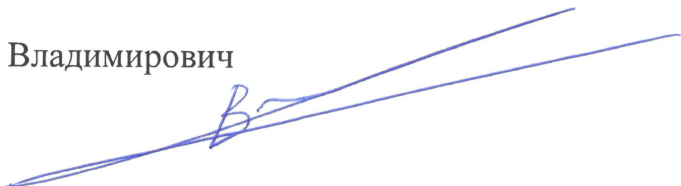


Воронежский государственный технический университет

На правах рукописи

Крутских Сергей Владимирович



СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Специальность: 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Кононенко К.Е.

Воронеж – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ТЕОРИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ	11
1.1 Основные положения, используемые при расчетах	11
1.2 Разработка серий асинхронных двигателей	15
1.3 Расчет электромагнитного поля в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором и некоторые результаты, полученные к настоящему времени	19
1.4 Выводы и постановка задачи	22
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ	23
2.1 Основные допущения	23
2.2 Определение параметров модели	27
2.3 Моделирование формы паза	37
2.4 Влияние соотношений чисел пазов статора и ротора на эффективность электромеханического преобразования	49
2.5 Выводы	58
3 ФОРМИРОВАНИЕ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ	60
3.1 Пульсации электромагнитного вращающего момента в электродвигателе 4A132S4	60
3.2 Влияние числа пазов ротора на электромагнитный момент двигателя 4A132S4	64
3.3 Влияние суммарной площади проводникового материала ротора в его поперечном сечении на электромагнитный момент вращения для четырёхполюсного асинхронного двигателя мощностью 15 кВт	68
3.4 Влияние суммарной площади проводникового материала ротора в его поперечном сечении на электромагнитный момент вращения для четырёхполюсного асинхронного двигателя мощностью 0,75 кВт	74

3.5 Выводы	83
4 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И РАСЧЕТ ПУСКА	84
4.1 Параметры асинхронного двигателя постоянны при пуске	84
4.2 Пуск асинхронного двигателя в условиях изменения параметров схемы замещения	93
4.3 Пуск асинхронного двигателя в условиях учета механического демпфирования в двигателе и соединения его с нагрузкой при помощи упругой муфты.....	99
4.4 Выводы	113
5 СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ	114
5.1 Определение потерь холостого хода и данных к построению круговой диаграммы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	114
5.2 Построение механической характеристики экспериментально при помощи электромагнитного тормоза	119
5.3 Отработка предлагаемых решений в условиях серийного завода	125
5.4 Рекомендации к проектированию трехфазных асинхронных двигателей в части требований к геометрии пазовой зоны ротора	130
5.5 Выводы	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
ЛИТЕРАТУРА.....	134
ПРИЛОЖЕНИЯ	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются сегодня наиболее часто используемым двигателем в современных системах электропривода. Они широко распространены в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и быту. Теория этих электрических машин стройно и логично изложена в учебниках отечественных и зарубежных авторов, которые являются крупными и широко известными учеными, конструкторами и профессорами высших учебных заведений. Большой вклад в развитие теории и практического применения внесли следующие ученые: Беспалов В.Я., Вольдек А.И., Гаинцев Ю.В., Гайтов Б.Х., Гамата В., Геллер Б., Гольдберг О.Д., Гусельников Э.М., Данилевич Я.Б., Домбровский В.В., Иванов-Смоленский А.И., Каасик П.Ю., Казовский Е.Я., Костенко М.П., Кравчик А.Э., Кравчик Э.Д., Макаров Л.Я., Макаров Ф.К., Муравлев О.П., Петров В.М., Постников И.М., Похолков Ю.П., Стрельбицкий Э.К., Сорокер Т.Г., Радин В.И. и многие другие.

В последнее время проблема энергосбережения в асинхронных двигателях выходит на передний план. Для ее достижения разработчики идут на некоторое увеличение себестоимости машины понимая, что сделанные затраты при производстве асинхронных двигателей многократно окупятся при их эксплуатации. Надо отметить, что в этом направлении есть много неиспользованных возможностей: разработчики часто не проводят с потребителями рекламных компаний, которые бы показывали явные преимущества энергоэффективных асинхронных двигателей над стандартными изделиями. Дело в том, что отпускная цена энергоэффективных асинхронных двигателей, конечно, будет несколько больше, чем у стандартных. Выигрыш получится при эксплуатации. Он будет ощутимым.

Для достижения энергоэффективности наряду с применением прогрессивных материалов, увеличением активных размеров существует способ с относительно небольшими затратами получить прирост КПД. Речь

идет о формировании пазовой зоны ротора, когда для получения окончательного варианта конструкции разработчик выполняет параметрическую оптимизацию пазовой зоны ротора. Для статора сделать это многократно труднее после того, как сформирована схема обмотки и пазовая зона с заполнением пазов изоляцией и обмоточным проводом.

Как правило, современные конструкторские подразделения, занятые проектированием асинхронных двигателей имеют в своем распоряжении программное обеспечение для расчета электромагнитного поля методом конечных элементов. В этом смысле имеются все предпосылки для успешного решения задачи.

Таким образом, на основании изложенного выше актуальность темы исследования определена необходимостью создания энергоэффективных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Диссертационная работа выполнялась в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Совершенствование проектирования электромеханических систем на основе аналитических методов и численного моделирования» ГРНТИ 45.29.02; 45.29.31; 45.29.33, а также в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Исследование и оптимизация специальных электрических машин» ГРНТИ 45.29.02; 45.29.31; 45.29.33.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является развитие методики проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в части рационального расчета пазовой зоны ротора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Выполнить моделирование трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором разных серий мощностью 0,75; 7,5; и 15 кВт обеспечив повышение энергоэффективности.

2. Предложить варианты конструкции магнитной системы ротора, позволяющей улучшить энергоэффективность работы трехфазного асинхронного рассматриваемого диапазона мощностей.

3. Сформулировать требования к проектированию усовершенствованной зубцовой зоны ротора энергоэффективных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

4. Провести экспериментальные исследования для подтверждения правильности используемого метода расчета. В том числе, в условиях серийного завода изготовить новые ротора и испытать двигатели с их использованием.

Методы исследований. При проведении исследований, посвященных обозначенным вопросам, использовались методы теории электрических и магнитных цепей и методы теории поля. Теоретические исследования проводились на базе широко известных, прошедших практическую апробацию математических методов. Для подтверждения достоверности полученных результатов использовался метод физического эксперимента в условиях и на оборудовании серийного производства.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

- научно обоснованы и дополнены рекомендации к проектированию ротора энергоэффективного асинхронного двигателя: знать только соотношения пазов ротора и статора с характеристиками их формы необходимо, но недостаточно;
- выдвинута и подтверждена научная идея о том, что для каждой пары чисел пазов ротора и статора, геометрического очертания их формы, существует некоторая суммарная площадь пазов ротора, которая повышает эффективность преобразования энергии в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором;
- варьирование в широких пределах геометрическими параметрами зубцовых зон листов ротора позволило выявить новые закономерности их

влияния на способность асинхронного двигателя к эффективному преобразованию энергии.

Практическая значимость работы. Практическую ценность диссертационной работы составляют:

- рекомендации к проектированию пазовой зоны ротора асинхронных двигателей;
- результаты физического эксперимента, выполненные в условиях серийного производства и подтверждающего основные положения диссертационной работы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- варьирование в широких пределах геометрическими параметрами зубцовых зон ротора позволило выявить способность асинхронного двигателя к эффективному преобразованию энергии с одновременным улучшением пусковых свойств, что ранее считалось трудно достижимым;
- проведенные исследования эффективности магнитных систем двигателей мощностей 0,75; 7,5 и 15 кВт показали, что изменение соотношения между площадью пазов ротора и площадью стали магнитопроводов ротора позволяют получить лучшие результаты в энергоэффективности;
- проведенные испытания на физических образцах электродвигателей с новыми роторами, спроектированным в соответствии и рекомендациями теоретических разделов данной работы, дали положительные результаты: КПД в модернизируемом электродвигателе возрос при одновременном увеличении коэффициента мощности и пускового момента.

Реализация результатов работы. Полученные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы реализованы на предприятии ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО» г. Медногорск, а также внедрены в учебный процесс кафедры «Электромеханических систем и электроснабжения» ГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» в лекционные курсы «Проектирование электрических машин» и

«Математическое моделирование и переходные процессы электрических машин».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались: на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава кафедры электромеханических систем и электроснабжения в рамках всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении производстве» (Воронеж, 2008, 2011); на всероссийской научной конференции «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники» (Воронеж, 2011, 2013). Всего по теме диссертации было опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 70 наименований. Работа изложена на 148 страницах, на которых приведены 18 таблиц, 92 рисунка и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов проведенных исследований, показана структура диссертации, дана общая характеристика работы.

В первом разделе рассмотрена теория асинхронных двигателей и методы их расчета с учетом современных возможностей. Показаны основные положения, используемые при расчете асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Рассмотрена история создания серий асинхронных двигателей в нашей стране. Показано, что совершенные методики расчета асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в большей или меньшей степени затрагивают расчет электромагнитного поля. Из методов расчета поля на сегодня численный метод конечных элементов занял основное место благодаря своим положительным свойствам: получать точный результат в определении электромагнитного вращающего момента, несмотря на возможную погрешность определения векторных магнитных потенциалов. Произведен обзор ряда научных положений, достигнутых в области теории

асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В завершении раздела определена цель и сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе рассматривается подход к моделированию электромагнитного поля, который послужил основой для настоящих исследований. Рассмотрены основные допущения и параметры модели. При моделировании влияния формы паза ротора на характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором было показано, что этот параметр является неосновным в ответе на вопрос, как следует проектировать ротор асинхронного двигателя. Определение рационального соотношения чисел пазов ротора и статора в дополнение к форме паза также является недостаточным.

В качестве объекта анализа выбраны асинхронные двигатели серии 4А малой и средней мощности. Показано, как без увеличения объема активных материалов и, не изменяя технологию изготовления двигателя, можно улучшить рабочие и пусковые характеристики. Используя результаты параметрической оптимизации, предложены конструкции пазовой зоны (листов ротора) для энергоэффективных исполнений.

В третьем разделе произведен поиск оптимальных зубцовых зон ротора, позволяющих без привлечения новых технологий и материалов получать повышение энергоэффективности асинхронных двигателей. Анализ были подвергнуты асинхронные двигатели мощностью от 0,75 до 15 кВт. Рассмотрены основные режимы: установившийся пусковой и режим при номинальном скольжении, когда токи в обмотки статора заданы номинальными. Об эффективности магнитопровода ротора, которому было уделено основное внимание, судили по получаемой величине электромагнитного вращающего момента. В результате проведенной параметрической оптимизации предложены новые соотношения в параметрах листа ротора, увеличивающие эффективность электромеханического преобразования энергии.

В четвертом разделе рассмотрены переходные процессы при пуске асинхронного двигателя. Показано как влияют переменные параметры и упругая муфта на время пуска.

В пятом разделе произведены испытания асинхронного двигателя типа 4A132S4Y2 в режиме холостого хода и короткого замыкания. Этот же двигатель был испытан под нагрузкой, роль которой выполнял электромагнитный порошковый тормоз ПТ-16М1. Снятая экспериментально механическая характеристика двигателя была сравнена с рассчитанной, когда при расчете поля использовался метод конечных элементов. Затем в условиях серийного производства была выполнена модернизация двигателя АДМ132 мощностью 7,5 кВт. Новые ротора были испытаны в сборе со штатными роторами. Испытания дали положительный результат. Здесь же приведены рекомендации по проектированию.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований, а также обоснована возможность повышения энергетических характеристик асинхронных двигателей.

В приложениях приведены акт внедрения результатов диссертационной работы и протоколы испытаний новых и серийного двигателя.

1 ТЕОРИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

1.1 Основные положения, используемые при расчетах

Асинхронный двигатель является по праву основой современного электропривода. Такое преимущественное положение ему придает ряд специфических черт: простота конструкции, надежность, отсутствие скользящих контактов и невысокая себестоимость изготовления. В 1889 году Доливо-Добровольский М.О. получил патент на первую работоспособную конструкцию трехфазного асинхронного двигателя. Эта конструкция с небольшими доработками сохранила свои основные черты и в настоящее время. Основная идея, предложенная М.О. Доливо-Добровольским, заключалась в том, что обмотка ротора была помещена в ферромагнитный сердечник. До этого клетка ротора размещалась в воздухе. Этим способом, как очевидно современным исследователям, достигалось значительно лучшее сцепление полей обмоток статора и ротора. Как показали последние исследования в этом направлении остались некоторые резервы. Поясним причины, по которым они долгое время оставались неизученными.

Конструкция двигателя, обладая кажущейся простотой, скрывает за собой сложные процессы электромеханического преобразования энергии электромагнитного поля, которые описываются системой уравнений Максвелла в частных производных [1-4].

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0. \quad (1.4)$$

Условные сокращения переменных, входящих в систему уравнений (1.1) – (1.4) известны:

$\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля [В/м];

$\vec{B}$ - вектор магнитной индукции [Тл];

$\vec{H}$ - вектор напряженности магнитного поля [А/м];

$\vec{J}$ - вектор плотности электрического тока [А/м²];

$\vec{D}$ - вектор электрической индукции [Кл/м²];

ρ - плотность электрического заряда [Кл/м³].

Уравнения в частных производных дополняют следующими соотношениями, которые учитывают свойства среды:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}; \quad \vec{J} = \gamma \vec{E}. \quad (1.5)$$

В этих выражениях γ - удельная проводимость среды; ϵ - абсолютная диэлектрическая проницаемость; μ - абсолютная магнитная проницаемость. В анизотропных средах эти величины являются тензорами второго ранга [1, 3].

Уравнения поля в отличие от обыкновенных дифференциальных уравнений имеют в общем случае множество линейно независимых друг от друга решений. В каждом конкретном случае, определяемым режимом работы, в электрической машине существует единственная картина поля, чему соответствует единственное решение. Выбор единственного решения, удовлетворяющего поставленной задаче, осуществляется с помощью граничных условий [1, 3].

Несмотря на относительную простоту конструкции асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, его теория вызывает несомненные сложности при проектировании и анализе асинхронных машин, поскольку границы зубчатых магнитопроводов делают задачу исследования аналитического решения уравнений трудно выполнимой. Дифференциальные уравнения в частных производных, которыми описывается электромагнитное

поле в асинхронных двигателях, полученные Максвеллом Д.К. в 1861 году, долгое время не могли быть решены математиками и инженерами электриками. Причиной этого были ограниченные возможности расчета таких уравнений с одной стороны, и неоднозначность формул для расчета электромагнитных сил и моментов с другой [4].

