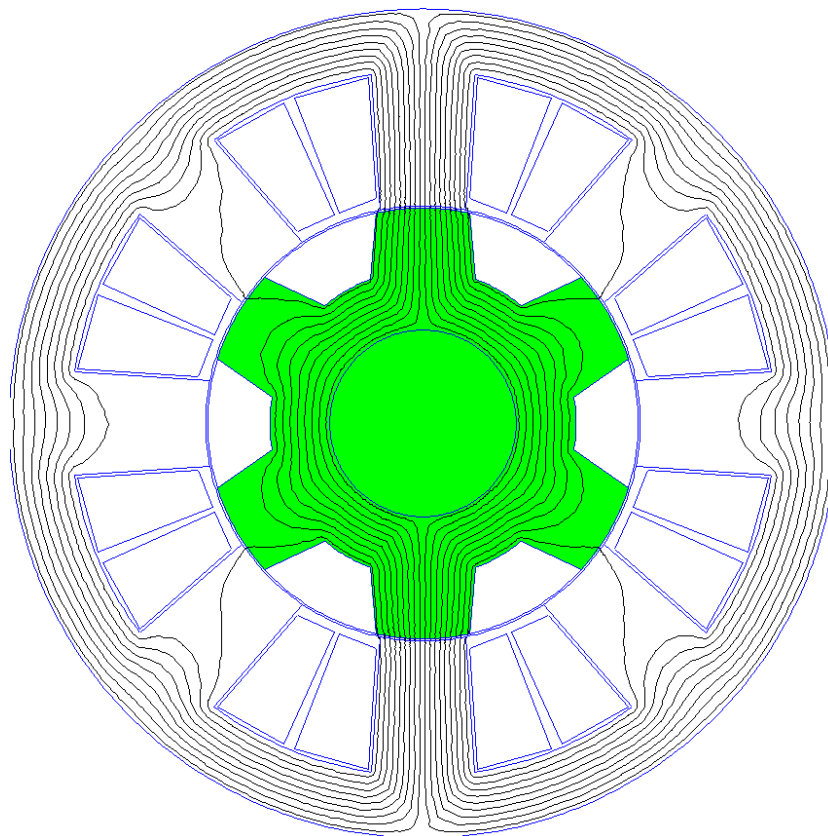


Рисунок 3.7– Пример выделения ротора

Из выпадающего меню выбираем пункт “R<sup>2</sup> (i.e. Moment of Inertia/Density)”, нажимаем кнопку “ОК”. Пример окна с результатом приведен на рис. 3.8. Полученное значение необходимо умножить на плотность материала – электротехнической стали (например, плотность стали 2211 равна  $7800 \cdot \text{кг/м}^3$ ). Также, для учета момента инерции вала, необходимо полученное значение умножить на коэффициент 1.1.

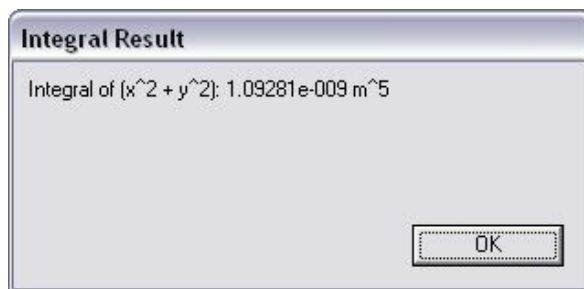


Рисунок 3.8 – Определение момента инерции

13. *Коэффициент заполнения пакета сталью* – равен отношению площади поперечного сечения магнитопровода по стали, к полной площади поперечного сечения магнитопровода, включающей и площади изоляционных промежутков между пластинами. Учитывается при определении сопротивления по заданным геометрическим размерам и обмоточным данным.

14. *Момент сопротивления, Н·м*. Определяется по техническому заданию. Если необходимо смоделировать работу ВРД на холостом ходу, то устанавливаем значение 0.

15. *Момент холостого хода двигателя, Н·м*. Принято определять как 5 % от момента сопротивления (учитывается трение в подшипниках и трение ротора о воздух).

### Обмоточные данные ЭМП

16. *Ширина катушки фазы статора  $b_k$ , м*. Ширина катушки определяется по средней линии, как показано на рис. 3.9.

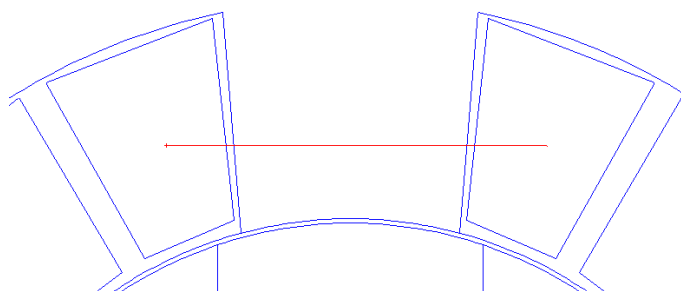




Рисунок 3.9 – Определение ширины катушки фазы статора

17. *Число витков катушки фазы статора.* Вводится число витков в одной катушке фазы (внимание, при соотношении чисел полюсов 16/12 – число катушек 4).

18. *Площадь окна катушки в конечноэлементной модели, м<sup>2</sup>.* Площадь определяется в соответствии с рис. 3.10. Для определения площади в пакете FEMM выбирается пиктограмма  на панели инструментов. Затем, используя левую кнопку мыши выделяем требуемую область. Выбираем кнопку , из выпадающего меню выбираем пункт “Block cross-section area”, нажимаем кнопку “ОК”. В окне результатов получаем значение необходимой площади в метрах в квадрате (рис. 3.11).

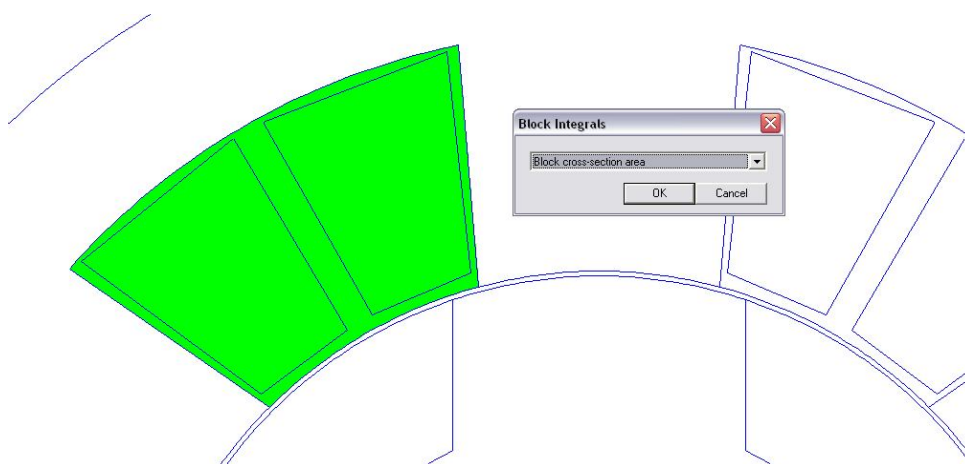


Рисунок 3.10 – Определение площади окна катушки

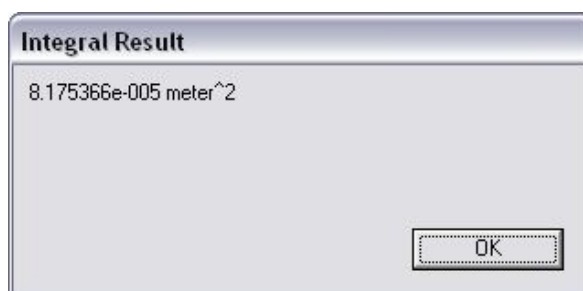


Рисунок 3.11 – Определение длины из программы FEMM

19. *Полное сопротивление цепи фазы, Ом.* Если производится моделирование изготовленного ВРД, то для обеспечения большей точности можно ввести реальное измеренное сопротивление фазы статора (с учетом

увеличения сопротивления при повышении температуры и сопротивления коммутирующих элементов). Если нет возможности выполнить измерение, или экспериментального образца нет, то нужно ввести 0 – программа рассчитает сопротивление по заданной геометрии и обмоточным данным.

### **Данные, необходимые для расчета потерь в стали**

20. *Коэффициент, учитывающий технологические факторы.* Учитывает технологические факторы, зависящие от технологии производства. Принимается равным 1.7.

21. *Удельные потери в стали, при индукции 1 Тл, Вт/кг.* Значение берется из каталога, соответствующее применяемой марки стали. Например, для марки стали 2211 удельные потери равны 2.6 Вт/кг, это значение измерено при частоте перемагничивания 50 Гц. Значение частоты перемагничивания, для которой заданы удельные потери, вносится в пункт 22.

22. *Частота перемагничивания, для которой заданы удельные потери в стали, Гц.* См. пояснения в пункте 21.

23. *Коэффициент  $\beta_{ETA}$ , зависящий от марки стали.* Принимается равным 1.5.

### **Система управления**

24. *Напряжение преобразователя, В.* Напряжение, подводимое от источника питания к системе управления.

25. *Ограничение по току фазы, А.* Максимальный ток, при достижении которого включается “жесткая”, либо “мягкая” коммутация. При моделировании системы управления с обратной связью (ОС) по двум контурам (по скорости и току), необходимо задавать значение ограничения тока больше, чем может быть получено в обратной связи по току.

26. *Вид коммутации при ограничении по току ('1' – “жесткая”, '0' – “мягкая”).* При “жесткой” коммутации превышение тока в фазе вызывает подачу

обратного напряжения питания. При применении “мягкой” коммутации, превышение тока в фазе вызывает подачу нулевого напряжения (фаза отключается). Обычно используется “жесткая” коммутация.

27. *Угол включения фазы, градусов.* Определяется в зависимости от типа ЭМП ВРД, числа фаз, алгоритма коммутации и т.д.

28. *Угол выключения фазы, градусов.* Определяется аналогично углу включения фазы.

29. *Угол задержки включения режима P1, градусов.* Показывает, на сколько градусов после угла выключения транзисторов применять мягкую коммутацию.

30. *Начальная скорость, рад/с.* С целью экономии времени расчета, удобно принять что, двигатель уже вышел на некоторую скорость. Если для моделирования важно чтобы в момент пуска ротор ЭМП ВРД не вращался, то введите 0.

31. *Начальное положение ротора, градусов.* Положение ротора, с которого начинается расчет. Ноль градусов положения ротора соответствует нулю градусов для фазы А, что является полностью рассогласованным положением зубцов статора фазы А к зубцам ротора.

32. *Сопротивление ключа VT1, Ом.* Выбирается по каталогу применяемых транзисторных ключей. Если применяются транзисторы формы International Rectifier, то необходимые параметры можно взять из табл. 3.2 (параметр  $R_{DS(on)}$ ). Выбранный транзистор должен подходить также по напряжению и току. Схема включения транзисторов для одной фазы приведена на рис. 3.12.

33. *Сопротивление ключа VT2, Ом.* Значение определяется аналогично ключу VT1.

34. *Приведенный момент инерции механизма, кг·м<sup>2</sup>.* Используется при моделировании нагрузки, принимается равным половине момента инерции ротора.

35. *Режим работы ВРД.* Данный параметр введен для совместимости с будущими версиями программы SRM-CAD, в которых можно будет выбрать последовательность режимов работы. Следует ввести строку: *прямой ход – тормоз – реверс – тормоз – прямой ход...*

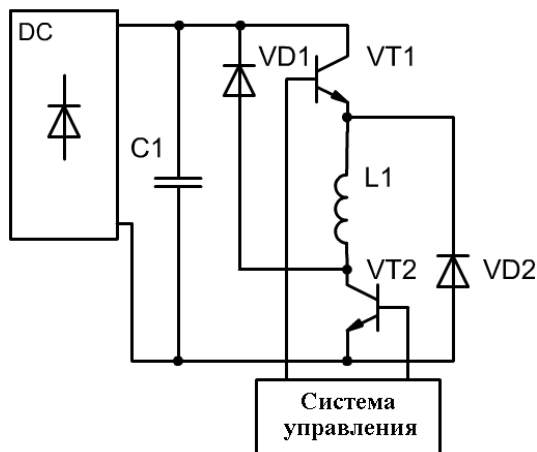


Рисунок 3.12 – Схема включения транзисторов для одной фазы

36. *Скорость, при которой происходит переключение режима работы, рад/с.* Указывается скорость, при достижении которой, ВРД переключается в тормозной режим, после остановки происходит разгон в противоположную сторону (реверс). Если необходимо обеспечить движение только в одном направлении, то задается значение скорости большее, чем может развить ВРД при заданных параметрах.