В трудах отечественных и зарубежных ученых изложение теории электрических машин, и асинхронных в частности, начиналось с помощью введения допущений идеализированной электрической машины [5-10], что значительно упрощало расчеты. А точнее делало инженерные расчеты асинхронных машин вообще возможными.

К основным допущениям относится гладкость воздушного зазора, то есть отсутствие пазов на роторе и статоре, когда их влияние на работу машины учитывается при помощи коэффициента воздушного зазора. Проводники обмотки в этом случае считают за равномерно распределенные токовые слои в воздушном зазоре. Кроме этого, принимают допущение, что действие зубчатости в равной степени влияет на все гармоники поля в зазоре. Магнитная цепь электрической машины принимается либо ненасыщенной, либо ее насыщение не изменяется в исследуемых режимах работы.

Использование столь значительных допущений позволило многократно повысить наглядность изложения и восприятия материала. Большую роль в этом сыграли схемы замещения и круговые диаграммы асинхронной машины, которые нашли широкое распространение среди инженерно-технических работников [9-11].

Центральной идеей в построении круговой диаграммы была возможность составления схем замещения. При этом, для того чтобы контуры первичной и вторичной обмоток можно было соединить электрически приходится делать допущение о приведении обмоток асинхронной машины. Чаще всего обмотки ротора приводят к обмоткам статора. В этом случае они пересчитываются на число витков и фаз обмоток статора. Чтобы электромагнитные соотношения в приведенной машине и исходной не изменились, следует ввести в рассмотрение

коэффициенты приведения токов напряжений и сопротивлений. Этот прием часто позволяет получать ориентировочные оценки, которые можно считать первым приближением к расчету исследуемого режима работы электрической машины.

Для этого на основании схем замещения строят так называемые круговые диаграммы. При их построении считают, что концы векторов тока первичной и вторичной обмотки при неизменности индуктивных сопротивлений обмоток описывают окружность. Использование круговых диаграмм явилось основой для проектирования асинхронных машин. Надо отметить, что до начала 2000-х годов большинство методик проектирования основывались именно на круговых диаграммах асинхронной машины [12-15].

Сейчас, имея представления о прогрессе в области вычислительной техники и численных методов, становится понятно, что получаемые погрешности в традиционных методиках часто оказываются значительными. Их причиной было то, что принятые допущения идеализированной электрической машины были причиной большой погрешности вычислений. Работники конструкторских бюро и НИИ, занимающиеся разработкой асинхронных двигателей, прилагали большие усилия для уменьшения погрешностей в расчетах, чтобы заводские методики, хотя бы приблизительно, соответствовали данным физического эксперимента. Положение заметно улучшилось, когда в методики проектирования стали включать современные методы расчета электромагнитного поля.

Использование компьютеров и современного программного обеспечения в системах автоматизированного проектирования асинхронных машин позволяет по-новому организовать процесс создания новой техники, когда на выходе оказывается возможным сразу получать готовые чертежи [16]. Опять же подчеркнем, что автоматизированные системы проектирования могут содержать в своем составе подпрограммы и блоки для расчета электромагнитного поля. В этом случае программы получаются более объемными, дорогими. Иногда их там просто нет, и тогда появляется иллюзия

того, что компьютер придает расчетам электрической машины требуемую точность.

Новые возможности в расчете электромагнитного поля асинхронных машин были получены с применением в расчетах численного метода конечных элементов [16-20]. Этот метод быстро распространился среди разработчиков электрических машин. Основным его достоинством является то, что вместо непосредственного решения дифференциальных уравнений электромагнитного поля можно исследовать энергетический функционал на экстремум. Решение многократно упрощается, при этом точность решения остается высокой. Другими словами, краевая задача непосредственного интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных заменяется вариационной. Вариационная постановка задачи при исследовании энергетического функционала позволяет, во-первых, проще получить решение, а, во-вторых, говорить о методе конечных элементов как о более точном методе расчета электромагнитных сил и моментов в асинхронных машинах, по сравнению с традиционными графоаналитическими методами, базирующимися на круговых диаграммах и допущениях идеализированной электрической машины [21-26].

Зарубежные и отечественные публикации по использованию метода конечных элементов подтверждают, что данный численный метод нашел широкое использование для расчета электрических машин и, в частности, асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [27-31]. Методы, основанные на схемах замещения, используются только для предварительной оценки, и важны как первое приближение рассматриваемой задачи.

1.2 Разработка серий асинхронных двигателей

Первая серия асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором была серия А разработана в первый послевоенный 1945 год. Это был несомненный успех отечественного электромашиностроения. Затем последовали серии А2, АО2, 3А и 4А (1971 год) [32-34]. Несмотря на то, что серия асинхронных

двигателей 4А достаточно старая к ней еще будем возвращаться, так как это последняя серия в стране, по которой все данные опубликованы в справочнике [33]. По последующим двигателям разработчики закрывают информацию по активным размерам и обмоточным данным.

Затем последовали разработки других серий: АИ, 5А, 6А и другие [34-36]. Конечно, приведенные серии между собой отличаются, но в параметрах энергоэффективности больших изменений не видно. В качестве примера основных узлов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведены следующие два рисунка 1.1 и 1.2, на которых проведен асинхронный двигатель серии 5А. Короткозамкнутый ротор вращается в подшипниках качения, которые размещаются в подшипниковых щитах (рисунок 1.1), закрепленных резьбовыми соединениями к статору с магнитопроводом и обмоткой (рисунок 1.2).

Ярославским электромашиностроительным заводом была разработана серия асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором РА [37]. Это была, несомненно, удачная попытка придать электродвигателям современный дизайн и характеристики.

Зарубежные стандарты и стандарты РФ в последнее время нацеливают разработчиков на создание энергоэффективных асинхронных двигателей для бережного использования энергетических ресурсов [39,40]. Чтобы создавать электродвигатели с повышенным КПД, специалисты Международной электротехнической комиссии (IEC) разработали систему классификации по уровню энергоэффективности.



Рисунок 1.1 - Ротор в сборе асинхронного электродвигателя 5А



Рисунок 1.2 - Статор асинхронного электродвигателя 5А

Она описана в международном стандарте IEC 60034-30-1 "Электрические машины вращательного действия. Часть 30-1: Классы эффективности электродвигателей переменного тока с питанием от сети (код IE)". Этот стандарт заменяет и дополняет версию стандарта, принятого в 2008 году. Он предполагает разделение электродвигателей по уровням КПД в рамках четырех классов:

- IE1 – стандартная энергоэффективность (Standard);
- IE2 – высокая энергоэффективность (High);
- IE3 – энергоэффективность уровня премиум (Premium);
- IE4 – энергоэффективность уровня супер-премиум (Super Premium).

Несмотря на то, что в нашей стране с 2009 года действует закон об энергосбережении [41], энергоэффективные двигатели не пользуются повышенным спросом. Это тем более странно, что первая статья данного закона запрещает использовать менее энергоэффективные аналоги. Потребители находят способ не применять эту статью, ссылаясь на недостаточный ассортимент энергоэффективных двигателей на рынке электротехнической продукции.

Примером в совершенствовании КПД и коэффициента мощности являются зарубежные компании, развивающие энергоэффективные электрические машины [42]. Энергоэффективные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором производят многие фирмы: GE Motors, Leroy Somer, American Electric, SEV Eurodrive, Baldor Electric, ABB, Siemens, Toshiba Inc., и другие. Как правило, энергоэффективные исполнения имеют увеличенные размеры активных частей, электротехнические стали с низкими удельными потерями, совершенные изоляционные материалы, подшипники качения с малым сопротивлением трения. Из технологических приемов заслуживает внимание специальный способ шихтовки магнитопровода статора из листов анизотропной электротехнической стали и использование медной обмотки ротора, когда последний заливается медью под давлением. Вскользь проводится мысль о том, что пазы рассчитываются с использованием

оптимизации их геометрических размеров без уточнения того, что при этом происходит с площадью пазов.

В настоящее время электромашиностроительный концерн «РУСЭЛПРОМ» силами ПАО «НИПТИЭМ» и ряда компаний «ВЭМЗ» разработали серию асинхронных электродвигателей 7AVE, которая соответствует требованиям стандарта IEC 60034-30-1[43]. Такую работу трудно переоценить поскольку энергоэффективные двигатели позволяют получить при эксплуатации весомый экономический эффект за счет сокращения потребления электроэнергии, в соответствии с показателями энергоэффективности соответствующих исполнений [43].

1.3 Расчет электромагнитного поля в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором и некоторые результаты, полученные к настоящему времени

Несомненный интерес мировой и отечественной науки к задачам создания асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, которые бы отвечали международным стандартам, послужили стимулом исследования электромагнитного поля в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором в Воронежском государственном техническом университете. Начаты эти исследования были в 2001 году в рамках работы аспирантуры и госбюджетной НИР под руководством профессора Кононенко К.Е. Проведенные исследования показали следующие результаты.

В работах [44] показано, что в момент пуска индуктивные сопротивления рассеяния уменьшаются вследствие насыщения магнитных цепей по путям потоков рассеяния, а индуктивное сопротивление взаимной индукции увеличивается до ненасыщенного значения. Для исследуемого двигателя (250 Вт) индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора уменьшилось в момент пуска по отношению к номинальному режиму примерно в 1,75 раза, а ротора – 3,43 раза. Индуктивное сопротивление взаимоиндукции в момент пуска увеличилось примерно в 1,2 раза. Предложен подход к учету изменения

индуктивных сопротивлений в виде экспоненциальных зависимостей от времени. При этом в качестве постоянной времени применяется электромеханическая постоянная времени асинхронного двигателя.

Исследования электромагнитного поля были проведены в асинхронных конденсаторных двигателях [45]. В работе на основе расчета электромагнитного поля и ряда экспериментальных исследований разработана методика учета изменения индуктивных параметров схемы замещения конденсаторных асинхронных двигателей. Переходные процессы исследовались с использованием в математической модели переменных значений индуктивных параметров обмоток от времени. Показано, что значения индуктивных параметров схемы замещения КАД значительно влияют на амплитуды и характер протекания переходных процессов.

Дальнейшие исследования на асинхронных двигателях малой мощности: трехфазных и конденсаторных показали следующее [46 - 47]. Варьируя геометрическими размерами пазовой части ротора, магнитных клиньев в шлицах статора можно улучшить характеристики асинхронного двигателя. Причем получающиеся результаты входят в противоречие с некоторыми положениями общей теории асинхронной машины. Известно, например, что увеличение активного сопротивления ротора неизбежно ведет к ухудшению КПД и вместе с этим улучшаются пусковые свойства асинхронного двигателя. В работе получено резкое увеличение пусковых характеристик без заметного снижения энергоэффективности. Этот факт заставляет с осторожностью пользоваться формулами, которые получены с использованием допущения идеализированной асинхронной машины.

В работах [48 - 49] анализ зависимости реактивного момента от параметров геометрии листов ротора и статора машины показал возможность снижения его величины до полного устранения. Добиться устранения реактивных составляющих в пусковом моменте асинхронного двигателя можно путем скоса пазов ротора на величину, кратную периоду пульсаций реактивного момента. Однако, эффективность последнего зависит от

погрешности установки реального скоса. Соотношение чисел пазов ротора и статора является важным для величин амплитуды и периода реактивного момента, и правильный выбор данного параметра позволяет добиться минимальных значений пульсаций пускового момента. Предложен способ и приведены оценки «благоприятности» устранения пульсаций, и даны значения вероятности возникновения существенных зубцовых моментов для определенных соотношений Z_1 и Z_2 в асинхронных двигателях с высотой оси вращения от 40 до 80 мм.

Исследование влияния схем статорных обмоток на энергоэффективность асинхронных двигателей [50] показал следующие результаты. Если в обмотке статора число пазов на полюс и фазу больше либо равно 3, то необходимость использования двухслойных обмоток пропадает. Кроме этого показано, что конфигурация зубцовых зон играет более значимое влияние, чем различные схемы обмоток, хотя, конечно, пренебрегать совершенствованием обмоток асинхронных трехфазных двигателей не следует.

Затронули исследования и область асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором [51 - 53]. И в этом диапазоне мощностей от 1,5 до 120 Вт получено влияние конфигурации воздушного зазора на энергоэффективность работы электродвигателей. Кстати, стандарт МЭК [40] начинает нормировать классы энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором уже со 120 Вт, а не с 1000 Вт, как было ранее. Наряду с полученными зависимостями авторы пошли дальше, и сформулировали для отмеченного класса электродвигателей коэффициенты использования листов ротора для повышения энергоэффективности. Следует отметить, что были исследованы только двухполюсные конструкции электродвигателей. Хотя, конечно, понятно, что реализовать многополюсные исполнения в микродвигателях, у которых зубцовое деление мало часто затруднительно.

1.4 Выводы и постановка задачи

Асинхронные двигатели составляют основу современного электропривода. Они потребляют большую часть электроэнергии, которую потребляют все электрические двигатели суммарно. По этой причине разработка мер повышения их энергоэффективности (КПД и $\cos\phi$) окажет положительное влияние на сбережение энергетических ресурсов страны.

В этой связи, в диссертационной работе поставлена цель показать, моделируя электромагнитное поле, каким образом следует выбирать геометрические размеры листа ротора асинхронного двигателя, чтобы получить более высокую энергоэффективность.

Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- 1 Сделать обзор современного состояния вопроса.
- 2 Выбрать метод исследования электромагнитного поля в асинхронных двигателях.
- 3 Построить круговую диаграмму используя данные расчета электромагнитного поля.
- 4 Выяснить влияние формы пазов ротора на энергоэффективность.
- 5 Оценить рекомендации, существующие на данный момент, по проектированию магнитопровода (листа) ротора.
- 6 Поварьировать площадью паза ротора вверх и вниз от рекомендуемых значений исходя из существующих методик.
- 7 Разработать рекомендации по проектированию листа ротора энергоэффективного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 8 Провести экспериментальные исследования, подтверждающие основные результаты работы.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

2.1 Основные допущения

Оценка эффективности электромеханического преобразования энергии в трехфазных асинхронных двигателях не может быть выполнена корректно без того, чтобы рассматривать и решать уравнения электромагнитного поля. Как было отмечено выше, эффективным методом решения поставленных задач является численный метод конечных элементов [16, 18, 20 - 31]. Этот метод сводит краевую постановку задачи к вариационной, когда вместо решения дифференциальных уравнений поля в частных производных ищется экстремум функционала

$$W(\bar{A}) = \frac{1}{2} \int |\nabla \bar{A}|^2 dS. \quad (2.1)$$

Для упрощения решения уравнений электромагнитного поля принято вводить промежуточную переменную, которой является векторный магнитный потенциал. Эту вспомогательную функцию вводят следующим соотношением

$$\bar{B} = \text{rot} \bar{A}. \quad (2.2)$$

Несмотря на то, что электромагнитное поле в асинхронных машинах трехмерно, воспользуется двумерной его моделью, считая, что вдоль оси вращения картина магнитного поля повторяется. Если не рассчитывать торцевые электрические машины, а они не являются объектом нашего исследования, и не учитывать скос пазов ротора асинхронного двигателя, то такая постановка оказывается правомерной.