37. *Включение регулирования.* При необходимости смоделировать систему управления с ОС по скорости, нужно ввести 1. При вводе 0 двигатель работает на естественной механической характеристике.

Заполнение нижеследующих пунктов 38 – 43 необходимо при включении регулирования.

38. *Вид регулирования.* Система управления для обеспечения искусственных механических характеристик может быть двух типов: 1 – с контуром по скорости и 2 – с двумя контурами по скорости и току. Соответственно, необходимо ввести признак 1 или 2.

39. *Напряжение задания скорости, В.* Для выхода на определенную скорость, необходимо задать соответствующее напряжение. Оно зависит от напряжения на датчике обратной связи. Например, для выхода на скорость 200 рад/с, при напряжении датчика ОС 1 В на 100 рад/с, напряжение задания скорости будет равно 2 В. Напряжение задания не может быть больше 5 В.

40. *Напряжение датчика ОС на 100 рад/с, В.* Это напряжение, которое выдает датчик при достижении двигателем скорости 100 рад/с. Датчик имеет идеальную линейную зависимость выходного напряжения от скорости (идеальный тахогенератор). Например, если напряжение датчика ОС на 100 рад/с задано 1 В, то при достижении двигателем скорости 350 рад/с напряжение на датчике будет равно 3.5 В.

41. *Опорная частота ГЛИН, Гц.* Частота генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). Задавая опорную частоту необходимо контролировать число точек на периоде ГЛИН, которое зависит от шага интегрирования. Желательно, чтобы число точек на периоде ГЛИН, было не менее 10. Рекомендуется задавать значение 15000 Гц.

42. *Коэффициент усиления ПИ-регулятора  $K_u$ .* Параметр пропорционального регулятора системы управления. Например, может принимать значение 5.

43. *Постоянная времени интегрального звена ПИ-регулятора  $T_2$ , с.* Параметр интегрального регулятора системы управления. Например, может принимать значение 0.001 с.

### **Настройки математической модели**

44. *Шаг по времени, с.* Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений. Система решается методом Рунге-Кутты. Стандартный шаг равен 0.00001 с. Если применяется слишком маленький шаг интегрирования, то расчет может длиться слишком долго, при этом используя большое количество оперативной памяти.

45. *Время окончания переходного процесса, с.* Понимается длительность интервала времени, который должен быть рассчитан. Задавая это время нужно помнить, что произведение отношения времени расчета на шаг расчета и времени расчета одной точки интегрирования равно суммарному времени расчета. Например, на компьютере Intel Pentium 4 2.4 GHz (1 ядро), за одну секунду выполняется расчет 2700 итераций.



46. *Время начала регистрации переходного процесса, с.* Должно быть в пределах от 0 секунд, до времени окончания переходного процесса. Необходимость введения этого параметра обусловлена тем, что во время расчета параметры каждой точки выводятся на диаграммы мгновенных значений. При занесении в них более 20000 значений работа с ними существенно замедляется (особенность используемых программных решений). Если общее число итераций превышает 20000, то рекомендуется вводить данный параметр таким, чтобы в интервале времени между началом регистрации и окончанием переходного процесса располагалось не более 20000 итераций.

47. *Включить режим “быстрый расчет”.* Переменная является экспериментальной, поэтому следует ввести 0.

48. *Шаг по времени при режиме “быстрый расчет”, с.* Экспериментальная переменная. Если в пункте 47 указано значение 1, то шаг по времени необходимо задавать больше чем в пункте 44, верхнее значение переменной ограничено сходимостью метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

Таблица 3.2 – Транзисторы фирмы International Rectifier


Part Number	V(BR) <sub>DSS</sub> Drain-to-Source Breakdown Voltage (Volts)	RDS(on) On-State Resistance (Ohms)	I <sub>p</sub> Continuous Drain Current 25° C (Amps)	Q <sub>g</sub> Total Gate Charge (nC)	R <sub>thJC</sub> Max Thermal Resistance (°C/W)	P <sub>D</sub> @T <sub>C</sub> =25°C Max Power Dissipation (Watts)	Fax-on- Demand Number	Case Style, (Case Outline) (1)
<i>Low Charge N-Channel</i>								
IRF740LC	400	0.55	10	39	1.0	125	91068	
IRF840LC	500	0.85	8.0	39	1.0	125	91069	
IRFBC40LC	600	1.2	6.2	39	1.0	125	91070	
<i>N-Channel</i>								
IRFZ34N	55	0.040	26	18	2.7	56	91276	TO-220AB (H12)
IRFZ46N	55	0.020	46	33	1.7	88	91277	
IRF1010N	55	0.012	72	51	1.2	130	91278	
IRF3205	55	0.008	98	69	1.0	150	91279	
IRFZ14	60	0.20	10	7.2	3.5	43	90507	
IRFZ24N	55	0.07	17	12	3.3	45	91354	
IRFZ34N	55	0.040	26	18	2.7	56	91276	
IRFZ44N	55	0.024	41	29	1.8	83	91303	
IRFZ48	60	0.018	50	50	0.8	190	90758	
IRF510	100	0.54	5.6	4.0	3.5	43	90325	
IRF520	100	0.27	9.2	6.5	2.5	60	90313	
IRF530N	100	0.11	15	11	2.4	60	91351	
IRF540N	100	0.052	27	19	1.6	94	91341	
IRF610	200	1.5	3.3	2.1	3.5	36	90326	
IRF620	200	0.8	5.2	3.3	2.5	50	90317	
IRF630	200	0.40	9.0	5.7	1.7	74	90309	
IRF640	200	0.18	18	11	1.0	125	90374	
IRF614	250	2.0	2.7	1.7	3.5	36	90475	
IRF624	250	1.1	4.4	2.8	2.5	50	90472	
IRF634	250	0.45	8.1	5.1	1.7	74	90476	
IRF644	250	0.28	14	8.5	1.0	125	90527	
IRF710	400	3.6	2.0	1.2	3.5	36	90327	
IRF720	400	1.8	3.3	2.1	2.5	50	90315	
IRF730	400	1.0	5.5	3.3	1.7	74	90308	
IRF740	400	0.55	10	6.3	1.0	125	90375	
IRF734	450	1.2	4.9	3.1	1.7	74	90999	
IRF744	450	0.63	8.8	5.6	1.0	125	91000	
IRF820	500	3	2.5	1.6	2.5	50	90324	
IRF830	500	1.5	4.5	2.9	1.7	74	90311	
IRF840	500	0.85	8.0	5.1	1.0	125	90376	
IRFBC20	600	4.4	2.2	1.4	2.5	50	90623	
IRFBC30	600	2.2	3.6	2.3	1.7	74	90482	
IRFBC40	600	1.2	6.2	3.9	1.0	125	90506	
IRFBE20	800	6.5	1.8	1.2	2.3	54	90610	
IRFBE30	800	3.0	4.1	2.6	2.0	125	90613	
IRFBF20	900	8.0	1.7	1.1	2.3	54	90607	

Таблица со всеми исходными данными для подсистемы расчета динамических и квазиустановившихся режимов приведена в приложении.

#### 4. Подсистема оптимизации

В подсистеме оптимизации реализованы 2-а метода оптимизации: метод полного перебора (иногда называется метод сеток) и метод генетического алгоритма. Для подсистемы оптимизации выделена отдельная вкладка “оптимизация”, в которую вложено три вкладки: “входные данные”, “вычисления”, “настройка ГА”. Внешний вид этих вкладок приведен на рисунках 4.1 – 4.3.

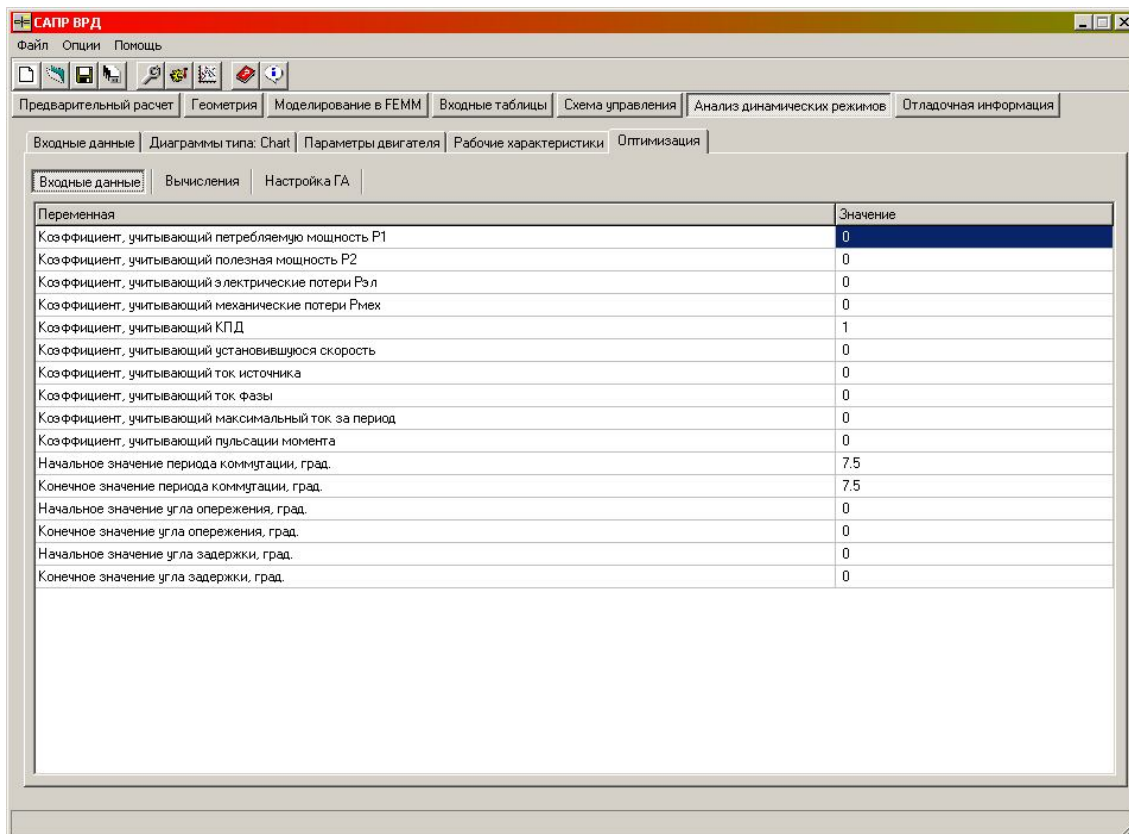


Рисунок 4.1 – Окно с вкладкой “входные данные”