Обзор источников технической информации, приведенный в первом разделе, показал, что аналитические методы расчета к электрической машине с

двойной зубчатостью на статоре и роторе для получения точного решения не применимы.

С учетом соотношения (2.2) понятно, что векторный магнитный потенциал определяет два вектора: $\vec{B}$ и $\vec{H}$. В соответствии с принципом минимума потенциальной энергии распределение потенциала в электрической машине должно быть таким, чтобы минимизировать запасенную энергию.

При нахождении энергии поля интегрирование производится по всей двумерной области существования решения. В общем случае, когда по обмотке асинхронного двигателя, расположенной в пазах магнитопровода протекает ток, создаваемое им поле, описывается уравнением Пуассона. Принцип минимума потенциальной энергии математически эквивалентен уравнению Пуассона в том смысле, что распределение потенциала, удовлетворяющее ему, будет минимизировать запасенную в электромагнитном поле энергию, то есть значение $\bar{A}$, минимизирующее функционал (2.1), будет являться решением уравнения Пуассона [18, 25].

Можно получить приближенное решение, связанное с функционалом (2.1) полагая, что потенциал $\bar{A}(x, y)$ является комбинацией некоторых простых функций, которые аппроксимируют его с некоторой погрешностью. Исходя их условий минимизации, запасенной в электромагнитном поле энергии, находят аппроксимирующие коэффициенты, а значит и приближенное значение искомого потенциала.

Для расчета ЭМС, действующей на выделенный объем нелинейной магнитной системы, теория электромагнетизма предполагает следующие три способа: по приращению магнитной энергии системы; по объемной или поверхностной плотности ЭМС; по натяжениям [1,4]. При этом ЭМС и моменты могут быть строго и однозначно определены только на основании расчета электромагнитного поля. То есть во всех трех случаях предполагается, что электромагнитное поле численно или аналитически рассчитано для данного момента времени t , при этом перемещающаяся часть ЭМ или другой магнитной системы занимает определенное положение по отношению к ее

неподвижной части. Причем известно пространственное распределение плотностей токов $\bar{J}$ в объеме нелинейной системы (в том числе и вихревых токов), распределение индукций $\bar{B}$ и напряженностей $\bar{H}$ магнитного поля, и, следовательно, магнитных проницаемостей $\mu = B/H$.

В связи с возросшими возможностями вычислительной техники и развитием численных методов расчета электромагнитных полей наибольшее применение находят методы расчета ЭМС и моментов, использующие понятие тензора натяжения [1,4].

Вариационная формулировка задачи предусматривает использование энергетического функционала. Он был записан в виде выражения (2.1). Детализация выражения дает соотношение [16, 18, 19]

$$F(A) = \int_S \left(\int_0^{B_x} \frac{B_x}{\mu\mu_0} dB_x + \int_0^{B_y} \frac{B_y}{\mu\mu_0} dB_y \right) - \int_S A j dS, \quad (2.3)$$

где: S – площадь одного конечного элемента;

B_x, B_y – составляющие по координатным осям вектора магнитной индукции;

j – вектор плотности тока.

Для решения поставленной задачи можно использовать любой стандартный пакет метода конечных элементов.

Найдя значения вектора магнитной индукции и напряженности к каждой точке поля рассматриваемой области задачи, можно перейти к определению электромагнитной силы и вращающего момента через тензоры натяжений, как это сделано в [1, 4]. Если система натяжений $\bar{T}_n$ на поверхности S эквивалентна электромагнитной силе, действующей на некоторый объем V , то эту силу можно найти как сумму $\bar{T}_n dS$:

$$\bar{F} = \oint_S \bar{T}_n dS = \bar{q}_x F_x + \bar{q}_y F_y + \bar{q}_z F_z, \quad (2.4)$$

где

$$F_x = \oint_S T_{nx} dS, \quad F_y = \oint_S T_{ny} dS, \quad F_z = \oint_S T_{nz} dS.$$

Электромагнитный момент вращения, действующий на выделенный объем, найдем суммированием его составляющих относительно осей x, y, z:

$$\bar{M} = \oint_S [\bar{r} \bar{T}_n] dS = \bar{q}_x M_x + \bar{q}_y M_y + \bar{q}_z M_z, \quad (2.5)$$

где

$$M_x = \bar{q}_x \bar{M} = \oint_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS;$$

$$M_y = \bar{q}_y \bar{M} = \oint_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS;$$

$$M_z = \bar{q}_z \bar{M} = \oint_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS.$$

В этих уравнениях через T_{nx} , T_{ny} , T_{nz} обозначены компоненты тензора натяжений по осям принятой системы координат [4]. Сам тензор натяжений через параметры поля в векторной форме выражают так [2, 4]

$$\bar{T}_n = \frac{\bar{B} B_n - 0,5 B^2 \bar{n}}{\mu \mu_0}, \quad (2.6)$$

где $\bar{B}$ - вектор индукции в рассматриваемой точке поля;

$\bar{n}$ - нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует натяжение $\bar{T}_n$;

B_n - нормальная составляющая индукции.

Компоненты тензора натяжений будут иметь следующий вид [4]:

$$\begin{aligned}
 T_{xx} &= \frac{B_x^2 - 0,5B^2}{\mu\mu_0}; & T_{xy} &= \frac{B_x B_y}{\mu\mu_0}; & T_{xz} &= \frac{B_x B_z}{\mu\mu_0}; \\
 T_{yx} &= \frac{B_y B_x}{\mu\mu_0}; & T_{yy} &= \frac{B_y^2 - 0,5B^2}{\mu\mu_0}; & T_{yz} &= \frac{B_y B_z}{\mu\mu_0}; \\
 T_{zx} &= \frac{B_z B_x}{\mu\mu_0}; & T_{zy} &= \frac{B_z B_y}{\mu\mu_0}; & T_{zz} &= \frac{B_z^2 - 0,5B^2}{\mu\mu_0}.
 \end{aligned}$$

2.2 Определение параметров модели

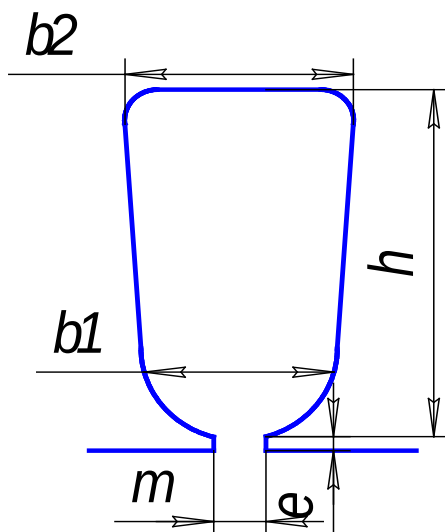
В качестве примера для составления математической модели трехфазного асинхронного двигателя примем двигатель серии 4А. Несмотря на то, что серия эта была разработана в 1971 г., это последняя серия электродвигателей, геометрия зубцовых зон которых опубликована в открытой печати в виде справочника [33]. Эти данные могут быть использованы для целей моделирования.

Трехфазный асинхронный электродвигатель 4А132S4 с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными данными [33]: номинальная мощность $P_{2H} = 7,5$ кВт; индукция в воздушном зазоре $B_\delta = 0,9$ Тл; линейная нагрузка $A = 252$ А/см; плотность тока в обмотке статора $J = 5,9$ А/мм²; КПД=87,5%; $\cos\varphi = 0,86$. Двигатель 4А132S4 четырехполюсный, синхронная частота вращения которого равна 1500 об/мин; номинальное скольжение $s_H = 0,029$.

В этом же справочнике приведены все необходимые геометрические размеры. Геометрия пазов статора и ротора соответствует рисункам 2.1 и 2.2.

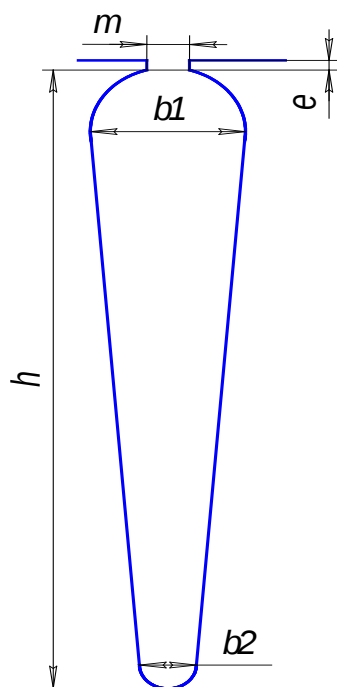
Остальные размеры магнитопровода статора и ротора определяются следующими данными.

Внешний диаметр сердечника статора $D_{a1} = 225$ мм; внутренний диаметр сердечника статора $D_{i1} = 145$ мм; длина пакета $l_1 = 115$ мм; величина воздушного зазора $\delta = 0,35$ мм; диаметр отверстия под вал – 54 мм.



Число пазов $Z_1 = 36$, $b_1 = 6,1$ мм; $b_2 = 9,2$ мм; $h = 17,8$ мм; $m = 3,5$ мм; $e = 0,9$ мм

Рисунок 2.1 - Геометрия пазов статора



Число пазов $Z_2 = 34$, $b_1 = 6,0$ мм; $b_2 = 2,2$ мм; $h = 24,7$ мм; $m = 1,5$ мм; $e = 0,75$ мм

Рисунок 2.2 - Геометрия пазов ротора

Параметры Г-образной схемы замещения, приведенной на рисунке 2.3 позволяют приблизительно оценить рабочие и пусковые характеристики двигателя на основе круговой диаграммы.

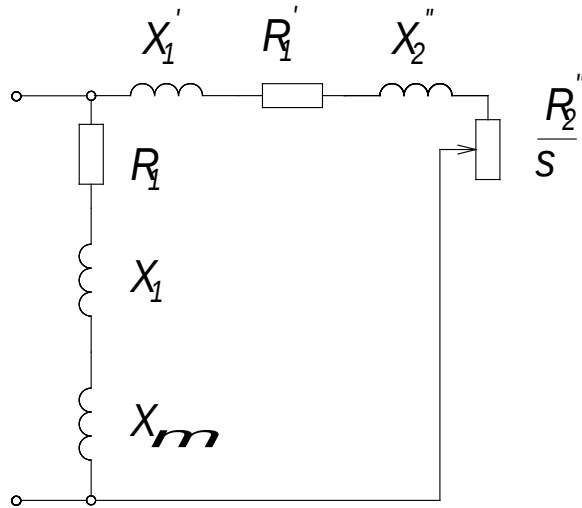


Рисунок 2.3 - Г-образная схема замещения трехфазного асинхронного двигателя

Параметры схемы замещения приведены в справочнике [33] в относительных единицах: $X_{\mu} = 3,0$; $R_1' = 0,048$; $X_1' = 0,085$; $R_2'' = 0,033$; $X_2'' = 0,13$. При коротком замыкании параметры схемы замещения будут равны: $R_{2\Pi}'' = 0,04$; $R_{\kappa\Pi} = 0,088$; $X_{\kappa\Pi} = 0,15$.

Для построения круговой диаграммы проведем некоторые расчеты. Номинальный фазный ток обмотки статора

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2H}}{3U_{1\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} ; \quad (2.7)$$

$$I_{1\phi} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1 \text{ A.}$$

В качестве базисного значение сопротивления принимаем

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1нф}}{I_{1нф}} \text{ Ом.} \quad (2.8)$$

$$Z_{\sigma} = \frac{220}{15,1} = 14,57 \text{ Ом.}$$

Сопротивления схемы замещения, выраженные в размерных единицах, пересчитаем по следующим соотношениям:

$$r_1' = R_1' \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.9)$$

$$r_1' = 0,048 \cdot 14,57 = 0,70 \text{ Ом;}$$

$$x_1' = X_1' \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.10)$$

$$x_1' = 0,085 \cdot 14,57 = 1,24 \text{ Ом;}$$

$$x_{\mu} = X_{\mu} \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.11)$$

$$x_{\mu} = 3 \cdot 14,57 = 43,71 \text{ Ом;}$$

$$r_2'' = R_2'' \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.12)$$

$$r_2'' = 0,033 \cdot 14,57 = 0,48 \text{ Ом;}$$

$$x_2'' = X_2'' \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.13)$$

$$x_2'' = 0,13 \cdot 14,57 = 1,89 \text{ Ом;}$$

$$r_{2\Pi}'' = R_{2\Pi}'' \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.14)$$

$$r_{2\Pi}'' = 0,04 \cdot 14,57 = 0,58 \text{ Ом;}$$

$$r_{\kappa\Pi} = R_{\kappa\Pi} \cdot Z_{\sigma} ; \quad (2.15)$$

$$r_{\kappa II} = 0,088 \cdot 14,57 = 1,28 \text{ Ом};$$

$$x_{\kappa II} = X_{\kappa II} \cdot Z_{\bar{\sigma}}; \quad (2.16)$$

$$x_{\kappa II} = 0,15 \cdot 14,57 = 2,19 \text{ Ом};$$

$$x_1 = \frac{2 \cdot x_1' \cdot x_{\mu}}{x_{\mu} + \sqrt{x_{\mu}^2 + 4 \cdot x_{\mu} \cdot x_1'}}; \quad (2.17)$$

$$x_1 = \frac{2 \cdot 1,24 \cdot 43,71}{43,71 + \sqrt{43,71^2 + 4 \cdot 43,71 \cdot 1,24}} = 1,205 \text{ Ом};$$

$$r_1 = \frac{r_1' \cdot x_1}{x_1'}; \quad (2.18)$$

$$r_1 = \frac{0,7 \cdot 1,205}{1,24} = 0,68 \text{ Ом}.$$

Ток холостого хода определяется выражением

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{\mu})^2}}; \quad (2.19)$$

$$I_0 = \frac{220}{\sqrt{0,68^2 + (1,205 + 43,71)^2}} = 4,9 \text{ А}.$$

В номинальном режиме диаметр круговой диаграммы определится выражением

$$D = \frac{U_{1\phi}}{x_1' + x_2'}; \quad (2.20)$$

$$D = \frac{220}{1,24 + 1,89} = 70,3 \text{ А}.$$

В момент пуска диаметр круговой диаграммы увеличится. Его можно определить так

$$D' = \frac{U_{1нф}}{x_{кП}} ; \quad (2.21)$$

$$D' = \frac{220}{2,19} = 100,6 \text{ А.}$$

В соответствии с упрощенной круговой диаграммой асинхронного двигателя необходимо определить точки, в которых скольжение равно 1,0 и ∞ . Для нахождения этих точек из точки $s = 0$ проведем лучи под углами ψ_1 и ψ_2 как показано на рисунке 2.4.