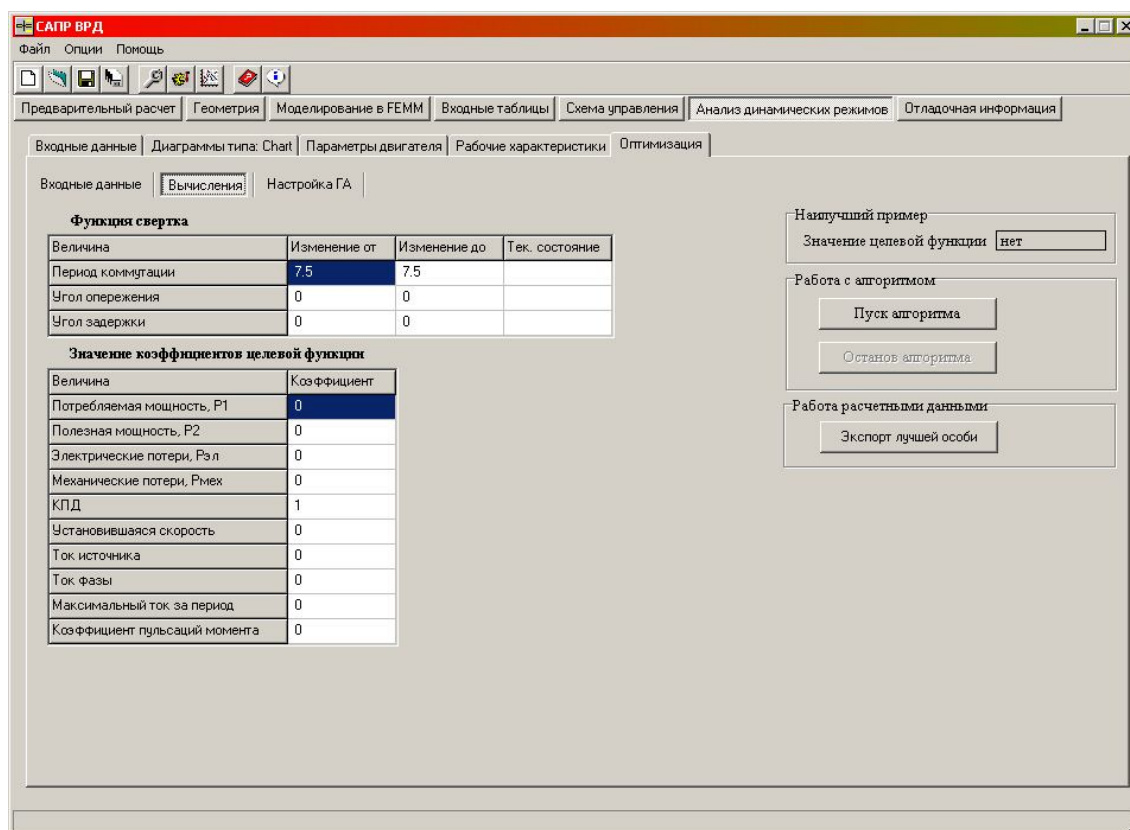


Рисунок 4.2 – Окно с вкладкой “вычисления”

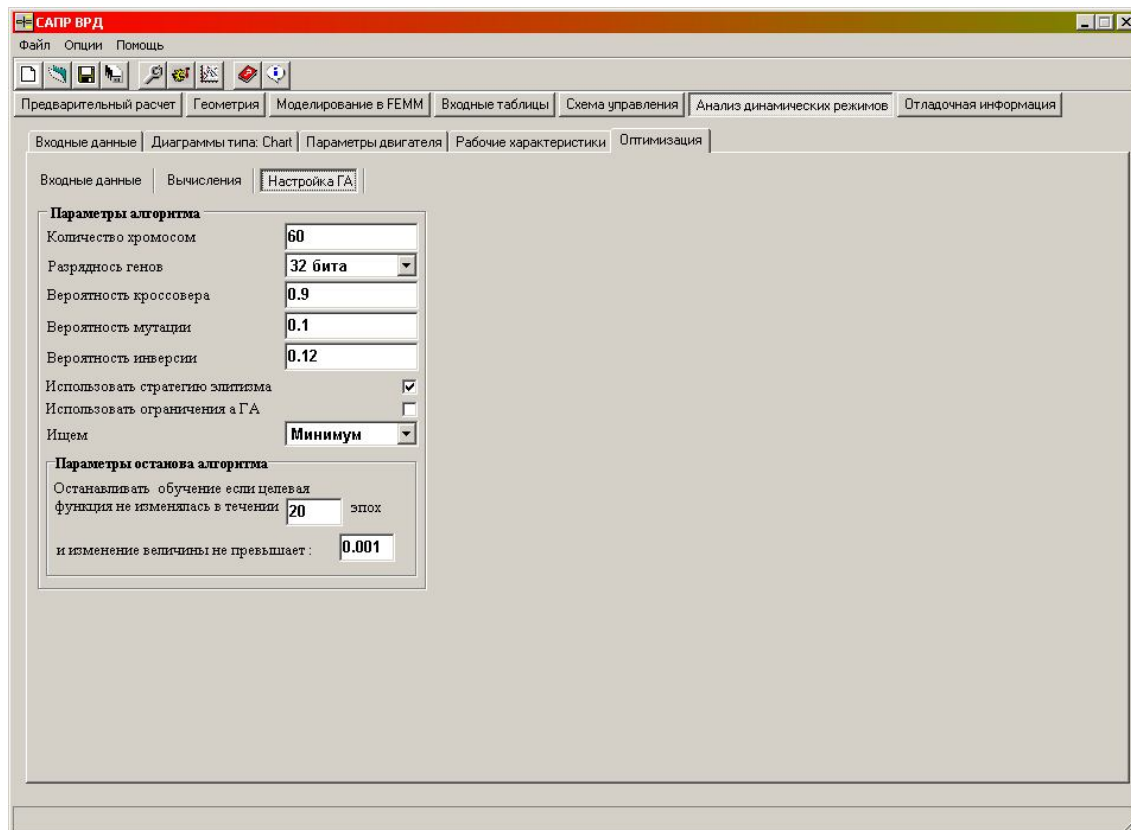


Рисунок 4.3 – Окно с вкладкой “настройка ГА”

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

### Листинги программ специализированного программного обеспечения

Ниже приведены листинги программного обеспечения, для автоматизации процесса параметризации геометрии ЭМП ВРД и автоматизации расчетов магнитного поля в программе FEMM версии 4.0.1. Программное обеспечение написано на языке программирования LUA.

```

-----Задаем значения переменных-----
-----Основные данные для postproc-----
--Путь к каталогу, где расположен скрипт и вспомогательные файлы
MainDir = "C:\\050_Geom_on_Lua\\"
--Имя сгенерированного файла с геометрией
FilePostProc = "temp.fem"
FileTempPostProc = "temp-postproc.fem"
--Число витков в катушке
Wk = 30
--Переменная, которая указывает тип решаемой задачи при
--расчете магнитного поля
--Возможны 3-и варианта: "table", "optiy" и "onlygeom". Первый тип "table"
--для расчета таблиц
--потокосцепления и момента в функции от угла ротора, а также тока
--Второй вариант "optiy" - при работе с внешней программой оптимизации
--Третий вариант "onlygeom" - только выполняет построение геометрии
--(при этом значение плотности тока определяется по минимально заданному
--току i_min)
--(в файлы пишет только лог, а значения момента сворачивает по заданному
--критерию)
TypeCalc = "onlygeom"--"table"--"optiy"--
--Имя которое вставляется перед обозначением типа таблицы (без расширения)
FileNameTable = "aiv1"
-----Задание тока-----
--Если необходимо посчитать одну кривую, то i_min = i_max
--Начальное значение тока, A (Внимание! Это значение принимается и при
--расчете плотности тока в катушке для варианта "onlygeom")
i_min = 4
--Конечное значение тока, A
i_max = 4
--Шаг по току, A
i_delta = 1
-----Задание положения-----
--Начальное положение ротора, градусов (0 - это полностью рассогласованное
положение)
--При этом скрипт работает с файлом, у которого ротор находится в полностью
согласованном положении...
--Достигается, это благодаря отсчету от max и поворачиванию по шагам в
сторону минимума
alf_min = 7.5
--Конечное положение ротора, градусов
--(связанно с операцией отсчета от полностью рассогласованного положения)
alf_max = 22.5
--Шаг по углу, градусов
alf_delta = 2.5
-----Задание точности представления дуг-----
--Все номера дуг смотреть на рисунке в руководстве пользователя
--Дискретность дуги ярма ротора, град.
IncrementArcNumber1 = 5
--Дискретность дуги полюса ротора, град.
IncrementArcNumber2 = 1
--Дискретность дуги воздуха в пазу ротора, град.
IncrementArcNumber3 = 1
--Дискретность дуги сопряжения полюса ротора с ярмом ротора, град.
IncrementArcNumber4 = 30
--Дискретность дуги полюса статора, град.
IncrementArcNumber5 = 1
--Дискретность дуги воздуха в пазу статора, град.
IncrementArcNumber6 = 1
--Дискретность дуги под клин на полюсе статора, град.
IncrementArcNumber7 = 30
--Дискретность дуги сопряжения полюса статора с ярмом статора, град.
IncrementArcNumber8 = 30

```

```

--Дискретность внутренней дуги ярма статора, град.
IncrementArcNumber9      = 5
--Дискретность внешней дуги ярма статора, град.
IncrementArcNumber10     = 5
--Дискретность дуги под шпильку, град.
IncrementArcNumber11     = 25
--Дискретность дуги вала, град.
IncrementArcNumberShaft  = 5
-----Ввод исходных данных (для генерации геометрии)-----
--Число слоев сетки в воздушном зазоре
NumberMeshAir            = 1.5
--Принятые единицы измерения в этом скрипте
--Есть следующие варианты: "inches" (дюймы), "millimeters" (миллиметры),
"centimeters" (сантиметры)
--"meters" (метры), "mils" (тысячные доли дюйма), "micrometers" (микрометры)
UnitMeasure              = "millimeters"
--Файл в котором хранятся: созданная магнитостатическая задача, свойства
материалов и описаны граничные условия
File                     = "begin.fem"
--Описание свойств материалов (имена должны совпадать с именами в файле
"begin.fem")
NameAir                  = "Air"
NameAirDelta             = "Air"
NameSteelRotor           = "ST2211"
NameSteelStator          = "ST2211"
NameCoilPlus             = "Tok+"
NameCoilMinus            = "Tok-"
--Описание граничных условий (имена должны совпадать с именами в файле
"begin.fem")
NameBoundary             = "A=0"

-----Размеры статора-----
--Число полюсов статора
g_StatorPoles            = 8
--Полюсное деление, о.е.
--g_StatorPoleAngle      = 0.5
--Угол наклона ребра полюса статора, град.
g_StatorPoleAngleIncline = 4
--Внешний диаметр статора, мм
g_StatorDia              = 82
--Радиус сопряжения полюса статора с ярмом статора, мм
g_StatorPoleRadius       = 1.5
--Высота полюса статора, мм
g_StatorPoleDepth        = 13
--Выполнять углубление под клин или нет ("0" - не выполнять, "1" - выполнять)
g_EnableStatorSlot       = 1
--Высота шлица, мм
g_StatorHeightSlot       = 2
--Радиус углубления под клин, мм
g_StatorRadiusSlot       = 0.7
--Радиус под шпильку, мм
g_StatorRadiusBolt       = 2.25
--Глубина расположения шпильки, мм
g_StatorDepthsBolt       = 4
--Число шпилек
g_StatorNumberBolt       = 4
-----
--Длина машины, мм (предполагается, что статор и ротор выполняются одной
длины)
l_srm                    = 45
-----Размеры ротора-----
--Число полюсов ротора
g_RotorPoles             = 6
--Воздушный зазор, мм

```

```

g_AirGap = 0.15
--Полюсное деление ротора, о.е.
--g_RotorPoleAngle = 0.42
--Высота полюса ротора, мм
g_RotorPoleDepth = 6.2
--Диаметр ротора, мм
g_RotorDia = 41.7
--Диаметр отверстия в роторе, мм
g_ShaftDia = 20
--Радиус сопряжения полюса ротора с ярмом ротора, мм
g_RotorPoleRadius = 1.5
--Угол наклона ребра полюса ротора, град.
g_RotorPoleAngleIncline = 1.5

-----Окончание задания значений переменным-----
--Массив окружностей для построения ЭМП ВРД
g_ArrayCircle = {}
--Массив значений момента при различных значениях угла поворота ротора
ArrayM = {}
-----Автоматический ввод исходных данных из файла "input.txt"-----
input_file = openfile(MainDir.."input.txt","r");

if input_file then
    read(input_file, "*1");

    g_StatorPoleAngle = read(input_file, "*n");
    read(input_file, "*1"); read(input_file, "*1"); read(input_file,
"*1");
    g_RotorPoleAngle = read(input_file, "*n");
    closefile(input_file);
else
    messagebox("Ошибка: нельзя открыть файл input.txt");
    --Присваиваем значения переменным, по умолчанию, в том случае,
если файл не открылся...
    g_StatorPoleAngle = 0.5
    g_RotorPoleAngle = 0.42
end;

-----Проверка допустимости значений переменных-----
--Полный перечень возможных сообщений об ошибках:
--Ошибка: нельзя открыть файл input_xх.txt
--Ошибка 01. Полюсное деление статора больше 1
--Ошибка 02. Число полюсов статора больше 60
--Ошибка 03. Слишком большой угол наклона ребра полюса статора
--Ошибка 04. Проверьте значение высоты полюса статора и внешнего диаметра
статора
--Ошибка 05. Число полюсов ротора больше 300
--Ошибка 06. Полное полюсное деление ротора больше 1
--Ошибка 07. Проверьте диаметры статора и ротора
--Ошибка 08. Проверьте следующие размеры: диаметр ротора, воздушный
зазор, высота полюса статора и внешний диаметр статора
--Ошибка 09. Проверьте правильность размеров ротора
--Ошибка 10. Слишком большой угол наклона ребра полюса ротора
--Ошибка 20. Вырез под клин не может быть вписан в полюс статора
--Ошибка 21. Глубина вырезов под клин превышает толщину полюса статора
--Ошибка 22. Глубина выреза под шпильку превышает толщину ярма статора
--Ошибка 24. Радиус сопряжения полюса ротора с ярмом ротора превышает
высоту полюса ротора
--Ошибка 25. Радиус сопряжения полюса статора с ярмом статора превышает
высоту полюса статора
--Ошибка F2.1: Прямая не пересекается с окружностью
--Ошибка F2.2: Нет пересечения окружности с линией. Откорректируйте
размеры
-----

```



```

--Если условия не выполняются, то все ОК
--Проверка размеров статора
if (g_StatorPoleAngle > 1) then
  messagebox("Ошибка: 1")
end
if (g_StatorPoles > 60) then
  messagebox("Ошибка: 2")
end
if (abs(g_StatorPoleAngleIncline) > 60) then
  messagebox("Ошибка: 3")
end
if ((2*g_StatorPoleDepth) > g_StatorDia) then
  messagebox("Ошибка: 4")
end
-----Проверка размеров ротора-----
if (g_RotorPoles > 300) then
  messagebox("Ошибка: 5")
end
if (g_RotorPoleAngle > 1) then
  messagebox("Ошибка: 6")
end
if (g_RotorDia > g_StatorDia) then
  messagebox("Ошибка: 7")
end
if ((g_RotorDia + 2*g_AirGap + 2*g_StatorPoleDepth) > g_StatorDia) then
  messagebox("Ошибка: 8")
end
if (g_ShaftDia > (g_RotorDia - 2*g_RotorPoleDepth)) then
  messagebox("Ошибка: 9")
end
if (abs(g_RotorPoleAngleIncline) > 60) then
  messagebox("Ошибка: 10")
end
if (g_EnableStatorSlot == 1) then
  if ((g_StatorHeightSlot + 2*g_StatorRadiusSlot) > g_StatorPoleDepth) then
    messagebox("Ошибка: 20")
  end
  if ((2*g_StatorRadiusSlot) > ((360*g_StatorPoleAngle)/g_StatorPoles))
then
    messagebox("Ошибка: 21")
  end
end
if ((g_StatorRadiusBolt + g_StatorDepthsBolt) > (g_StatorDia - 2*g_AirGap -
2*g_RotorPoleDepth - g_RotorDia)) then
  messagebox("Ошибка: 22")
end
if (g_RotorPoleRadius > g_RotorPoleDepth) then
  messagebox("Ошибка: 24")
end
if (g_StatorPoleRadius > g_StatorPoleDepth) then
  messagebox("Ошибка: 25")
end
-----Задаем функции для упрощения операций параметризации геометрии-----
--функция [1]. Определяет коэффициенты а, в, с прямой проходящей через точку
--(x0;y0) отклоненной на угол angle (см. рисунки в руководстве)
function GetLineOnPointAndAngle(point_x,point_y,angle)
  Result_a = -tan(90 - angle)
  Result_b = 1
  Result_c = point_x*tan(90 - angle) - point_y
return Result_a,Result_b,Result_c
end

```

```
--Функция [2]. Определяет точку пересечения прямой (заданной коэффициентами
a, b, c)
--с окружностью, радиус которой задан.
--Примечание 1. Возвращает точку с отрицательным Y,
--если оба Y одного знака, то
--смотри примечания 2 и 3.
--Примечание 2. Возвращает точку с отрицательным значением, x.
--Если x1 и x2 < 0, то возвращается значение расположенное ближе
--к центральной вертикальной линии.
--Если x1 и x2 > 0, то возвращается значение расположенное ближе
--центральной вертикальной линии.
--Примечание 3. Если прямая пересекается с окружностью в одной точке, то эта
--точка и возвращается в качестве результата вычисления функции}
```

```
function GetPoinOnCircleAndLine(coef_a,coef_b,coef_c,RadiusCircle)
--(return) RF2x,RF2y
  --Проверка на пересечение линии и окружности, если нет - ошибка
  if ((coef_a == 0) and (coef_b == 0)) then
    messagebox("Ошибка F2.1: Прямая не пересекается с окружностью")
  end
  --Вычисление координат x точек пересечения
  if (((coef_a^2)*(RadiusCircle^2) - (coef_c^2) +
(RadiusCircle^2)*(coef_b^2)) < 0) then
    messagebox("Ошибка F2.2: Нет пересечения окружности с линией.
Откорректируйте размеры")
  end
  point_x1 = (-2*coef_a*coef_c - 2*coef_b*sqrt((coef_a^2)*(RadiusCircle^2) -
(coef_c^2) + (RadiusCircle^2)*(coef_b^2)))/(2*((coef_a^2) + (coef_b^2)))
  point_x2 = (-2*coef_a*coef_c + 2*coef_b*sqrt((coef_a^2)*(RadiusCircle^2) -
(coef_c^2) + (RadiusCircle^2)*(coef_b^2)))/(2*((coef_a^2) + (coef_b^2)))
  if (coef_b == 0) then
    point_y1 = sqrt((RadiusCircle^2)-((coef_c^2)/(coef_a^2)))
    point_y2 = -sqrt((RadiusCircle^2)-((coef_c^2)/(coef_a^2)))
  else
    point_y1 = -(coef_a*point_x1 + coef_c)/coef_b
    point_y2 = -(coef_a*point_x2 + coef_c)/coef_b
  end
  --Если Y разного знака, то возвращается отрицательный Y, если нет - то
  --алгоритм выбирает дальше по результатам сравнения двух координат по "x"
  if ((point_y1 * point_y2) < 0) then
    if (point_y1 < 0) then
      RF2x = point_x1
      RF2y = point_y1
      return RF2x,RF2y
    end
    if (point_y2 < 0) then
      RF2x = point_x2
      RF2y = point_y2
      return RF2x,RF2y
    end
  else
    --Если точки совпадают
    if (point_x1 == point_x2) then
      RF2x = point_x1
      RF2y = point_y1
      return RF2x,RF2y
    end
    --Если обе точки меньше нуля
    --(возвращается точка ближайшая к центральной вертикальной линии)
    if ((point_x1 < 0) and (point_x2 < 0)) then
      if (point_x1 > point_x2) then
        RF2x = point_x1
        RF2y = point_y1
        return RF2x,RF2y
      end
    end
  end
end
```

```

        else
            RF2x = point_x2
            RF2y = point_y2
            return RF2x,RF2y
        end
    end
    end
    --Если обе точки больше нуля
    --(возвращается точка ближайшая к центральной вертикальной линии)
    if ((point_x1 > 0) and (point_x2 > 0)) then
        if point_x1 > point_x2 then
            RF2x = point_x2
            RF2y = point_y2
            return RF2x,RF2y
        else
            RF2x = point_x1
            RF2y = point_y1
            return RF2x,RF2y
        end
    end
    end
    --Если точки разных знаков
    if ((point_x1 < 0) and (point_x2 > 0)) then
        RF2x = point_x1
        RF2y = point_y1
        return RF2x,RF2y
    end
    if ((point_x1 > 0) and (point_x2 < 0)) then
        RF2x = point_x2
        RF2y = point_y2
        return RF2x,RF2y
    end
    end
end
end

--функция [3]. Определяет точку, которая является переданный
--точкой после поворота ее на угол
function GetPointOnPointAndAngle(px, py, AngleRotate)
--(return) RF3x,RF3y
--Проверка на x=0
if (px == 0) then
    px = 1E-16
end
if (px < 0) then
    RF3x = sqrt((px^2) + (py^2))*cos(atan(py/px) + (180+AngleRotate))
    RF3y = sqrt((px^2) + (py^2))*sin(atan(py/px) + (180+AngleRotate))
end
if (px > 0) then
    RF3x = sqrt((px^2) + (py^2))*cos(atan(py/px) + AngleRotate)
    RF3y = sqrt((px^2) + (py^2))*sin(atan(py/px) + AngleRotate)
end
return RF3x,RF3y
end

--функция [4]. Определяет угол между 2-мя прямыми
--образованными 2-мя точками, проходящими через точку (0;0)
--Примечание 1. Необходима для определения длины дуги при расщепленном
--воздушном зазоре
function GetAngleOnTwoPoint(p_x1, p_y1, p_x2, p_y2)
--(return) RAngle
if ((sqrt((p_x1^2) + (p_y1^2))*sqrt((p_x2^2) + (p_y2^2))) == 0) then
    RAngle = 0
else
    RAngle = acos((p_x1*p_x2 + p_y1*p_y2)/(sqrt((p_x1^2) +
(p_y1^2))*sqrt((p_x2^2) + (p_y2^2))))
end
end

```

```

return RAngle
end

```

```

-----Аналитический расчет геометрии ВРД-----

```

```

--Занесение всех дуг в массив (номера соответствуют рисунку)

```

```

--Диаметр вала

```

```

g_ArrayCircle[1] = g_ShaftDia

```

```

--Диаметр ярма ротора

```

```

g_ArrayCircle[2] = g_RotorDia - 2*g_RotorPoleDepth

```

```

--Диаметр ротора

```

```

g_ArrayCircle[3] = g_RotorDia

```

```

--Диаметр внутренней расточки полюса статора

```

```

g_ArrayCircle[4] = g_RotorDia + 2*g_AirGap

```

```

--Внутренний диаметр ярма статора

```

```

g_ArrayCircle[5] = g_RotorDia + 2*g_AirGap + 2*g_StatorPoleDepth

```

```

--Внешний диаметр статора

```

```

g_ArrayCircle[6] = g_StatorDia

```

```

--Размер сетки конечных элементов в воздушном зазоре, мм

```

```

MeshAir = g_AirGap/NumberMeshAir

```

```

--Открытие заранее подготовленного файла (с заданными свойствами материалов)

```

```

open(File)

```

```

--Постановка задачи (задание проблемы)

```

```

mi_probdef(0,UnitMeasure,"planar",1e-8,1_srm,30)

```

```

--Установка центральной точки

```

```

mi_addnode(0,0)

```

```

-----Начало построения ротора-----

```

```

--Определим прямую проходящую через точку (0,0)

```

```

--и отклоненную от вертикали на соответствующий угол

```

```

GetLineOnPointAndAngle(0,0,((180*g_RotorPoleAngle)/g_RotorPoles))

```

```

--Ищем точку пересечения окружности '3' с ранее найденной прямой

```

```

GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[3]/2)