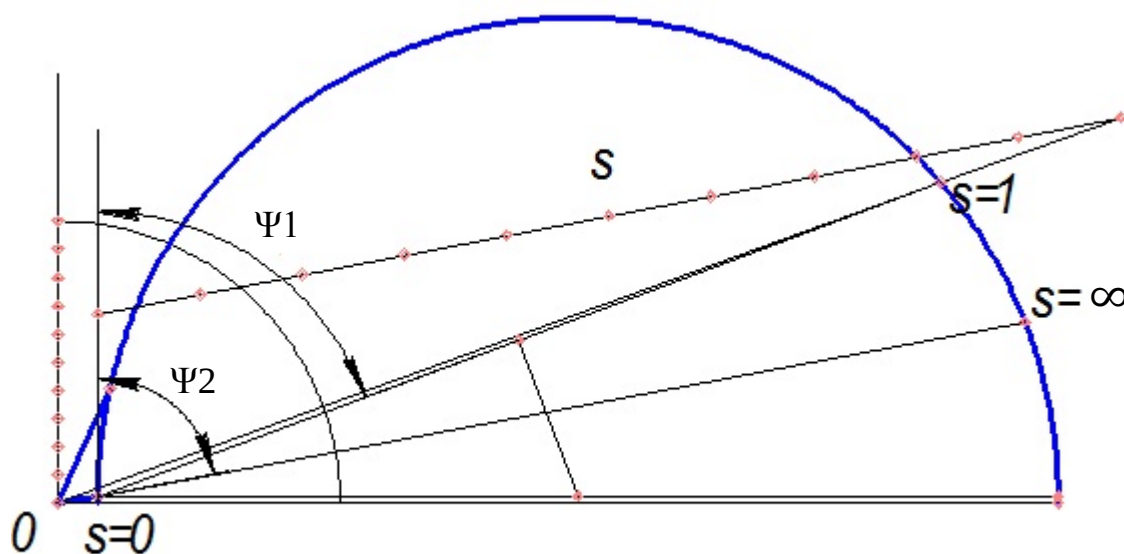


Рисунок 2.4 - Упрощенная круговая диаграмма асинхронного двигателя

Тангенсы этих углов определяются следующим образом:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{x_1' + x_2''}{r_1' + r_2''}; \quad (2.22)$$

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{1,24 + 1,89}{0,70 + 0,48} = 2,65;$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_1' + x_2''}{r_1'}; \quad (2.23)$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{1,24 + 1,89}{0,70} = 4,47.$$

Не указанные в справочнике данные определим экспериментально на опытном образце двигателя, как показано в разделе 4.

Для выполнения запланированных исследований рассчитаем зависимость тока электродвигателя 4A132S4 от скольжения. Это удобно выполнить графоаналитическим способом. Формулы (2.20) и (2.21) показывают, что в момент пуска диаметр круговой диаграммы будет больше. Построим последовательно ряд значений диаметров. Результирующая форма круговой диаграммы уже не будет окружностью, а будет больше походить на эллипс. Опусшив промежуточные графические построения, приведем график изменения тока обмотки статора двигателя от величины скольжения. Покажем его на рисунке 2.5.

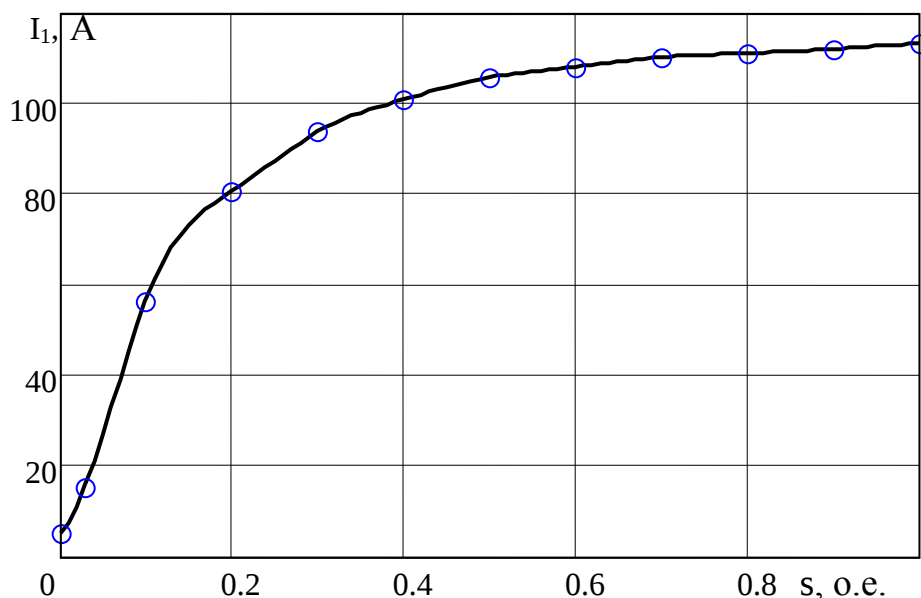


Рисунок 2.5 - Токовая характеристика асинхронного двигателя 4A132S4

Приведенные выше данные справочных размеров двигателя позволяют определить геометрию поперечного сечения. Дополнительно окружим внешнюю границу сердечника статора concentric окружностью. Это следует сделать для того, чтобы учесть затухание электромагнитного поля рассеяния, выходящего из корпуса двигателя в окружающее пространство. Таким построением будет задана внешняя граница области, в которой будет выполняться расчет. Расчетная область в виде поперечного сечения двигателя приведена на рисунке 2.6.

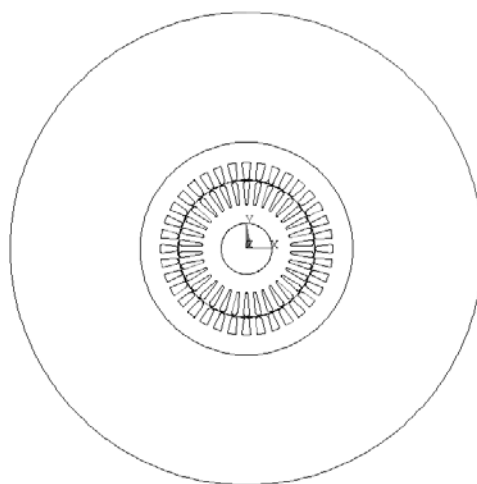


Рисунок 2.6 - Поперечное сечение двигателя, окруженное слоем воздуха

Увеличенный фрагмент показан на рисунке 2.7.

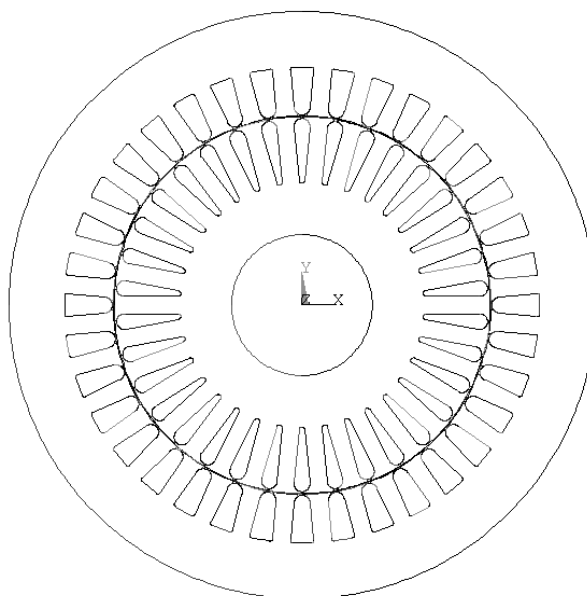


Рисунок 2.7 - Фрагмент конфигурации пазовой зоны асинхронного двигателя 4A132S4

Заданная геометрия, выбранные материалы и их свойства позволяют произвести разбиение расчетной области на сеть конечных элементов, что поясняют рисунки 2.8 и 2.9.

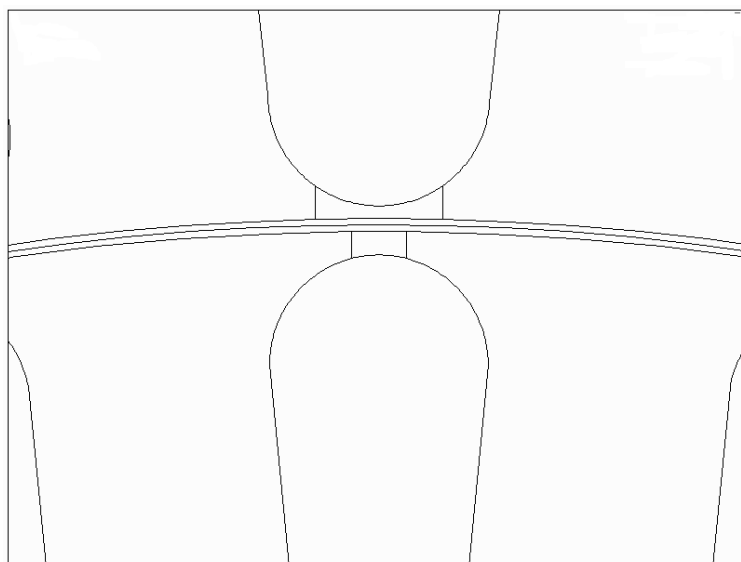


Рисунок 2.8 - Увеличенный фрагмент пазов

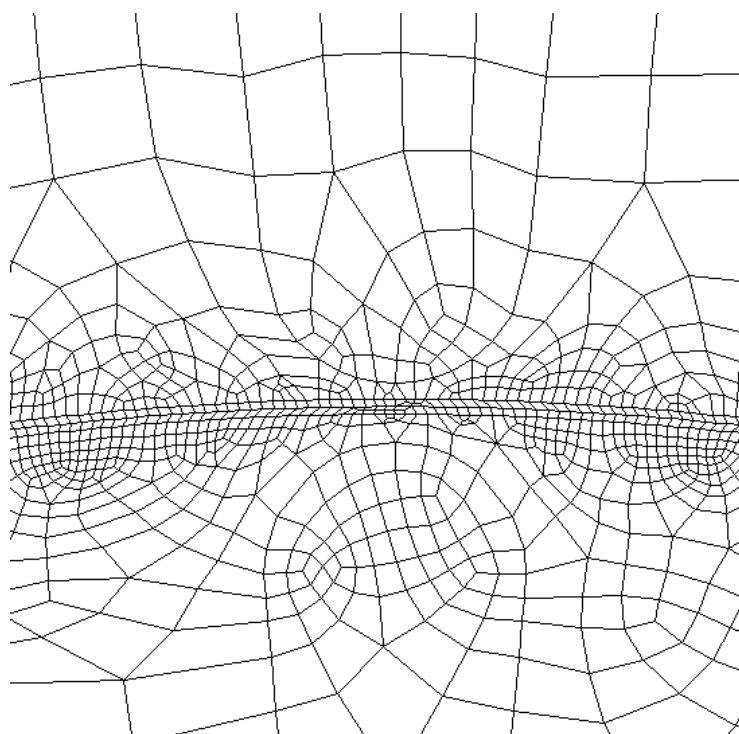


Рисунок 2.9 - Соответствующее фрагменту (рисунок 2.8) разбиение модели на сеть конечных элементов

Свойства материалов заметно влияют на характеристики исследуемых двигателей. Однако если нужно произвести сопоставление ряда вариантов изделий с разными зубцовыми зонами, то в этом случае важно лишь то, чтобы в анализируемых моделях свойства материалов были бы идентичны. При моделировании это оказывается сделать возможно, а при физическом эксперименте разброс характеристик свойств материалов может заметно снизить точность расчетов. В качестве материала магнитопроводов примем сталь 2013, а температуру машины оценим как 115 °С.

Площадь паза статора $S_{\Pi} = 0,13115 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Число проводников в пазу $w_{\Pi} = 22$. После того, как создана геометрия модели, можно перейти к определению плотностей тока в пазах. Они будут отличаться для режимов пуска и при номинальном скольжении. Расчет произведем по следующим выражениям.

Амплитуда плотности тока в пазу статора статора в режиме пуска может быть получена так

$$J_s = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w_n}{S_{\Pi}} ; \quad (2.24)$$

$$J_s = \frac{\sqrt{2} \cdot 113,2 \cdot 22}{0,13115 \cdot 10^{-3}} = 26854422 \text{ А/м}^2.$$

Амплитуда плотности тока в пазу статора при номинальном скольжении соответственно равна

$$J_s = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{нф}} \cdot w_n}{S_{\Pi}} ; \quad (2.25)$$

$$J_s = \frac{\sqrt{2} \cdot 15,1 \cdot 22}{0,13115 \cdot 10^{-3}} = 3582171 \text{ А/м}^2.$$

2.3 Моделирование формы паза

Используя метод конечных элементов, рассчитаем статическую механическую характеристику исследуемого двигателя 4A132S4. Для этого потребуются данные плотностей тока для промежуточных значений скольжения. Данные токов заданы графиком рисунка 2.5, а пересчет плотностей токов произведем по формулам (2.24, 2.25).

Используем низкочастотный гармонический анализ. Частота тока гармонического анализа будет определяться соответствующим скольжением. Электромагнитный вращающий момент определим, используя введенные понятия тензоров натяжения в магнитном поле. Для этого ротор окружим слоем воздуха, как это показано на рисунке 2.6, а вычислять момент будем вдоль линии, расположенной в середине воздушного зазора. Эту линию можно представить по фрагменту рисунка 2.8.

Для того чтобы кривая электромагнитного момента вращения выглядела плавной кривой, зададим достаточное количество точек. В таблицу 2.1 сведем исходные данные по величинам скольжений и амплитудам плотностей тока.

Таблица 2.1 - Исходные данные к расчету зависимости электромагнитного момента вращения от скольжения

s, о.е.	0,029	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$J_s, \text{А/м}^2$	3582171	13379765	19073282	22204716	23912772	25051475
s, о.е.	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$J_s, \text{А/м}^2$	25620827	26119009	26332516	26546023	26854422	

Скольжение $s = 0,029$ о.е. соответствует номинальному режиму работы. Рисунки 2.9 и 2.10 иллюстрируют работу асинхронного двигателя при номинальной нагрузке. Если по картине магнитных силовых линий это мало заметно, то рисунок 2.10 подчеркивает тот факт, что магнитное поле при нагрузке искажается. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре становится несимметричной, а наличие двухсторонней зубчатости увеличивает содержание высших гармоник в ее спектре. Расчеты, выполненные на основе схем замещения, данное обстоятельство не учитывают, поэтому величина электромагнитного момента, рассчитанная с позиций электромагнитного поля, будет более достоверной по причине меньшего количества допущений.

В этом режиме (режим номинального скольжения) электромагнитный момент вращения оказывается равен 52,26 Н·м. Подобные расчеты повторим для всех значений скольжений и плотностей токов, приведенных в таблице 2.1.

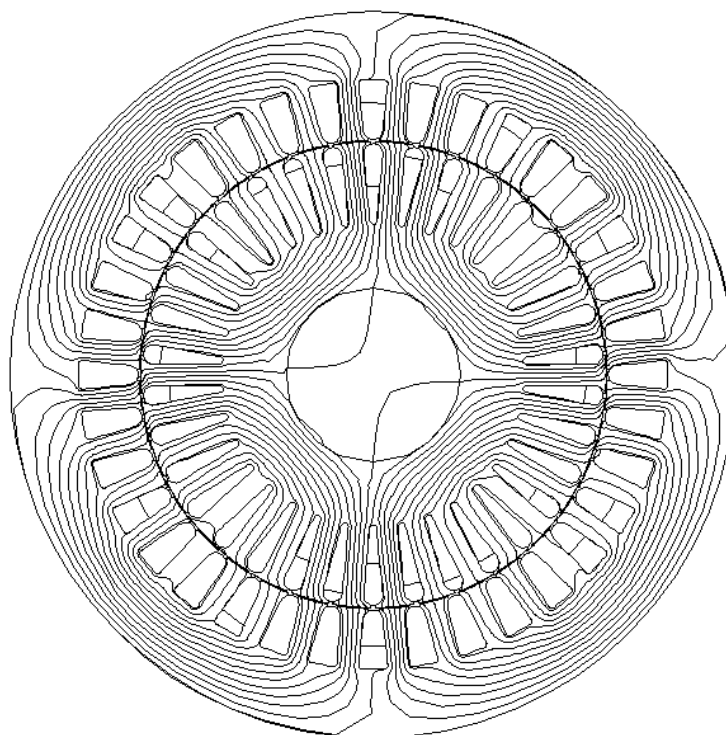


Рисунок 2.9 - Картина магнитных силовых линий в номинальном режиме работы электродвигателя 4A132S4

Обратим внимание на сделанную оговорку о «режиме номинального скольжения». Для более объективной оценки в дальнейшем двух или большего количества двигателей их лучше сравнивать при одном скольжении. Хотя в строгом понимании номинальный режим – это режим номинальной мощности.

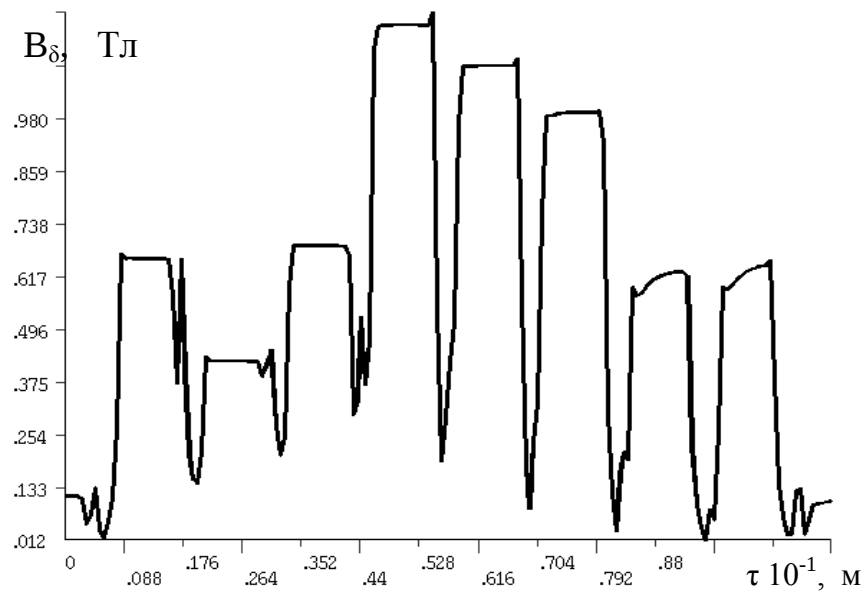


Рисунок 2.10 - Распределение кривой магнитной индукции в воздушном зазоре на полюсном делении при номинальной нагрузке на валу ($s = 0,029$ о.е.)

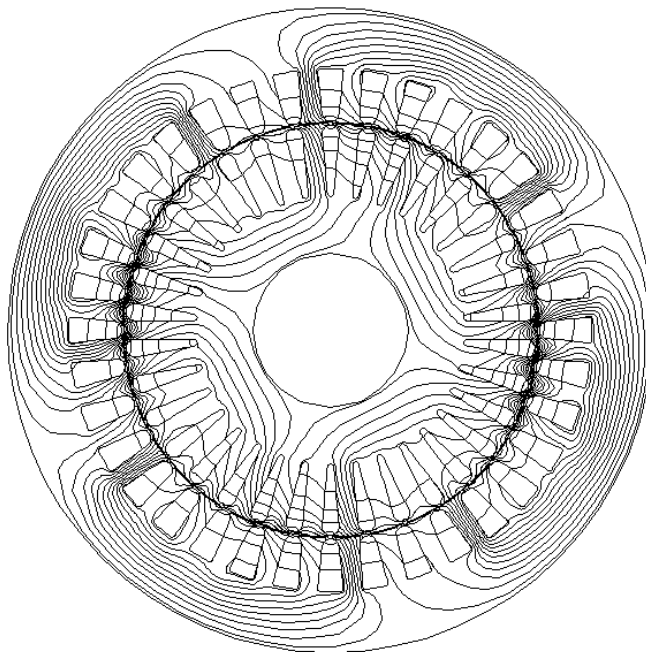


Рисунок 2.11 - Картина магнитных силовых линий в режиме работы электродвигателя 4A132S4 при $s = 0,5$ о.е

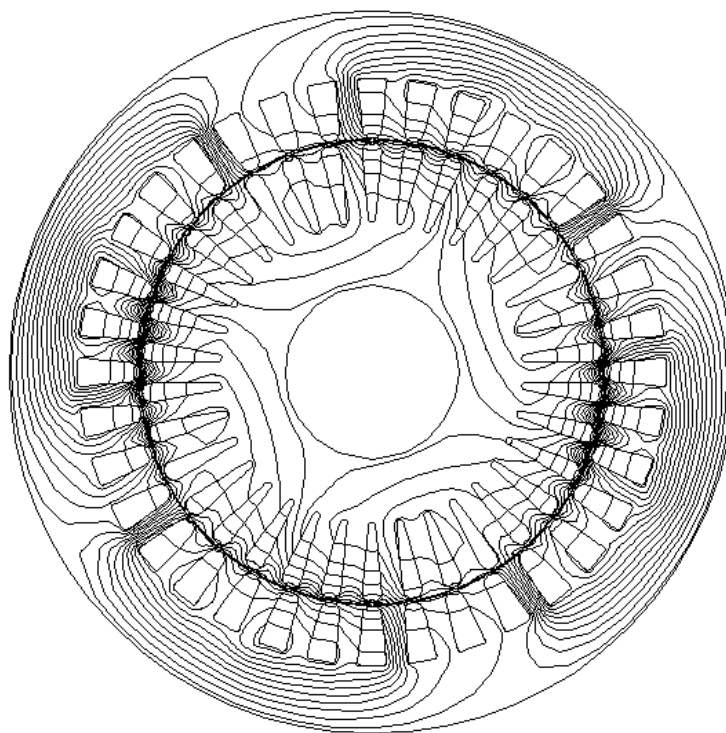


Рисунок 2.12 - Картина магнитных силовых линий в пусковом режиме работы электродвигателя 4A132S4 при $s = 1,0$ о.е.

Рисунок 2.11 и 2.12 иллюстрируют степень проникновения магнитного поля в ротор при изменении скольжения. Расчеты электромагнитного момента сведены в таблицу 2.2. По ее данным на рисунке 2.13 приведена характеристика электромагнитного вращающего момента от скольжения асинхронного двигателя 4A132S4, рассчитанная с позиций теории электромагнитного поля.

Таблица 2.2 - Расчетные данные электромагнитного вращающего момента от скольжения

s, о.е.	0,029	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
M, Н·м	52,26	219,5	228,7	207,6	181,9	161,1
s, о.е.	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
M, Н·м	142	128,1	115,7	106,3	99,7	

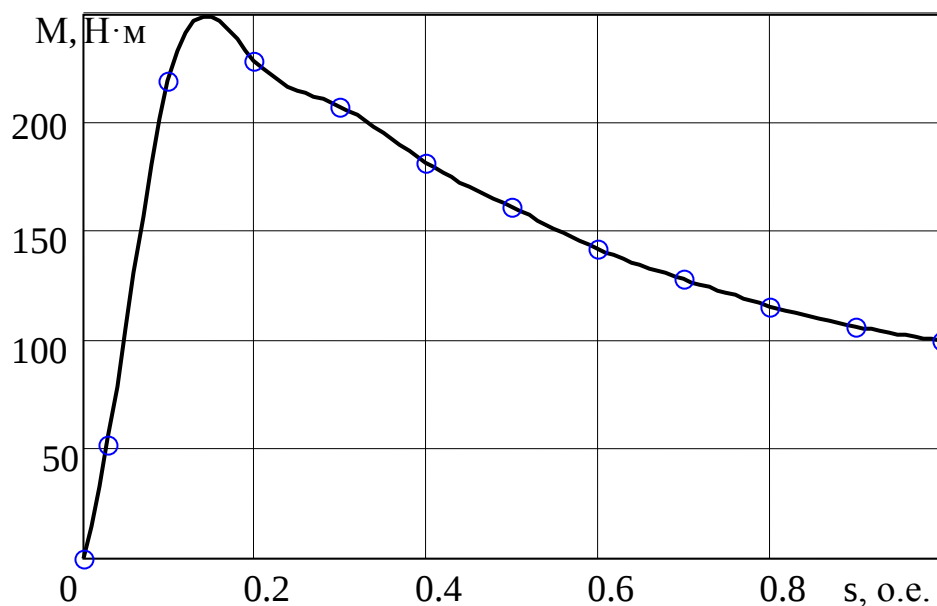


Рисунок 2.13 - Зависимость электромагнитного вращающего момента от скольжения электродвигателя 4A132S4, полученная с помощью расчета электромагнитного поля

Влияние формы паза ротора асинхронной машины на характеристики асинхронных двигателей играют заметную роль. Как следует из опубликованных данных по серии RA, существует форма паза ротора, дающая двигателю определенные преимущества.

Расчетом, базирующимся на теории электрических цепей и схемах замещения, показано, что паз с трапецидальной верхней частью обладает меньшим потоком пазового рассеяния, а потому должен обеспечивать лучшие характеристики машины.

Проверить этот вывод экспериментально сложно. Во-первых, получить из-под штампа листы ротора с одинаковыми площадями пазов трудно, во-вторых, материал короткозамкнутой обмотки может иметь некоторые отклонения удельной проводимости по целому ряду причин.

Целесообразно проверить эффективность данного технического решения методом расчета электромагнитного поля в поперечном сечении асинхронного

двигателя [54]. Для этой цели используем метод конечных элементов. Поскольку данные о точной геометрии зубцовой зоны и обмоточным параметрам асинхронных двигателей серии RA не опубликованы в открытой печати, то для вычислительного эксперимента был выбран электродвигатель серии 4А 4А132S4УЗ [33].

Для расчета применим метод конечных элементов с уже сделанными допущениями, которые сохраним и в данном случае. Чтобы промоделировать затухание электромагнитного поля на удалении от поверхности магнитопровода статора его поверхность окружим слоем воздуха радиусом 250 мм. Остальные геометрические размеры приняты по справочнику [33]. Расчетная область похожа на ту, что приведена на рисунке 2.6.

Форма паза ротора принята с овальной верхней частью, что показано на рисунке 2.14. После создания геометрии расчетных областей и задания свойств материалов (одинаковых для рассматриваемых случаев) была создана сетка конечных элементов (количество элементов 19450, количество узлов – 58389). Фрагмент разбиения показан на рисунке 2.15.