```

```

--Присваиваем значения точкам p1 и p2

```

```

px1 = RF2x

```

```

py1 = RF2y

```

```

px2 = -RF2x

```

```

py2 = RF2y

```

```

--Строим дугу

```

```

mi_addnode(px1,py1)

```

```

mi_addnode(px2,py2)

```

```

mi_addarc(px1,py1,px2,py2,((360*g_RotorPoleAngle)/g_RotorPoles),IncrementArcNumber2)

```

```

--Присваиваем полученной дуге группу 1

```

```

mi_seteditmode("arcsegments")

```

```

mi_selectarcsegment(px1,py1)

```

```

mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber2,"",0,1)

```

```

--Строим ребро полюса

```

```

--Определяем прямую, проходящую через основание полюса и

```

```

--отклоненную на угол поворота ребра стенки полюса

```

```

GetLineOnPointAndAngle(px2,py2,g_RotorPoleAngleIncline)

```

```

--Ищем точку пересечения окружности '2' с ранее найденной прямой

```

```

--(получим условно - по описанию - точку 3)

```

```

GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[2]/2)

```

```

--Присваиваем значения точке p3

```

```

px3 = RF2x

```

```

py3 = RF2y

```

```

--Строим ребро полюса ротора

```

```

mi_addnode(px3,py3)

```

```

mi_addsegment(px2,py2,px3,py3)

```

```

--Присваиваем полученному ребру полюса ротора группу 1

```

```

mi_seteditmode("segments")

```

```

mi_selectsegment(px2,py2)

```

```

mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 1)

```

```

--Определим точку p5, повернутую на угол 360/Nr
GetPointOnPointAndAngle(-px3,py3,(360/g_RotorPoles))
--Присваиваем значение точке p5
px5 = RF3x
py5 = RF3y
--Ставим точку p5
mi_addnode(px5,py5)
--Определяем длину дуги в градусах, для части ярма ротора
GetAngleOnTwoPoint(px3,py3,px5,py5)
--Проводим дугу части ярма ротора
mi_addarc(px3,py3,px5,py5,RAngle,IncrementArcNumber1)
--Присваиваем полученной дуге группу 1 (ротор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px5,py5)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber1,"",0,1)
--Сглаживаем переход полюс ротора - ярмо ротора (применяем радиус сопряжения)
mi_createradius(px3,py3,g_RotorPoleRadius)
--присваиваем полученной дуге сопряжения группу 1 (ротор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px3,py3)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber4,"",0,1)
--Определяем точку p4
GetPointOnPointAndAngle(px1,py1,(360/g_RotorPoles))
--Присваиваем значение точке p4
px4 = RF3x
py4 = RF3y
--Ставим точку p5
mi_addnode(px4,py4)
--Проводим дугу для воздуха (часть ротора)
mi_addarc(px2,py2,px4,py4,(360*(1-
g_RotorPoleAngle)/g_RotorPoles),IncrementArcNumber3)
--присваиваем полученной дуге группу 2 (воздух в пазу ротора)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px4,py4)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber3,"",0,2)
--Проводим отрезок - ребро следующего полюса ротора
mi_addsegment(px5,py5,px4,py4)
--Присваиваем полученному ребру следующего полюса ротора группу 1
mi_seteditmode("segments")
mi_selectsegment(px4,py4)
mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 1)
--Сглаживаем переход полюс ротора - ярмо ротора (применяем радиус сопряжения)
mi_createradius(px5,py5,g_RotorPoleRadius)
--присваиваем полученной дуге сопряжения группу 1 (ротор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px5,py5)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber4,"",0,1)
--Копируем полюс ротора и паз ротора (Nr)-раз
--(столько, сколько имеем число полюсов ротора)
--Выделяем 1-ую и 2-ую группы
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(1)
mi_selectgroup(2)
--Скопируем их столько раз, сколько имеем число полюсов ротора - 1,
--относительно точки (0,0)
mi_copyrotate(0,0,(360/g_RotorPoles),(g_RotorPoles-1))
--Поставим метки блоков (сталь и воздух)
mi_addblocklabel(((px1+px3)/2),((py1+py3)/2))
mi_seteditmode("blocks")
mi_selectlabel(((px1+px3)/2),((py1+py3)/2))
mi_setblockprop(NameSteelRotor,1,"","", "", 1, "")
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(((px2+px5)/2),((py2+py5)/2))
mi_selectlabel(((px2+px5)/2),((py2+py5)/2))

```

```

mi_setblockprop(NameAir,1,"","",2,"")
mi_copyrotate(0,0,(360/g_RotorPoles),(g_RotorPoles-1))
--Строим вал
mi_addnode(g_ShaftDia/2,0)
mi_addnode(-g_ShaftDia/2,0)
mi_addarc(g_ShaftDia/2,0,-g_ShaftDia/2,0,180,IncrementArcNumberShaft)
mi_addarc(-g_ShaftDia/2,0,g_ShaftDia/2,0,180,IncrementArcNumberShaft)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(0,g_ShaftDia/2)
mi_selectarcsegment(0,-g_ShaftDia/2)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumberShaft,"",0,3)--Первая цифра
--это дискретность разбиения дуги. Последняя цифра - это номер группы
mi_addblocklabel((g_ShaftDia/4),0)
mi_seteditmode("blocks")
mi_selectlabel((g_ShaftDia/4),0)
mi_setblockprop(NameAir,1,"","",3,"")
mi_clearselected()

-----Построение ротора завершено-----
-----Начало построения статора-----

--Определим прямую проходящую через точку (0,0) и отклоненную от вертикали на
соответствующий угол
GetLineOnPointAndAngle(0,0,((180*g_StatorPoleAngle)/g_StatorPoles))
--Ищем точку пересечения окружности '4' с ранее найденной прямой
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[4]/2)
--Присваиваем значение точкам p1 и p2
px1 = RF2x
py1 = RF2y
px2 = -RF2x
py2 = RF2y
--Строим дугу
mi_addnode(px1,py1)
mi_addnode(px2,py2)
mi_addarc(px1,py1,px2,py2,((360*g_StatorPoleAngle)/g_StatorPoles),IncrementAr
cNumber5)
--Присваиваем полученной дуге группу 5
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px1,py1)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber5,"",0,5)--Первая цифра
--это дискретность разбиения дуги. Последняя цифра - это номер группы

--Строим ребро полюса статора
--Определяем прямую, проходящую через основание полюса и
--отклоненную на угол поворота ребра стенки
GetLineOnPointAndAngle(px1,py1,g_StatorPoleAngleIncline)
--Ищем точку пересечения окружности '5' с ранее найденной прямой
--(получим условно - по описанию - точку 3)
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[5]/2)
--Присваиваем значения точкам p3 и p4
px3 = RF2x
py3 = RF2y
px4 = -RF2x
py4 = RF2y
--Определяем точку p6
GetPointOnPointAndAngle(px1,py1,(360/g_StatorPoles))
--Присваиваем значение точке p6
px6 = RF3x
py6 = RF3y
--Ставим точку p6
mi_addnode(px6,py6)
--Определим точку p5, повернутую на угол 360/Ns
GetPointOnPointAndAngle(px3,py3,(360/g_StatorPoles))

```

```

--Присваиваем точку p5
px5 = RF3x
py5 = RF3y
--Ставим точку p5
mi_addnode(px5,py5)

-----Проверяем, нужно ли выполнять углубление под клин-----

if (g_EnableStatorSlot == 1) then
  --Определяем точку p7 и p8
  px7 = ((g_StatorPoleDepth - g_StatorHeightSlot)*px2 +
g_StatorHeightSlot*px4)/g_StatorPoleDepth
  py7 = ((g_StatorPoleDepth - g_StatorHeightSlot)*py2 +
g_StatorHeightSlot*py4)/g_StatorPoleDepth
  px8 = ((g_StatorPoleDepth - g_StatorHeightSlot -
2*g_StatorRadiusSlot)*px2 + (g_StatorHeightSlot +
2*g_StatorRadiusSlot)*px4)/g_StatorPoleDepth
  py8 = ((g_StatorPoleDepth - g_StatorHeightSlot -
2*g_StatorRadiusSlot)*py2 + (g_StatorHeightSlot +
2*g_StatorRadiusSlot)*py4)/g_StatorPoleDepth
  --Ставим точки p7 и p8
  mi_addnode(px7,py7)
  mi_addnode(px8,py8)
  --Строим ребро полюса статора
  --(ребро сложное - состоит из 2-х прямых и одной дуги)
  mi_addnode(px4,py4)
  mi_addsegment(px2,py2,px7,py7)
  mi_addsegment(px8,py8,px4,py4)
  --Присваиваем полученным прямым,
  --составляющим ребро полюса статора группу 5 (статор)
  mi_seteditmode("segments")
  mi_selectsegment(px2,py2)
  mi_selectsegment(px4,py4)
  mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 5)
  --Проводим дугу - вырез под клин (на ребре статора)
  mi_addarc(px7,py7,px8,py8,180,IncrementArcNumber7)
  --присваиваем полученной дуге группу 5 (статор)
  mi_seteditmode("arcsegments")
  mi_selectarcsegment(px7,py7)
  mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber7, "", 0, 5)

  -----Строим второе ребро (на соседнем полюсе статора)-----
--функция [3]. Определяет точку, которая является переданной точкой
--после поворота ее на угол
GetPointOnPointAndAngle(-px7,py7,(360/g_StatorPoles))
--(return) RF3x,RF3y
--Присваиваем значение точке p9
px9 = RF3x
py9 = RF3y
GetPointOnPointAndAngle(-px8,py8,(360/g_StatorPoles))
--(return) RF3x,RF3y
--Присваиваем значение точке p10
px10 = RF3x
py10 = RF3y
--Ставим точки p9 и p10
mi_addnode(px9,py9)
mi_addnode(px10,py10)
--Строим ребро полюса статора (ребро сложное - состоит из 2-х прямых
--и одной дуги)
mi_addsegment(px6,py6,px9,py9)
mi_addsegment(px10,py10,px5,py5)
--Присваиваем полученным прямым, составляющим ребро полюса статора
--группу 5 (статора)
mi_seteditmode("segments")

```

```

mi_selectsegment(px5,py5)
mi_selectsegment(px6,py6)
mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 5)
mi_addarc(px10,py10,px9,py9,180,IncrementArcNumber7)
--Присваиваем полученной дуге группу 5 (статор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px9,py9)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber7,"",0,5)
else

--Если углубление под клин выполнять не нужно,
--то выполняем простое построение ребер

--Строим ребро полюса ротора
mi_addnode(px4,py4)
mi_addsegment(px2,py2,px4,py4)
--Присваиваем полученному ребру полюса ротора группу 1
mi_seteditmode("segments")
mi_selectsegment(px2,py2)
mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 5)
mi_addsegment(px5,py5,px6,py6)
--Присваиваем полученному ребру следующего полюса статора группу 5
mi_seteditmode("segments")
mi_selectsegment(px6,py6)
mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 5)
end

--Определяем длину дуги в градусах, для части ярма статора

GetAngleOnTwoPoint(px4,py4,px5,py5)
--Проводим дугу части ярма ротора
mi_addarc(px4,py4,px5,py5,RAngle,IncrementArcNumber9)
--Присваиваем полученной дуге группу 5 (статор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px5,py5)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber9,"",0,5)
--Сглаживаем переход полюс ротора - ярмо ротора
--(применяем радиус сопряжения)
mi_createradius(px4,py4,g_StatorPoleRadius)
--Присваиваем полученной дуге сопряжения группу 5 (статор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px4,py4)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber8,"",0,5)
--Проводим дугу для воздуха (часть ротора)
mi_addarc(px2,py2,px6,py6,(360*(1-
g_StatorPoleAngle)/g_StatorPoles),IncrementArcNumber6)
--Присваиваем полученной дуге группу 6 (воздух в пазу статора)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px6,py6)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber6,"",0,6)
--Сглаживаем переход полюс ротора - ярмо ротора
--(используем радиус сопряжения)
mi_createradius(px5,py5,g_StatorPoleRadius)
--Присваиваем полученной дуге сопряжения группу 5 (статор)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px5,py5)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber8,"",0,5)
--Копируем полюс статора и паз статора (Ns-1) раз
--(столько, сколько имеем число полюсов ротора)
--Выделим 5-ую и 6-ую группы
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(5)
mi_selectgroup(6)
--Скопируем их столько раз, сколько имеем чисел полюсов (статора - 1),