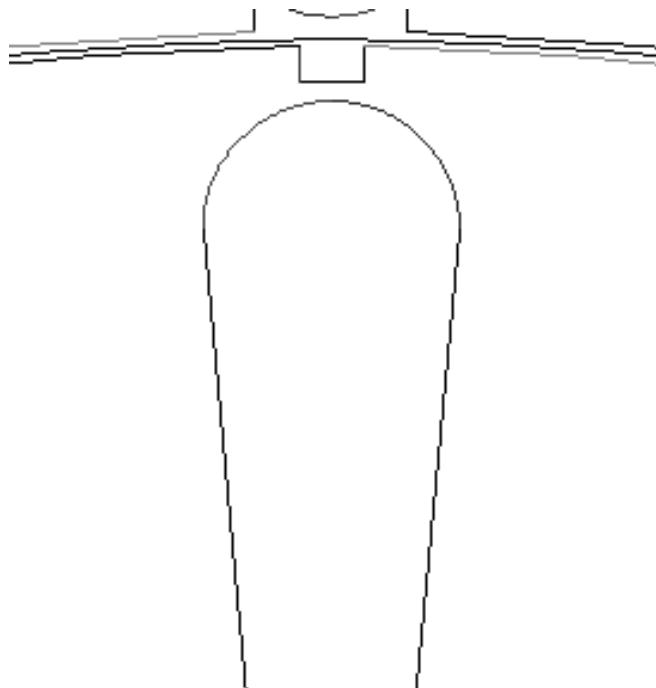


Рисунок 2.14 - Форма паза ротора с величиной мостика насыщения над верхней частью 0,4 мм

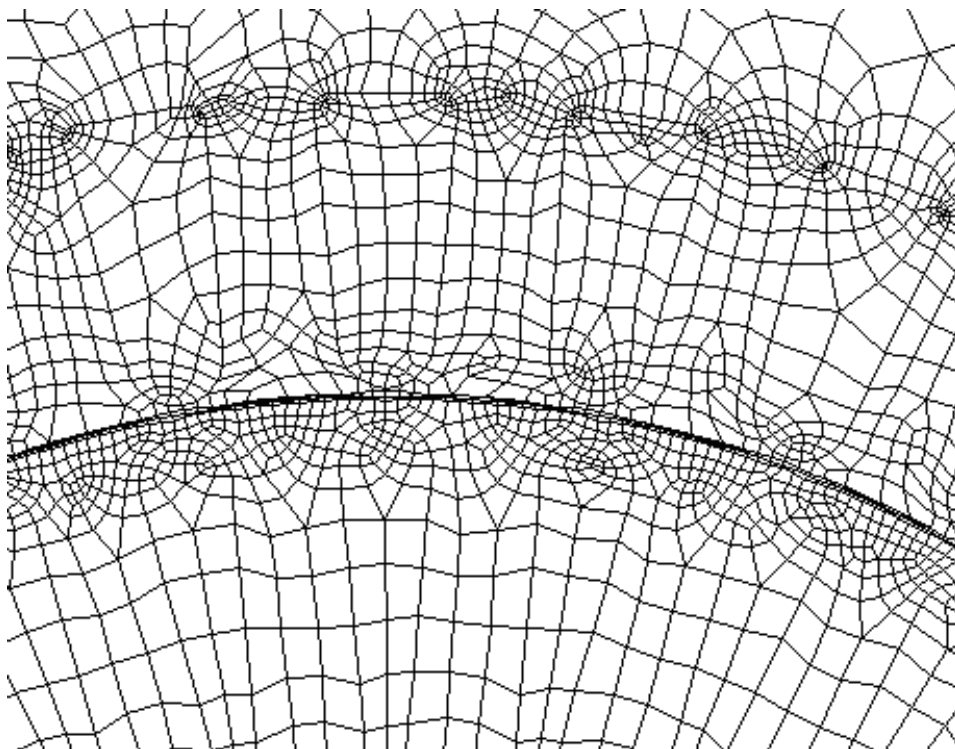


Рисунок 2.15 - Фрагмент разбиения расчетной области

Картина магнитных силовых линий в режиме пуска ($s = 1,0$) приведена на фрагментах (рисунок 2.16 и 2.17).

Электромагнитный момент вращения в режиме пуска для ротора с пазами, имеющими овальную верхнюю часть, рассчитанный по результатам моделирования электромагнитного поля равен 103,8 Н·м. Эта величина на 4,1 Н·м больше, чем в двигателе с овальным пазом без мостика насыщения.

Выполнены расчеты для режима близкого к номинальному. За номинальное скольжение принята величина 0,029 о.е., что соответствует данным справочника [33].

Результаты расчета электромагнитного момента в номинальном режиме (режиме при номинальном скольжении) дают величину 51,1 Н·м, что на 1,2 Н·м меньше, чем в базовом варианте двигателя (то есть без мостика насыщения).

Таким образом, действие мостика насыщения на величину электромагнитного вращающего момента неоднозначное: происходит его некоторое увеличение в момент пуска и уменьшение в номинальном режиме.

Оценим далее эффективность паза ротора с трапецеидальной верхней частью. Последовательность расчетов используется такая же.

Для асинхронного двигателя с пазами рассматриваемой трапецеидальной формы электромагнитный вращающий момент в режиме пуска оказался на 2,5 % меньше, чем для пазов с овальной формой верхней части.

В номинальном режиме электромагнитный момент меньше уже на 3,7 %! Другими словами, расчет электромагнитного поля не подтвердил преимуществ паза с трапецеидальной верхней частью.

Какой вывод можно сделать из полученных результатов?

1 Современные асинхронные двигатели – это машины с насыщенной магнитной цепью и сложной конфигурацией зубцовой зоны и следует, по возможности, стараться избегать допущений идеализированной электрической машины.



Рисунок 2.16 - Увеличенный фрагмент

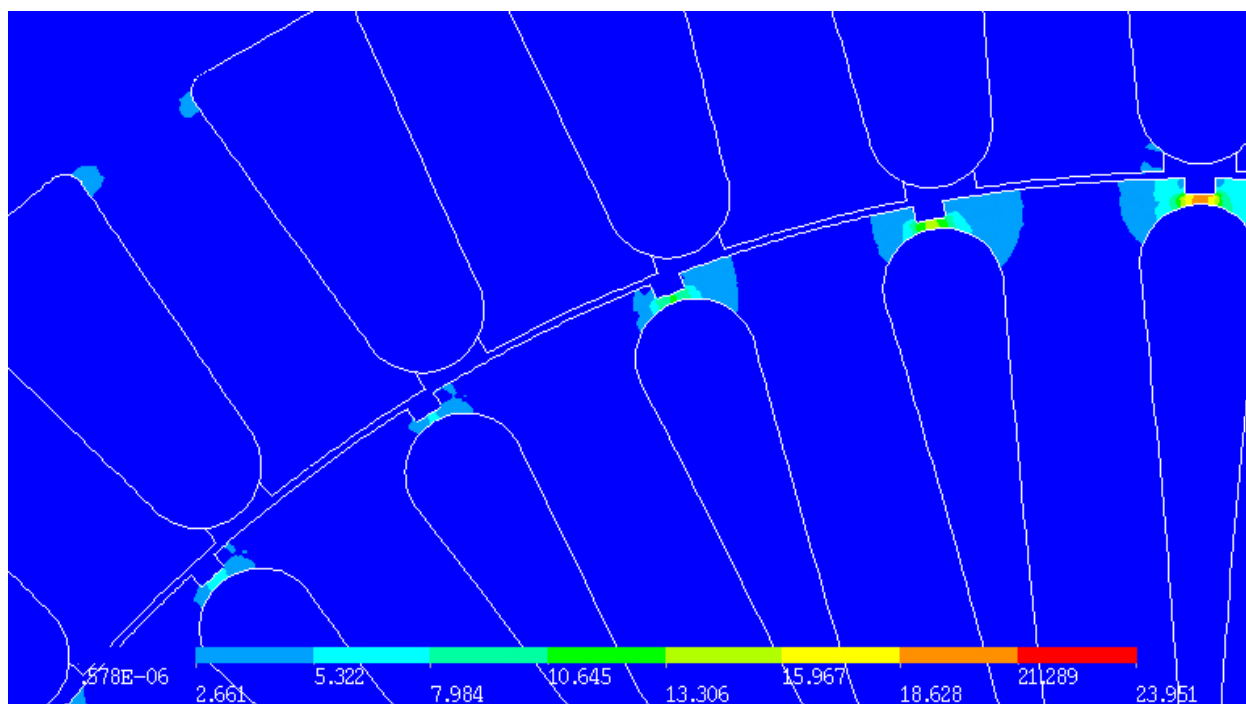


Рисунок 2.17 - Увеличенный фрагмент с уровнями суммарного вектора магнитной индукции в Тл



Рисунок 2.18 - Увеличенный фрагмент магнитных силовых линий в номинальном режиме

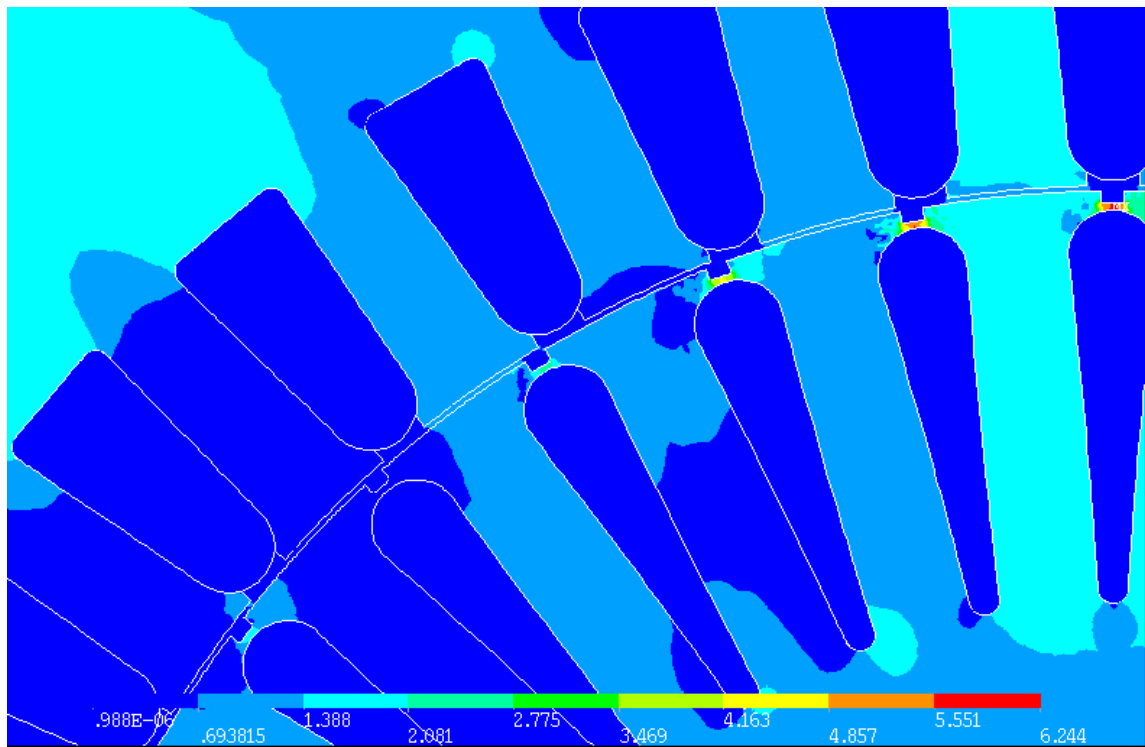


Рисунок 2.19 - Увеличенный фрагмент с уровнями суммарного вектора магнитной индукции в Тл (номинальный режим)

Форма паза усовершенствованного ротора приведена на рисунке 2.20.

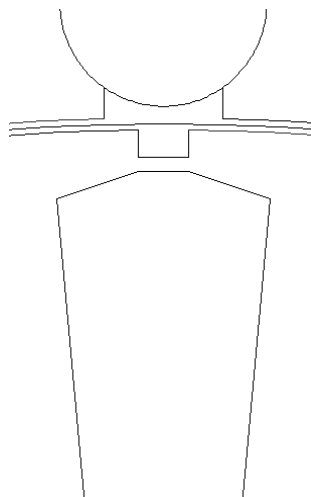


Рисунок 2.20 - Второй вариант усовершенствованного паза ротора (мостик насыщения над верхней частью паза равен 0,4 мм, а площадь паза сохранена как на рисунке 2.18)

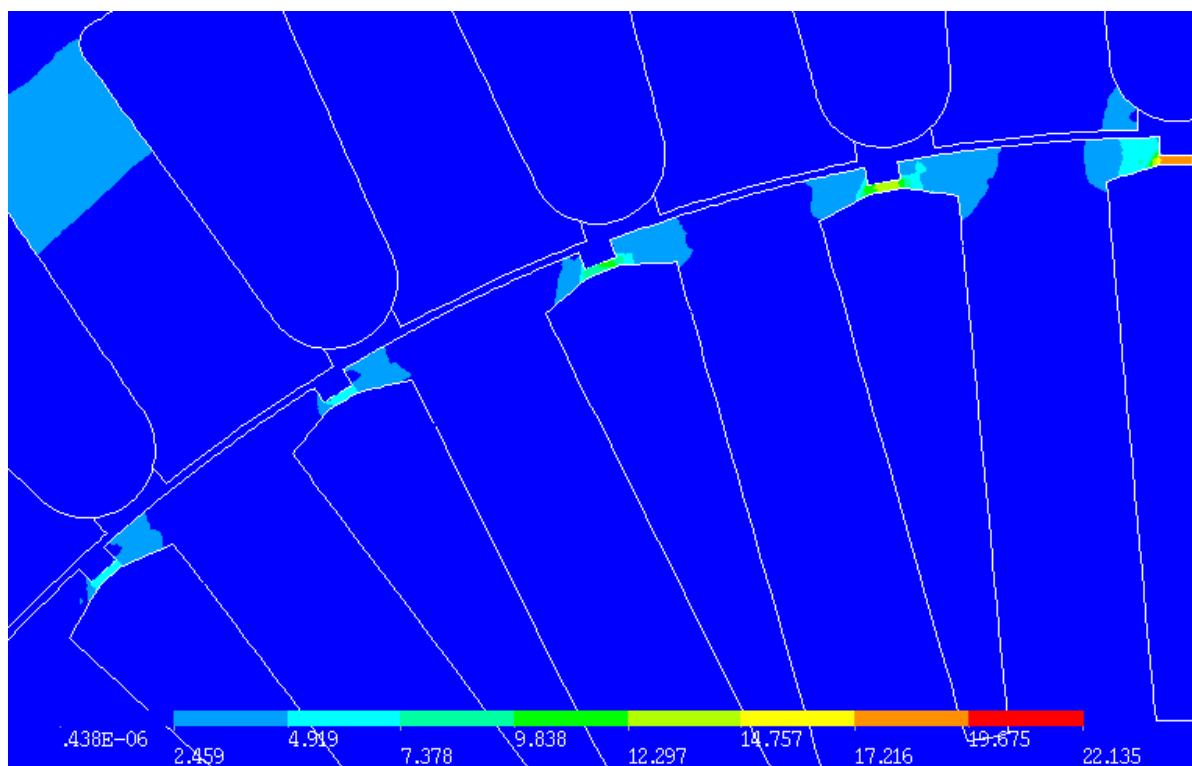


Рисунок 2.21 - Увеличенный фрагмент с уровнями суммарного вектора магнитной индукции в Тл (пусковой режим)