```



```

--относительно точки (0,0)
mi_copyrotate(0,0,(360/g_StatorPoles),(g_StatorPoles-1))
--Поставим метки блоков (сталь и воздух)
mi_addblocklabel(((px1+px4)/2),((py1+py4)/2))
mi_seteditmode("blocks")
mi_setlabel(((px1+px4)/2),((py1+py4)/2))
mi_setblockprop(NameSteelStator,1,"","","",5,"")
mi_clearselected()
--функция [3]. Определяет точку, которая является переданный точкой
--после поворота ее на заданный угол
GetPointOnPointAndAngle(((px1+px4)/2),((py1+py4)/2),(180/g_StatorPoles))
--(return) RF3x,RF3y
mi_addblocklabel(RF3x,RF3y)
mi_selectlabel(RF3x,RF3y)
mi_setblockprop(NameAir,1,"","","",6,"")
mi_copyrotate(0,0,(360/g_StatorPoles),(g_StatorPoles-1))

-----Построение катушек на статоре-----

GetLineOnPointAndAngle(0,0,((108*g_StatorPoleAngle + 72)/g_StatorPoles))
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[4]/2)
--Присваиваем значения координат точке p1
px1 = RF2x
py1 = RF2y
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[5]/2)
--Присваиваем значения координат точке p2
px2 = RF2x
py2 = RF2y
GetLineOnPointAndAngle(0,0,((72*g_StatorPoleAngle + 108)/g_StatorPoles))
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[4]/2)
--Присваиваем значения координат точке p3
px3 = RF2x
py3 = RF2y
GetPoinOnCircleAndLine(Result_a,Result_b,Result_c,g_ArrayCircle[5]/2)
--Присваиваем значения координат точке p4
px4 = RF2x
py4 = RF2y
--Рассчитываем точки p5 и p6
px5 = (3*px1+px2)/4
py5 = (3*py1+py2)/4
px6 = (px1+3*px2)/4
py6 = (py1+3*py2)/4
--Рассчитываем точки p1 и p2
px1 = (3*px3+px4)/4
py1 = (3*py3+py4)/4
px2 = (px3+3*px4)/4
py2 = (py3+3*py4)/4

--После расчета всех точек начнем построение

--Построение левой нижней катушки
mi_addnode(px1,py1)
mi_addnode(px2,py2)
mi_addnode(px5,py5)
mi_addnode(px6,py6)
mi_addsegment(px1,py1,px2,py2)
mi_addsegment(px1,py1,px5,py5)
mi_addsegment(px5,py5,px6,py6)
mi_addsegment(px6,py6,px2,py2)
--Построение правой нижней катушки
mi_addnode(-px1,py1)
mi_addnode(-px2,py2)
mi_addnode(-px5,py5)
mi_addnode(-px6,py6)

```

```

mi_addsegment (-px1,py1,-px2,py2)
mi_addsegment (-px1,py1,-px5,py5)
mi_addsegment (-px5,py5,-px6,py6)
mi_addsegment (-px6,py6,-px2,py2)
--Построение левой верхней катушки
mi_addnode (px1,-py1)
mi_addnode (px2,-py2)
mi_addnode (px5,-py5)
mi_addnode (px6,-py6)
mi_addsegment (px1,-py1,px2,-py2)
mi_addsegment (px1,-py1,px5,-py5)
mi_addsegment (px5,-py5,px6,-py6)
mi_addsegment (px6,-py6,px2,-py2)
--Построение правой верхней катушки
mi_addnode (-px1,-py1)
mi_addnode (-px2,-py2)
mi_addnode (-px5,-py5)
mi_addnode (-px6,-py6)
mi_addsegment (-px1,-py1,-px2,-py2)
mi_addsegment (-px1,-py1,-px5,-py5)
mi_addsegment (-px5,-py5,-px6,-py6)
mi_addsegment (-px6,-py6,-px2,-py2)
--Присвоим построенным катушкам группу "4"
mi_seteditmode ("segments")
--Левая нижняя катушка
mi_selectsegment (((px1+px2)/2), ((py1+py2)/2))
mi_selectsegment (((px1+px5)/2), ((py1+py5)/2))
mi_selectsegment (((px5+px6)/2), ((py5+py6)/2))
mi_selectsegment (((px2+px6)/2), ((py2+py6)/2))
--Правая нижняя катушка
mi_selectsegment (((-px1-px2)/2), ((py1+py2)/2))
mi_selectsegment (((-px1-px5)/2), ((py1+py5)/2))
mi_selectsegment (((-px5-px6)/2), ((py5+py6)/2))
mi_selectsegment (((-px2-px6)/2), ((py2+py6)/2))
--Левая верхняя катушка
mi_selectsegment (((px1+px2)/2), ((-py1-py2)/2))
mi_selectsegment (((px1+px5)/2), ((-py1-py5)/2))
mi_selectsegment (((px5+px6)/2), ((-py5-py6)/2))
mi_selectsegment (((px2+px6)/2), ((-py2-py6)/2))
--Правая верхняя катушка
mi_selectsegment (((-px1-px2)/2), ((-py1-py2)/2))
mi_selectsegment (((-px1-px5)/2), ((-py1-py5)/2))
mi_selectsegment (((-px5-px6)/2), ((-py5-py6)/2))
mi_selectsegment (((-px2-px6)/2), ((-py2-py6)/2))
--Собственно реализация присвоения
mi_setsegmentprop ("", "", 1, 0, 4)
mi_clearselected()
--Ставим метку блока
mi_seteditmode ("blocks")
mi_addblocklabel (((px1+px6)/2), ((py1+py6)/2))
mi_addblocklabel (((px1+px6)/2), ((-py1-py6)/2))
mi_selectlabel (((px1+px6)/2), ((py1+py6)/2))
mi_selectlabel (((px1+px6)/2), ((-py1-py6)/2))
mi_setblockprop (NameCoilPlus, 1, "", "", "", 4, "")
mi_clearselected()
mi_addblocklabel (((-px1-px6)/2), ((py1+py6)/2))
mi_addblocklabel (((-px1-px6)/2), ((-py1-py6)/2))
mi_selectlabel (((-px1-px6)/2), ((py1+py6)/2))
mi_selectlabel (((-px1-px6)/2), ((-py1-py6)/2))
mi_setblockprop (NameCoilMinus, 1, "", "", "", 4, "")
mi_clearselected()

-----Построение шпилек на статоре-----

```

```

GetPoinOnCircleAndLine(1,0,g_StatorRadiusBolt,g_ArrayCircle[6]/2)
--Присваиваем значения координат точкам p1 и p2
px1 = RF2x
py1 = RF2y
px2 = -RF2x
py2 = RF2y
--Находим точку px5, повернутую относительно px2 на 360/g_StatorNumberBolt
--(360 градусов поделить на число шпилек)
GetPointOnPointAndAngle(px2,py2,-(360/g_StatorNumberBolt))
--Присваиваем значение точке p5
px5 = RF3x
py5 = RF3y
--Определяем точки p3 и p4
px3 = px1
py3 = py1 + g_StatorDepthsBolt
px4 = -px3
py4 = py3
--Выполняем построение всех точек (p1, p2, p3, p4 и P5)
mi_addnode(px1,py1)
mi_addnode(px2,py2)
mi_addnode(px3,py3)
mi_addnode(px4,py4)
mi_addnode(px5,py5)
--Проводим дуги
GetAngleOnTwoPoint(px5,py5,px1,py1)
mi_addarc(px5,py5,px1,py1,RAngle,IncrementArcNumber10)
mi_addarc(px4,py4,px3,py3,180,IncrementArcNumber11)
--Присваиваем полученным дугам группу 8 и 10
--(временно - после копирования с поворотом присвоим группу статора - 5)
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(px1,py1)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber10,"",0,8)
mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(px3,py3)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber11,"",0,10)
--Проводим линию (глубину залегания шпильки)
mi_addsegment(px1,py1,px3,py3)
mi_addsegment(px4,py4,px2,py2)
--Присваиваем полученным ребрам группу 9
--(временно - после копирования с поворотом присвоим группу статора - 5)
mi_seteditmode("segments")
mi_selectsegment(px1,py1)
mi_selectsegment(px2,py2)
mi_setsegmentprop("", "", 1, 0, 9)
--Выделяем группы 8, 9 и 10
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(8)
mi_selectgroup(9)
mi_selectgroup(10)
--Копируем с поворотом
mi_copyrotate(0,0,(360/g_StatorNumberBolt),(g_StatorNumberBolt-1))
--Снимаем выделение объектов
mi_clearselected()
--Присваиваем граничные условия на внешнем контуре статора ВРД и
--переименовываем всех в группу 5
--Вначале присваиваем нулевые граничные условия дугам
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(8)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber10,NameBoundary,0,5)
mi_clearselected()
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(10)
mi_setarcsegmentprop(IncrementArcNumber11,NameBoundary,0,5)
mi_clearselected()

```

```

--Присваиваем нулевые граничные условия линиям
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(9)
mi_setsegmentprop(NameBoundary,"",1,0,5)
mi_clearselected()

-----Построение статора завершено-----
-----Ставим метку блока для воздуха в воздушном зазоре-----

mi_seteditmode("blocks")
--Поставим блок - воздушный зазор и присвоим ему группу 7
--Расположим блок под самым верхним полюсом (по центру, сверху)
mi_addblocklabel(0,(g_RotorDia/2 + g_AirGap/2))
mi_selectlabel(0,(g_RotorDia/2 + g_AirGap/2))
mi_setblockprop(NameAirDelta,1,"","","7")
mi_clearselected()

--Сохраняем полученную геометрию во временный файл с именем FilePostProc
--(для дальнейшей работы 2-й части скрипта по
--исследованию полученной геометрии)
mi_saveas(MainDir..FilePostProc)

--Выполняем "скоростной" расчет для определения площади
--поперечного сечения - катушки

--Изменяем свойства плотности тока на 0
--(повышаем скорость расчета)
mi_modifymaterial(NameCoilPlus,4,0)
mi_modifymaterial(NameCoilMinus,4,0)
--Выполняем расчет и берем интеграл по площади
mi_analyze(0)
--begin_postproc
mi_loadsolution()
mo_clearblock()
mo_seteditmode("area")
mo_groupselectblock(4)
AreaCoil=mo_blockintegral(5)/4
mo_clearblock()
mo_close()
--end_postproc

--Задаем разбивку сетки в воздушном зазоре с заданной дискретностью
mi_seteditmode("group")
--Выделяем блок "воздушный зазор"
mi_selectgroup(7)
mi_setblockprop(NameAirDelta,0,MeshAir,"","7")
mi_clearselected()

--Сохраняем полученную геометрию во временный файл с именем FilePostProc
--(для дальнейшей работы 2-й части скрипта
--по исследованию полученной геометрии)
mi_saveas(MainDir..FilePostProc)

--Команды для вывода полученных результатов работы скрипта на экран
mi_refreshview()
mi_zoomnatural()

-----Расчет магнитного поля-----

--Если "ТипРасчета" таблицы, то тогда записываем все таблицы
if (TypeCalc == "onlygeom") then
  --Изменяем свойства плотности тока в зависимости от того,
  --какие заданы параметры числа витков и тока

```

```

--Расчет новой плотности тока
J=Wk*i_min/(AreaCoil*1e6)
mi_modifymaterial(NameCoilPlus,4,J)
mi_modifymaterial(NameCoilMinus,4,-J)
--Сохраняем полученную геометрию во временный файл
--с именем FilePostProc (фактически сохраняем изменения)
mi_saveas(MainDir..FilePostProc)
else
-----Подготовим файлы для вывода расчетной информации-----

--Если "ТипРасчета" таблицы, то тогда записываем все таблицы
if (TypeCalc == "table") then
-----M_teta_i.txt-----
handle=openfile(MainDir..FileNameTable.."_M_TETA-I.txt","w")
write(handle,"0")
--Вносим значения углов
for alf=alf_min,alf_max,alf_delta do
    write(handle," ",alf)
end
write(handle,"\n")
--Вносим значения момента = 0 при нулевом токе
write(handle,"0")
for alf=alf_min,alf_max,alf_delta do
    write(handle," 0")
end
write(handle,"\n")
closefile(handle)
-----PSI_teta_i.txt-----
handle=openfile(MainDir..FileNameTable.."_PSI_TETA-I.txt","w")
write(handle,"0")
--Вносим значения углов
for alf=alf_min,alf_max,alf_delta do
    write(handle," ",alf)
end
write(handle,"\n")
--Вносим значения потокосцепления = 0 при нулевом токе
write(handle,"0")
for alf=alf_min,alf_max,alf_delta do
    write(handle," 0")
end
write(handle,"\n")
closefile(handle)
end
if (TypeCalc == "optiy") then
    --Обнуляем переменную-счетчик
    NumberCalcFem = 0
end

--Непосредственно расчет таблиц
--Зададимся последовательно рядом значений тока, [A],
--[i_min...i_max], с шагом i_delta
for i=i_min,i_max,i_delta do
    if (TypeCalc == "table") then
        handle=openfile(MainDir..FileNameTable.."_M_TETA-
I.txt","a");write(handle,i);closefile(handle)
        handle=openfile(MainDir..FileNameTable.."_PSI_TETA-
I.txt","a");write(handle,i);closefile(handle)
    end
    --В цикле осуществим поворот на заданный угол
    --В диапазоне (alf_max...alf_min) с шагом alf_delta
    for alf=alf_max,alf_min,-alf_delta do
        open(MainDir..FilePostProc)
        --Расчет новой плотности тока
        J=Wk*i/(AreaCoil*1e6)
    end
end

```

```

mi_modifymaterial (NameCoilPlus,4,J)
mi_modifymaterial (NameCoilMinus,4,-J)
mi_seteditmode ("group")
--Выделим блок "ротор"
mi_selectgroup (1)
--Выделим пространство между полюсами ротора
mi_selectgroup (2)
--Выделим блок "вал"
mi_selectgroup (3)
--Поворачиваем ротор
mi_moverotate (0,0,-alf)
mi_saveas (MainDir..FileTempPostProc)
mi_analyze (0)
-----postproc-----
mi_loadsolution ()
--Рассчитаем индуктивность фазы [мН] и потокосцепление
mo_clearblock ()
mo_seteditmode ("area")
mo_groupselectblock (4)
A=mo_blockintegral (0)
PSI=A/i
mo_clearblock ()
--Рассчитаем момент
mo_seteditmode ("area")
mo_groupselectblock (1)
M=mo_blockintegral (22)
if (TypeCalc == "table") then
--Запишем момент M, Нм в файл M_teta_i.txt
handle=openfile (MainDir..FileNameTable.."_M_TETA-
I.txt", "a"); write (handle, " ", M); closefile (handle)
--Запишем потокосцепление PSI, Вб в файл PSI_teta_i.txt
handle=openfile (MainDir..FileNameTable.."_PSI_TETA-
I.txt", "a"); write (handle, " ", PSI); closefile (handle)
end
if (TypeCalc == "optiy") then
NumberCalcFem = NumberCalcFem + 1
--Запишем момент M, Нм в массив моментов
ArrayM[NumberCalcFem] = M
end
mo_close ()
mi_close ()
-----
end
if (TypeCalc == "table") then
handle=openfile (MainDir..FileNameTable.."_M_TETA-
I.txt", "a"); write (handle, "\n"); closefile (handle)
handle=openfile (MainDir..FileNameTable.."_PSI_TETA-
I.txt", "a"); write (handle, "\n"); closefile (handle)
end
if (TypeCalc == "optiy") then
--Записываем критерий (функцию-свертку) для программы оптимизации
--Расчет коэффициента пульсаций для статики
--(при одном заданном токе - см. задание переменных в начале)
--Инициализируем переменные
MaxMoment = 0
MinMoment = 1e16
MiddleMoment = 0
for i_temp=1,NumberCalcFem,1 do
if MaxMoment < ArrayM[i_temp] then
MaxMoment = ArrayM[i_temp]
end
if MinMoment > ArrayM[i_temp] then
MinMoment = ArrayM[i_temp]
end
end