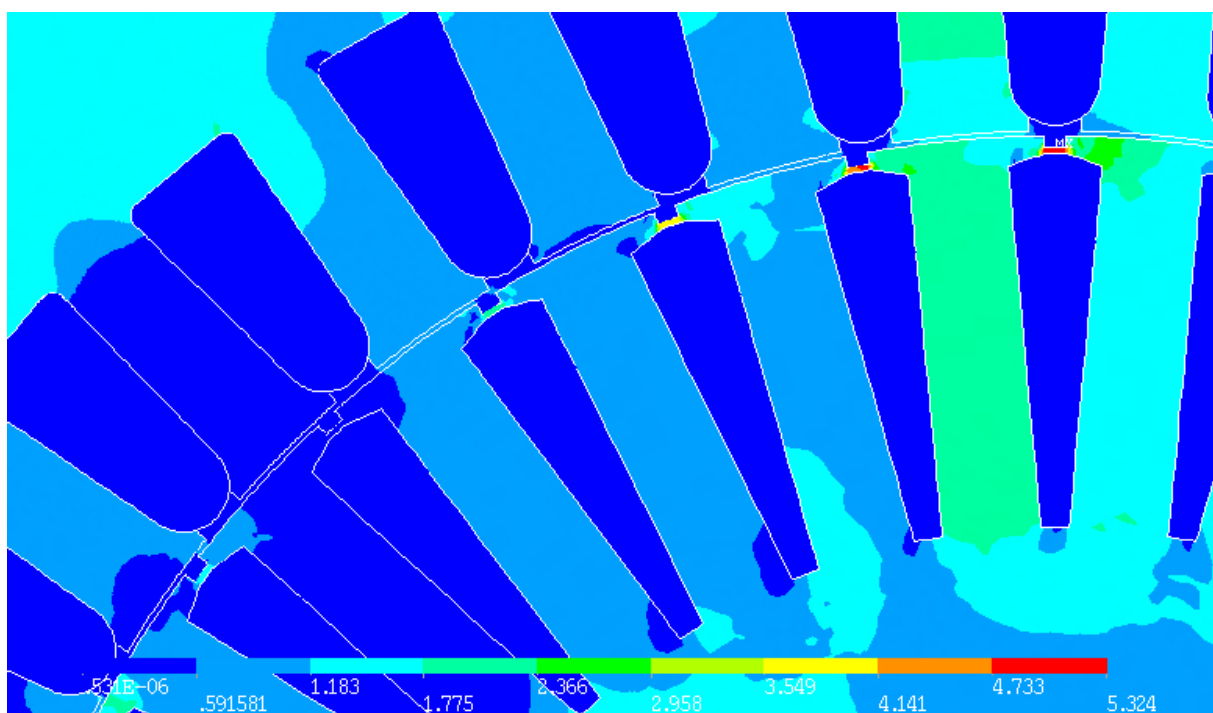


Рисунок 2.22 - Увеличенный фрагмент с уровнями суммарного вектора магнитной индукции в Тл (номинальный режим)

2 Допущения о гладкости воздушного зазора и неизменном уровне насыщения магнитной цепи (метод электрических цепей, или схем замещения) приводит к результатам, отражающим действительность с заметной погрешностью.

3 Предыдущий вывод можно распространить и на диаграммы Гергеса, часто используемые для анализа эффективности схем обмоток. В его основе лежат два краеугольных допущения: гладкость воздушного зазора и линейность магнитной цепи. Для некоторых оценочных расчетов этими диаграммами пользоваться можно, но в целом, подходить следует с учетом особенностей распределения электромагнитного поля.

4 Используя метод конечных элементов применительно к расчету электромагнитного поля можно анализировать не только формы пазов, конструкции магнитных клиньев и перемычек, но также и эффективность схем статорных обмоток.

2.4 Влияние соотношений чисел пазов статора и ротора на эффективность электромеханического преобразования

Прежде, чем приступить к исследованию данного вопроса, оценим, какие существуют рекомендации по проектированию пазов ротора в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором.

Во-первых, существуют обширные данные по рациональному числу пазов ротора, проверенные многолетней практикой производства данных изделий. Другими словами, в технической литературе имеются четкие рекомендации по выбору числа пазов ротора и их конфигурации для любого требуемого случая.

Во-вторых, площадь всех пазов ротора должна быть как можно больше. Хотя прямого такого указания нет, но это вытекает из всего хода вывода расчетных соотношений (активное сопротивление ротора негативно сказывается на способности асинхронного двигателя к эффективному электромагнитному преобразованию). Это вызывает стремление уменьшить

эквивалентное сопротивление короткозамкнутой обмотки и повысить КПД двигателя. Пусковой момент при этом будет неизбежно снижаться (как отмечается у многих авторов).

В-третьих, если необходимо увеличить начальный пусковой момент, то следует на роторе выбирать глубокие пазы, что позволит проявиться эффекту вытеснения тока к раскрытию паза.

У специалистов-электромехаников сложилось устойчивое убеждение, что в технической литературе существует полные и исчерпывающие рекомендации по проектированию трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [5- 10, 12, 13, 32, 33, 36, 37], хотя, конечно, для их использования требуется большой практический опыт.

До недавнего времени так считали и мы. Сомнения возникли, когда пришлось анализировать конкретное исполнение асинхронного двигателя 4A132S4 [33]. Это четырехполюсный электродвигатель, имеющий на статоре 36 пазов. Процитированные источники были обработаны и сведены в таблицу 2.3. При этом во внимание принимались рекомендации для прямых пазов ротора. Во-первых, от скоса пазов часто отказываются, когда мощность электродвигателя превышает 20 кВт, а, во-вторых, и для меньших мощностей однозначных рекомендаций по скосу не существует.

Приведенные данные показывают, что таблица рекомендуемых чисел пазов представляет собой достаточно разреженную матрицу. Средний процент совпадения рекомендаций составляет 33%. Это говорит о том, что, вероятно, существует некоторый параметр, который следует обязательно учитывать, не принимаемый авторами при рассмотрении.

Таблица 2.3 - Число пазов короткозамкнутого ротора Z_2 , рекомендуемое рядом авторов для четырехполюсных АД, имеющих на статоре $Z_1 = 36$

Костенко М.П., Пиотровский Л.М. 1965 г.	Постников И.М. 1960 г.	Геллер Б., Гамата В. 1981г.	Рихтер Р. 1939 г.	Гаинцев Ю. В. 1981 г.	Делекторский Б.А. и др. 1968 г	Под общей редакцией Петрова В.М. 1980 г.	Поволоцкий М.Е. 1970 г.	Гольдберг О.Д. 1984 г.	Под общей редакцией Копылова И.П. 1980 г.	Сергеев П.С. 1969 г.	Процент совпадения рекомендаций (их качество)
10	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	18%
14	-	-	14	-	14	-	-	-	-	-	27%
22	-	-	22	-	22	-	-	-	-	-	27%
-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	9%
26	26	26	26	-	26	26*	26	26	26	26	91%
-	-	28	-	-	-	28*	-	-	-	-	18%
30	-	30	30	-	30	30*	30	-	-	-	54%
-	-	-	-	34*	-	34*	-	-	-	-	18%
-	-	-	-	-	-	-	-	38	-	-	9%
42	-	42	42	-	42	-	42	-	-	-	45%
-	44	-	-	-	-	44	-	44	44	44	45%
46	46	46	46	-	46	-	46	46	46	46	82%
50	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	18%
54	-	-	54	-	-	-	-	-	-	-	18%
58	-	-	58	-	-	-	-	-	-	-	18%
* - означает применение скоса пазов							Средний процент			33%	

Если убрать несколько цифр, связанных со скошенными пазами, вероятность больше не станет. Оценим выявленную ситуацию как противоречивую: напрашивается сомнение в достаточности рекомендаций в части проектирования листа ротора. Не будем делать поспешных выводов по данным только одной таблицы. Вспомним, что серии асинхронных двигателей в нашей стране имеют почти 60-летнюю историю. Напомним коллегам, как менялось представление об оптимальном количестве пазов короткозамкнутого ротора в последовательно выпускаемых сериях асинхронных трехфазных электродвигателях электротехпромом СССР. Данные сведем в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Число пазов короткозамкнутого ротора Z_2 для четырехполюсных АД, имеющих на статоре $Z_1 = 36$

Серия А и АО	Серия А2 и АО2	Серия 4А
26	26	28
44	-	34
46	46	-

В серии 4А опыт предыдущих разработок не позаимствован. Напрашивается вывод, что в серии 4А найдены столь оптимальные соотношения чисел пазов, что улучшить их параметры не представляется возможным и сейчас. Проверим это, используя метод конечных элементов. Несмотря на то, что серия 4А эта была разработана в 1971 г., это последняя серия электродвигателей, геометрия зубцовых зон которых опубликована в открытой печати в виде справочника [33].

Проведенный ряд расчетов с варьируемыми числами и формами пазов в базовом двигателе 4А132S4 показал следующее. Базовый электродвигатель на роторе имеет 34 паза (рисунок 2.2) каждый из которых имеет площадь поперечного сечения $100,91 \text{ мм}^2$. Фрагмент конфигурации его пазовой зоны был представлен на рисунке 2.7. Общая площадь пазов ротора в данном случае равна 3431 мм^2 .

Среди ряда рассмотренных вариантов обращает на себя внимание следующий. Рисунок 2.23 иллюстрирует геометрию пазового слоя ротора.

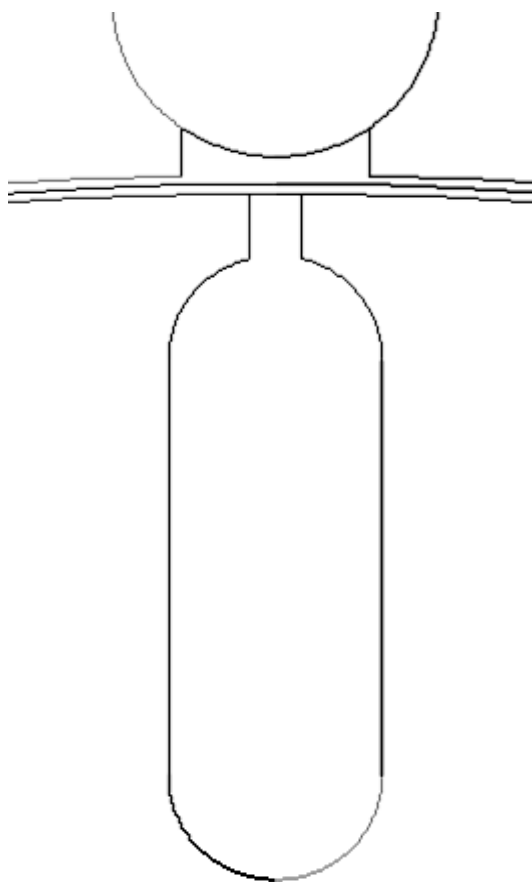


Рисунок 2. 23 - Форма паза короткозамкнутого ротора модернизируемого электродвигателя

Обратим внимание на следующую деталь. Число пазов ротора в данном случае равно 50. Существующие рекомендации не поддерживают данное число. Другими словами, характеристики электродвигателя с таким ротором должны уступать базовому варианту. Площадь каждого из пазов нового ротора существенно уступает площади паза базового варианта: она равна $45,79 \text{ мм}^2$. Общая площадь пазов модернизируемого ротора равна 2290 мм^2 . Это составляет 67 %, от площади пазов базового электродвигателя 4A132S4.

Фрагмент пазовой зоны модернизируемого электродвигателя приведен на рисунке 2.24. Каких характеристик следует ожидать?

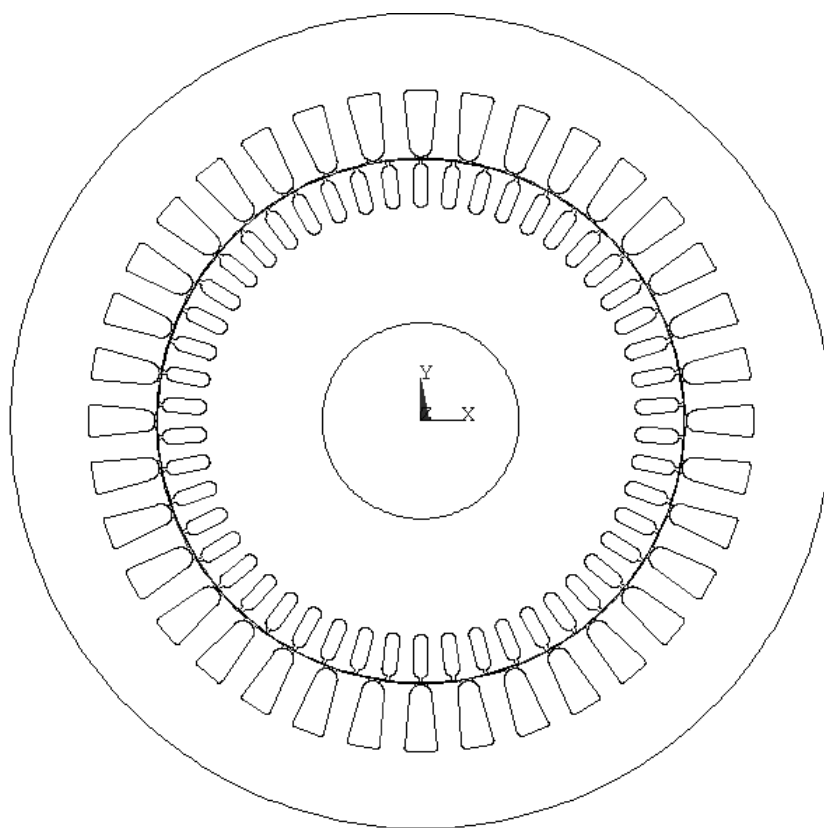


Рисунок 2.24 - Фрагмент конфигурации пазовой зоны асинхронного двигателя 4A132S4 с модернизированным ротором

Если воспользоваться опытом проектирования, изложенным в общем теоретическом курсе электрических машин и пособиях по проектированию асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, то следует ожидать увеличения пускового момента, поскольку увеличено сопротивление беличьей клетки ротора и снижения КПД (электромагнитного момента в номинальном режиме) по этой же причине.

Токовые нагрузки сохраним как в базовом варианте. Результаты расчета в виде картины магнитных силовых линий в поперечном сечении двигателя и уровни магнитной индукции на участках магнитопровода приведены на рисунках 2.25 и 2.26.

Кривая магнитной индукции на полюсном делении рассматриваемого варианта приведена на рисунке 2.27. Из последнего рисунка следует, что спектральный состав электромагнитного поля заметно изменился по сравнению с рисунком 2.10 базового варианта электродвигателя.