```

```

        MiddleMoment = MiddleMoment + ArrayM[i_temp]
    end
    --Рассчитываем из суммарного по всем точкам момента - средний ЭММ
    MiddleMoment = MiddleMoment/NumberCalcFem
    --Рассчитываем собственно сам критерий
    --(в данном случае - коэффициент пульсаций)
    KoefPul = (MaxMoment - MinMoment)/2*MiddleMoment
    --Записываем полученный результат (значение критерия) в файл
    out = openfile(MainDir.."output.txt", "w");
    write (out,"Kp=" , KoefPul, "\n");
    --Записываем остальные важные параметры
    write (out,"Mcp=" , MiddleMoment, "\n");
    write (out,"M(07.5)=" , ArrayM[1], "\n");
    write (out,"M(10.0)=" , ArrayM[2], "\n");
    write (out,"M(12.5)=" , ArrayM[3], "\n");
    write (out,"M(15.0)=" , ArrayM[4], "\n");
    write (out,"M(17.5)=" , ArrayM[5], "\n");
    write (out,"M(20.0)=" , ArrayM[6], "\n");
    write (out,"M(22.5)=" , ArrayM[7], "\n");
    closefile(out);
end
end
end
--End-----

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Регрессионные математические модели

Двумерные регрессионные уравнения шестого порядка, описывающие распределение коэффициента пульсаций ( $K_{\Pi}$ ) и среднего электромагнитного момента ( $M_{CP}$ ) на периоде коммутации, для различных вариантов конструкций приведены ниже (таблицы Г.1 – Г.9). Пример регрессионных уравнений для первой конструкции приведен в разделе 4.1.

Таблица Г.1 – Регр. модель в табличном виде для первой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэф-ты регр. модели описывающей $K_{\Pi}$	Коэф-ты регр. модели описывающей $M_{CP}$
1	5	5361.646337	3845.521701
0	6	1445.139223	1354.877404
0	5	-6246.835564	-4981.182485
0	4	8508.144540	6132.108829
1	4	-8595.038705	-5391.658726
2	4	-2420.536939	-2525.050624
0	3	-5201.187140	-3381.381167
1	3	3693.994301	1303.031504
2	3	6742.665534	6427.173558
3	3	-1929.245203	-1664.786872
0	2	1554.509271	850.542357
1	2	114.246010	1145.691096
2	2	-5093.209783	-5535.500126
3	2	1574.858652	2571.315348
4	2	334.443791	-334.443791
0	1	-243.793143	-97.503210
1	1	-44.168348	-395.237932
2	1	200.223741	917.677101
3	1	2257.516726	953.571712
4	1	-2959.242276	-2016.779672
5	1	1123.731139	945.807042
0	0	30.786410	21.118230
1	0	-179.774425	-180.924580
2	0	903.100808	1065.104108
3	0	-2393.830360	-3094.911440
4	0	2983.600685	4424.126496
5	0	-1727.760946	-3130.778759
6	0	344.571174	867.775964
Средняя погрешность, %		5.8	0.7



Таблица Г.2. –Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для второй конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	6750.906843	-4681925.362573
0	6	1301.052857	-2202402.484575
0	5	-6568.800327	7879910.809932
0	4	9545.211845	-9911026.206347
1	4	-11591.345334	7264760.652639
2	4	-2148.801359	2095453.393429
0	3	-6135.832691	5767471.029010
1	3	6100.245704	-2437257.524053
2	3	6716.746141	-6640170.496658
3	3	-2280.411184	2168588.663652
0	2	1933.072250	-1627378.988678
1	2	-725.528565	-897086.323967
2	2	-5471.509383	5565066.581936
3	2	2161.110748	-2112618.395860
4	2	259.193938	-261944.738389
0	1	-314.067870	182761.625277
1	1	68.035069	801848.429090
2	1	435.481515	-2585087.533652
3	1	1939.165255	2300752.451383
4	1	-2844.611666	-1437133.482265
5	1	1090.955647	625716.909008
0	0	33.895413	-3853.284891
1	0	-158.182758	-107181.055513
2	0	724.255964	251312.715201
3	0	-1905.768354	-32341.681481
4	0	2212.644574	-368204.173326
5	0	-1054.659654	481137.254887
6	0	102.365362	-219800.391347
Средняя погрешность, %		9.4	0.7

Таблица Г.3 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для третьей конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	-5544099.791144	6750.906843
0	6	-1171405.150862	1301.052857
0	5	5885829.931563	-6568.800327
0	4	-8405635.309085	9545.211845
1	4	9088566.299905	-11591.345334
2	4	1874047.423084	-2148.801359
0	3	5195232.347250	-6135.832691
1	3	-3782860.877952	6100.245704
2	3	-6676059.520543	6716.746141
3	3	2445311.791902	-2280.411184
0	2	-1523543.528518	1933.072250
1	2	-322435.786919	-725.528565
2	2	5293126.290977	-5471.509383
3	2	-1694230.931696	2161.110748
4	2	-643904.631263	259.193938
0	1	178456.717626	-314.067870
1	1	661853.005700	68.035069
2	1	-2438800.653084	435.481515
3	1	2160138.488993	1939.165255
4	1	-1480391.027500	-2844.611666
5	1	767817.393690	1090.955647
0	0	-2626.268722	33.895413
1	0	-118511.005905	-158.182758
2	0	369196.731592	724.255964
3	0	-409567.144187	-1905.768354
4	0	254344.964732	2212.644574
5	0	-25662.905425	-1054.659654
6	0	-65719.406725	102.365362
Средняя погрешность, %		11.9	0.7

Таблица Г.4 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для четвертой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	2066275.555556	650.158730
0	6	-9632929.082660	11007.403254
0	5	20780954.435985	-25181.387480
0	4	-17463776.341006	23204.168579
1	4	-8109984.603175	1258.253968
2	4	4282148.148148	-2613.756614
0	3	6981886.377743	-10806.500694
1	3	10464800.101052	-4135.054086
2	3	-9219241.243713	6766.019988
3	3	1940073.362800	-1916.780979
0	2	-1210943.642428	2524.079854
1	2	-6152353.714653	3934.192271
2	2	7226665.596708	-7781.519274
3	2	-2746692.037364	5536.743092
4	2	185909.465021	-1688.418577
0	1	36102.869930	-218.903368
1	1	1538081.806008	-1654.936343
2	1	-1732774.368407	4084.726258
3	1	-224895.976862	-4537.860605
4	1	1401006.137566	2475.579071
5	1	-647311.275720	-461.532432
0	0	6818.321337	20.682157
1	0	-115313.856804	-75.644289
2	0	-2556.107068	956.219378
3	0	524981.032463	-3515.573367
4	0	-870624.226433	6011.398730
5	0	561513.556112	-5022.409223
6	0	-124637.421159	1653.775926
Средняя погрешность, %		8.8	0.3

Таблица Г.5 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для пятой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	-2836500.317460	2092.698413
0	6	-3701718.911828	9217.552896
0	5	9861874.789709	-21893.017826
0	4	-9838369.157013	20997.475004
1	4	2279943.968254	-2159.523810
2	4	2987862.433862	-1809.523810
0	3	4499364.387539	-10227.112997
1	3	2401597.822261	-1008.513097
2	3	-8149338.075642	5415.703181
3	3	2368580.399329	-1796.474115
0	2	-822792.399024	2514.441804
1	2	-3505540.768424	2645.227083
2	2	7814328.510960	-7202.881498
3	2	-4120857.142857	5723.090992
4	2	618210.464433	-1857.730747
0	1	-8717.110309	-239.132555
1	1	1347669.489972	-1392.427657
2	1	-2803536.088560	3887.863753
3	1	1589312.098678	-4361.979518
4	1	89855.238095	2187.184009
5	1	-255666.893984	-274.912796
0	0	11800.755715	23.178609
1	0	-139268.502065	-90.179655
2	0	187015.395152	908.672199
3	0	265050.230232	-3245.112411
4	0	-795692.763976	5412.958934
5	0	684968.517231	-4366.623088
6	0	-210078.165970	1366.631502
Средняя погрешность, %		9	0.3

Таблица Г.6 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для шестой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	-1667423.492064	-904.126984
0	6	-3261544.451320	9733.091931
0	5	8324539.523405	-21667.583829
0	4	-8005547.208796	19210.877025
1	4	484544.285714	4532.698413
2	4	2642232.804233	-2835.978836
0	3	3526215.899596	-8438.265868
1	3	2947383.235940	-6839.811353
2	3	-6574109.778562	7240.708080
3	3	1629795.458009	-2064.725906
0	2	-564755.512732	1735.127650
1	2	-3463948.285620	5174.349752
2	2	7066281.315193	-8512.342320
3	2	-4259823.398001	6179.371611
4	2	1096037.624927	-1918.871252
0	1	-46345.455385	-77.259591
1	1	1352149.416847	-1951.558601
2	1	-2838737.238139	4376.028338
3	1	2002329.012825	-4790.188371
4	1	-256232.851264	2514.473839
5	1	-262660.113659	-417.385851
0	0	12049.332433	7.244426
1	0	-113934.740225	-0.373320
2	0	52450.926751	612.813683
3	0	642745.418249	-2465.329002
4	0	-1443033.462149	4172.090901
5	0	1250926.128898	-3313.114805
6	0	-395215.657117	1001.312441
Средняя погрешность, %		12.1	0.3

Таблица Г.7 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для седьмой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	1498383.100137	-2389.935332
0	6	-1358821.212198	2483.565916
0	5	2974456.833367	-5617.766957
0	4	-2405524.474850	4775.034890
1	4	-4069529.233784	6529.006467
2	4	1024790.123457	-1481.481481
0	3	960607.410886	-1682.867743
1	3	3154813.782220	-7777.711963
2	3	690192.279052	5342.068935
3	3	-1982566.072245	-2254.940812
0	2	-197391.900265	55.803269
1	2	-1148148.736038	4883.355417
2	2	-590451.422693	-6150.416095
3	2	387911.503037	4409.933155
4	2	1165481.481481	-814.814815
0	1	15045.004673	46.831513
1	1	236402.982963	-796.203750
2	1	60120.582040	-894.692934
3	1	11907.599843	6375.747752
4	1	-13678.201058	-10001.957672
5	1	-477368.888889	5109.841270
0	0	-15711.667254	83.558661
1	0	238167.978076	-1222.173594
2	0	-1696795.717206	7562.908394
3	0	5838339.375911	-23243.880896
4	0	-11125174.779999	38723.657677
5	0	11129992.979885	-33458.995088
6	0	-4508985.482308	11786.098291
Средняя погрешность, %		4.5	0.4

Таблица Г.8 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для восьмой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	3010600.133255	-1836.096414
0	6	-1704493.797454	2875.225149
0	5	2924288.006677	-6904.665049
0	4	-1157692.669847	6440.224249
1	4	-8044903.970214	5461.305115
2	4	1841251.028807	-1754.262199
0	3	-585191.054970	-2721.346408
1	3	7658880.854574	-7280.696613
2	3	-1761641.596447	6210.734426
3	3	-1316950.464868	-2371.996139
0	2	596417.708140	389.689573
1	2	-3473737.400091	4788.934670
2	2	782588.739957	-6315.850713
3	2	817449.866092	3683.144991
4	2	435851.851852	-391.534392
0	1	-165600.302431	-16.436632
1	1	717687.749581	-658.679494
2	1	85930.722888	-1543.108337
3	1	-956744.470050	8023.815163
4	1	881847.407407	-11563.439153
5	1	-607156.825397	5709.206349
0	0	11809.563816	87.663597
1	0	20590.064231	-1220.141582
2	0	-615972.629843	7466.879547
3	0	2371350.548376	-22661.655603
4	0	-4694812.785433	37188.641826
5	0	4866966.177806	-31626.452916
6	0	-2027770.614390	10938.478268
Средняя погрешность, %		7.9	0.5

Таблица Г.9 – Регрессионная модель представленная  
в табличном виде для девятой конструкции

Показатель степени при $\alpha_S$	Показатель степени при $\alpha_R$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $K_{II}$	Коэффициенты регрессионной модели описывающей $M_{CP}$
1	5	2852434.975505	-2205.322359
0	6	-1411396.217063	2640.992205
0	5	2238928.001268	-6068.502116
0	4	-656685.497921	5348.860808
1	4	-6992337.182050	6044.413090
2	4	1017998.824221	-1552.028219
0	3	-743821.418549	-2002.146473
1	3	6823107.195216	-7827.803892
2	3	-1895301.082152	6513.797984
3	3	-160177.208759	-2903.622415
0	2	668866.014597	107.370642
1	2	-3710089.756443	5313.184204
2	2	2839702.173978	-7476.830249
3	2	-2235262.298866	5158.211945
4	2	1384275.132275	-825.396825
0	1	-230086.735523	89.105311
1	1	1363462.268188	-1389.075542
2	1	-2791675.231044	1510.930881
3	1	4572218.127333	1445.248895
4	1	-4184873.756614	-4425.714286
5	1	1391065.396825	2488.888889
0	0	6584.143691	67.316907
1	0	143894.397227	-1015.865826
2	0	-1589416.887912	6538.253494
3	0	6163419.114597	-20548.466312
4	0	-12390575.803384	34795.187885
5	0	12761209.785536	-30558.038737
6	0	-5302034.338555	10969.165518
Средняя погрешность, %		9.2	0.4



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Табличные данные вентильно-реактивного двигателя  
для привода активатора маслобойки

Таблица Д.1 – Результаты испытаний экспериментального образца ВРД

М, Н·м	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	I1, А
0.980	242.5	154.235	0.636	0.898
0.825	207.5	129.840	0.626	0.769
0.685	174.0	107.807	0.620	0.644
0.590	151.0	92.855	0.615	0.559
0.500	130.0	78.691	0.605	0.481
0.385	102.0	60.592	0.594	0.378
0.310	84.0	48.788	0.581	0.311
0.220	62.0	34.624	0.558	0.230
0.150	45.0	23.607	0.525	0.167
0.075	26.0	11.804	0.454	0.096
0.040	16.0	6.295	0.393	0.059

Таблица Д.2 – Результаты математического моделирования ВРД

М, Н·м	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	I1, А
0.980	225.59	153.93	0.682	0.836
0.825	190.50	129.29	0.679	0.706
0.685	161.97	107.64	0.665	0.600
0.590	139.96	92.44	0.660	0.518
0.500	120.44	78.72	0.654	0.446
0.385	94.26	60.53	0.642	0.349
0.310	77.13	48.52	0.629	0.286
0.220	58.15	34.83	0.599	0.215
0.150	41.37	23.60	0.570	0.153
0.075	24.78	11.74	0.474	0.092

Таблица Д.3 – Результаты испытаний экспериментального образца однофазного конденсаторного двигателя КД-120

М, Н·м	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	I1, А
0.670	196	80.049	0.408	0.880
0.640	170	84.172	0.495	0.765
0.573	152	79.020	0.520	0.680
0.500	136	71.204	0.524	0.610
0.435	124	63.086	0.509	0.560
0.360	115	53.190	0.463	0.515
0.295	106	44.111	0.416	0.480
0.205	97	31.061	0.320	0.445
0.140	90	21.447	0.238	0.420
0.075	84	11.584	0.138	0.400
0.025	79	3.882	0.049	0.390

Таблица Д.4 – Результаты расчетов квазиустановившегося режима работы с различными параметрами зоны коммутации

Исходные данные			Результаты моделирования			
$T_{КОМ}$	$\theta_{ON}$	$\theta_{OFF}$	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	$K_{II}$ , о.е.
13	1	14	111,72	78,9	0,706	0,765
13	2	15	112,06	79,2	0,706	0,669
13	3	16	113,19	78,62	0,695	0,655
13	4	17	112,21	77,98	0,695	0,644
13	5	18	115,69	78,34	0,677	0,655
13	6	19	118,9	78,31	0,659	0,669
13	7	20	121,87	78,53	0,644	0,661

Таблица Д.4 – Результаты расчетов квазиустановившегося режима работы с различными параметрами зоны коммутации

Исходные данные			Результаты моделирования			
$T_{КОМ}$	$\theta_{ОН}$	$\theta_{ОФФ}$	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	$K_{II}$ , о.е.
13	8	21	126,21	78,73	0,624	0,682
13	9	22	129,84	78,51	0,605	0,708
13	10	23	134,48	78,55	0,584	0,771
14	1	15	112,51	79,16	0,704	0,657
14	2	16	112,24	78,23	0,697	0,535
14	3	17	111,88	78,08	0,698	0,507
14	4	18	116,95	78,93	0,675	0,491
14	5	19	118,05	78,6	0,666	0,497
14	6	20	120,73	78,43	0,65	0,479
14	7	21	121,08	78,5	0,633	0,539
14	8	22	127,68	78,6	0,616	0,549
14	9	23	133,06	78,62	0,591	0,605
14	10	24	138,87	78,42	0,565	0,696
15	1	16	112,4	78,47	0,698	0,532
15	2	17	112,24	78,11	0,696	0,416
15	3	18	114,6	78,33	0,684	0,363
15	4	19	118,11	78,84	0,668	0,335
15	5	20	119,4	78,44	0,657	0,343
15	6	21	123,25	78,72	0,639	0,398
15	7	22	126,5	78,73	0,622	0,424

Таблица Д.4 – Результаты расчетов квазиустановившегося режима работы с различными параметрами зоны коммутации

Исходные данные			Результаты моделирования			
$T_{КОМ}$	$\theta_{ON}$	$\theta_{OFF}$	P1, Вт	P2, Вт	КПД, о.е.	$K_{II}$ , о.е.
15	8	23	131,03	78,62	0,6	0,478
15	9	24	136,68	78,44	0,574	0,563
15	10	25	145,44	78,63	0,541	0,647
16	1	17	112,8	78,14	0,693	0,437
16	2	18	116,4	79	0,682	0,307
16	3	19	116,35	79,16	0,68	0,232
16	4	20	115,53	77,96	0,675	0,281
16	5	21	122,58	78,92	0,644	0,321
16	6	22	125,8	78,97	0,628	0,359
16	7	23	129,68	78,63	0,606	0,403
16	8	24	135,54	78,45	0,579	0,462
16	9	25	142,77	78,63	0,551	0,54
16	10	26	154,44	78,48	0,508	0,665
17	1	18	114,07	78,24	0,686	0,307
17	2	19	115,92	78,43	0,677	0,206
17	3	20	118,65	78,89	0,665	0,214
17	4	21	120,92	78,92	0,653	0,322
17	5	22	124,04	78,98	0,637	0,337
17	6	23	128,62	78,94	0,614	0,373
17	7	24	134,66	78,95	0,596	0,411

Таблица Д.4 – Результаты расчетов квазиустановившегося режима работы с различными параметрами зоны коммутации

Исходные данные			Результаты моделирования			
$T_{КОМ}$	$\theta_{ОН}$	$\theta_{ОФФ}$	Р1, Вт	Р2, Вт	КПД, о.е.	$K_{II}$ , о.е.
17	8	25	140,52	78,41	0,558	0,478
17	9	26	151,36	78,55	0,519	0,579
17	10	27	170,2	78,61	0,462	0,737