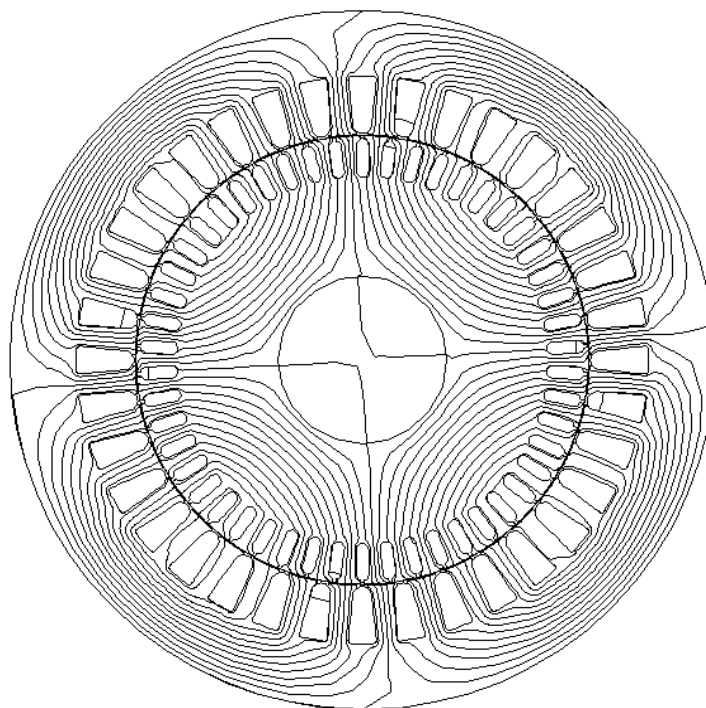


Рисунок 2.25 - Картина магнитных силовых линий в номинальном режиме работы модернизируемого варианта 4A132S4

Определим величину электромагнитного вращающего момента в данном режиме. Она составляет 57,5 Н·м. Это на 10% больше, чем у базового варианта. Если не брать во внимание целенаправленной «деформации» зубцовой зоны ротора, то ничего из ряда вон выходящего нет.

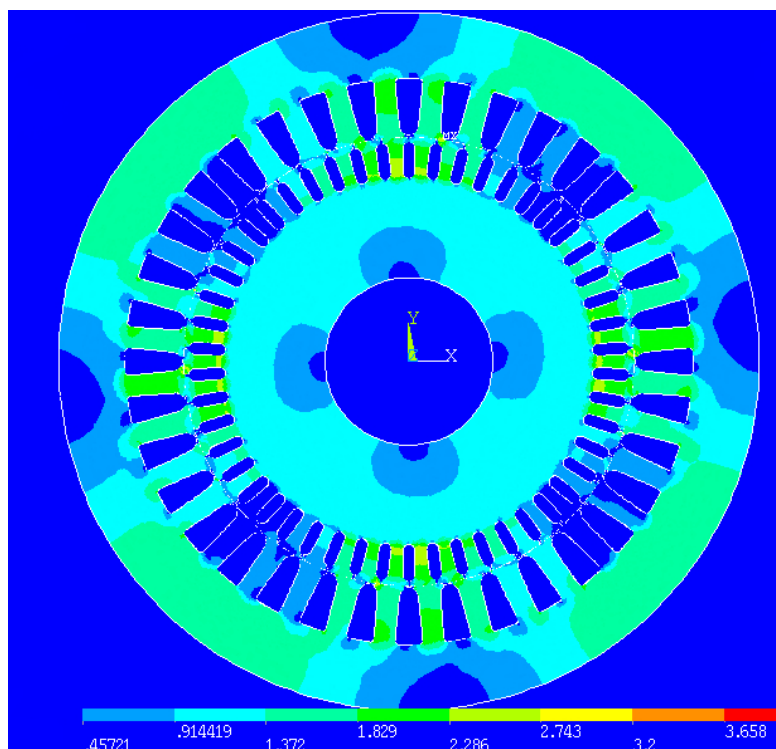


Рисунок 2.26 - Уровни магнитной индукции в номинальном режиме исследуемого электродвигателя 4A132S4

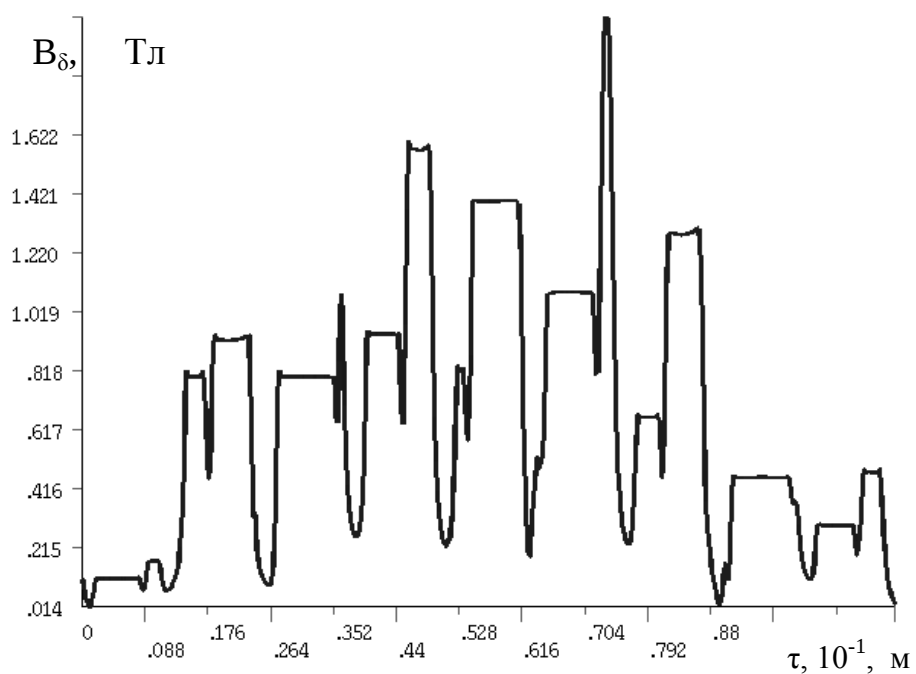


Рисунок 2.27 - Распределение кривой магнитной индукции в воздушном зазоре на полюсном делении при номинальной нагрузке на валу ($s = 0,029$ о.е.) исследуемого электродвигателя 4A132S4

Однако напомним, было увеличено активное сопротивление обмотки ротора в трехфазном асинхронном двигателе, но вместо уменьшения КПД (а электромагнитный момент ему пропорционален) получено его увеличение! Таким образом, классическая теория идеализированной трехфазной асинхронной машины в данном случае перестает точно отражать действительность. Что же такого было сделано? Возьмем ответственность предположить, что повысилась эффективность работы электрической машины: ее способность выполнять электромеханическое преобразование энергии с меньшими потерями. Число и форма пазов ротора кардинально изменили спектральный состав высших гармоник электромагнитного поля, причем настолько, что такой фактор как активное сопротивление ротора оказался менее значимым при определении эффективности электромеханического преобразования.

Проверим и другую гипотезу: спектральный состав поля определяется, в том числе, и величиной нагрузки на валу, то есть зависит и от скольжения. В этом смысле оценка пускового режима данного варианта модернизированного электродвигателя должна быть проведена обязательно.

Взяв за основу наши представления о том, каким должен быть пусковой момент в том случае, когда активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора увеличилось, проверим это.

Задав токовые нагрузки, соответствующие пусковому режиму, был рассчитан электромагнитный момент в момент пуска ($s = 1$). Он оказался равным 86,94 Н·м. Это на 13% меньше, чем у базовой конструкции, во-первых, а, во-вторых, вновь общие принципы проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором не выполняются.

Попытаемся оценить полученный результат. Был выбран заведомо не рекомендуемый по числу пазов ротора вариант. Он показал, что действительно, по пусковому моменту оказался проигрыш на 13%. Но этот самый вариант можно оценить и как новый научный результат, который показывает, что в теории электрических машин наряду с общими закономерностями существуют

и исключения. Приведем еще одно конструктивное соотношение пазовой части ротора. Отношение высоты паза ротора к его ширине равно 3,3.

Авторы, приводящие данные по соотношению чисел пазов статора и ротора, и в частности, по количеству пазов ротора никак не оговаривали их другие параметры: площади, форму, геометрические пропорции. По умолчанию считалось, что чем больше площадь паза (поперечное сечение) тем лучше.

Возьмем только что рассмотренный вариант ротора с 50 пазами. Увеличим отношение высоты паза к его ширине, но так, что паз станет уже. Отношение высоты паза ротора к его ширине сделаем равным 4,3, а площадь одного паза уменьшим с $45,79 \text{ мм}^2$ до $37,75 \text{ мм}^2$. Другими словами: пазов осталось такое же число (50) но они стали уже.

Электромагнитный момент в номинальном режиме оказался больше, чем у базового варианта на 7,8%, а пусковой момент увеличился по сравнению с базовым вариантом на 12%! То есть, данный вариант выигрывает у базового варианта по всем показателям. Напомним, что расчетная длина машины осталась неизменной: 115 мм.

Таким образом, очевидным становится следующее утверждение. Важным при проектировании асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является не только соотношение чисел пазов, но и их форма, отношение высоты паза к ширине, а также площадь поперечного сечения.

2.5 Выводы

1 Вычислительный эксперимент, проведенный методом конечных элементов, позволил уточнить рациональное соотношение чисел пазов статора и ротора четырехполюсного асинхронного электродвигателя.

2 Показано, что увеличение активного сопротивления обмотки ротора не всегда приводит к увеличению пускового момента, найдены условия, когда происходит его снижение. Это, с нашей точки зрения, обусловлено изменением гармонического состава электромагнитного поля в воздушном зазоре

асинхронного двигателя происходящее при изменении соотношений геометрических размеров зубцовой зоны.

3 Используя 50 пазов на роторе, вместо рекомендуемых 34 [33], при 36 пазах статора удастся на 48% экономить алюминий в пазовой части электродвигателя. При этом характеристики электродвигателя не только не ухудшаются, но заметно улучшаются (пусковой момент возрастает на 12%, а номинальный на 7,8%).

4 Еще одним подтверждением того, что гармонический состав электромагнитного поля определяющим образом влияет на характеристики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, является то, что выбор соотношения чисел пазов, их формы и площади, позволяет получить повышение КПД электродвигателя даже в случае некоторого увеличения активного сопротивления обмотки ротора.

3 ФОРМИРОВАНИЕ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

3.1 Пульсации электромагнитного вращающего момента в электродвигателе 4A132S4

Выше был рассмотрен стандартный двигатель 4A132S4, который имеет трёхфазную однослойную обмотку в развалку с шагом по пазам $y = 9$ и числом пазов на полюс и фазу $q = 3$. Обмотка двигателя однослойная, коэффициент укорочения такой обмотки равен единице. Схема обмотки приведена на рисунке 3.1.

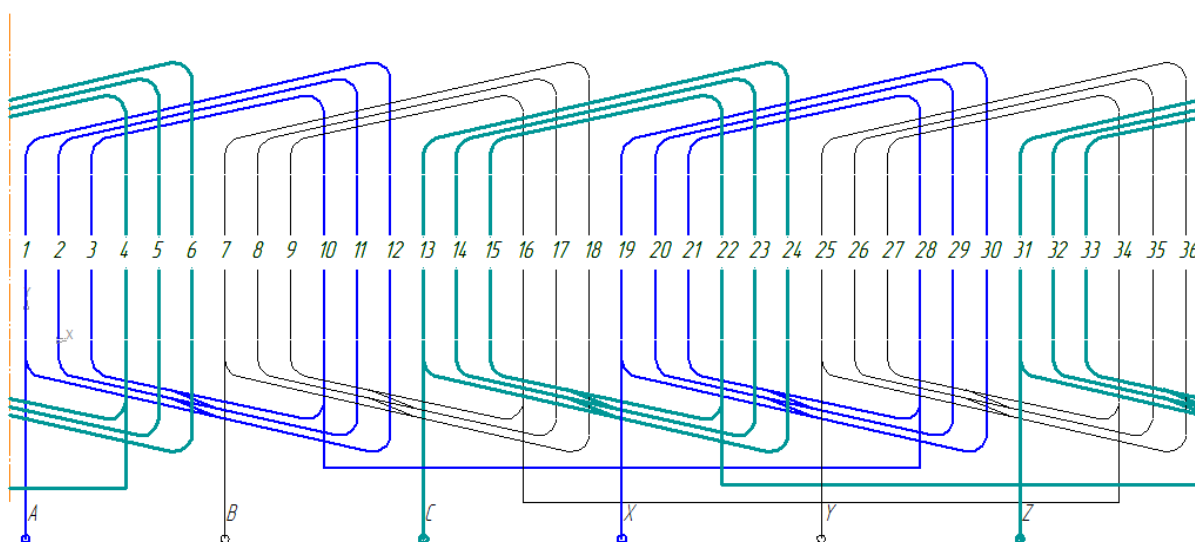


Рисунок 3.1 - Схема обмотки статора двигателя 4A132S4

Произведём анализ величины электромагнитного вращающего момента при работе двигателя в номинальном режиме. Номинальные параметры двигателя взяты из справочника [33] и приведены выше. В двигателе используются трапециевидные пазы на статоре и грушевидные пазы на роторе.

Наличие зубчатых магнитопроводов на роторе и статоре должны приводить к пульсациям электромагнитного поля и, как следствие, к пульсациям электромагнитного вращающего момента в номинальном и пусковом режимах. Для того, чтобы рассчитать эти пульсации поступим

следующим образом. Начертим в модели некоторое начальное положение зубцов ротора относительно зубцов статора. Например, как это сделано на рисунке 2.7. Рассчитаем величину электромагнитного вращающего момента для режима номинального скольжения. Для этой цели, как и ранее, применим низкочастотный гармонический анализ и метод конечных элементов. При этом в пазах обмотки статора зададим номинальную плотность тока (2.24). Затем перестроим модель так, чтобы положение пазов ротора и статора сдвинулось на 1 градус (геометрический). Расчеты повторим. Повторив одиннадцать раз описанную процедуру, заполним таблицу 3.2.

Таблица 3.1. Пульсация электромагнитного момента в режиме номинального скольжения

Угол поворота ротора, градусы	М, Н·м
0	52,0
1	52,2
2	52,0
3	51,5
4	51,9
5	50,9
6	51,8
7	51,1
8	51,4
9	50,9
10	52,0

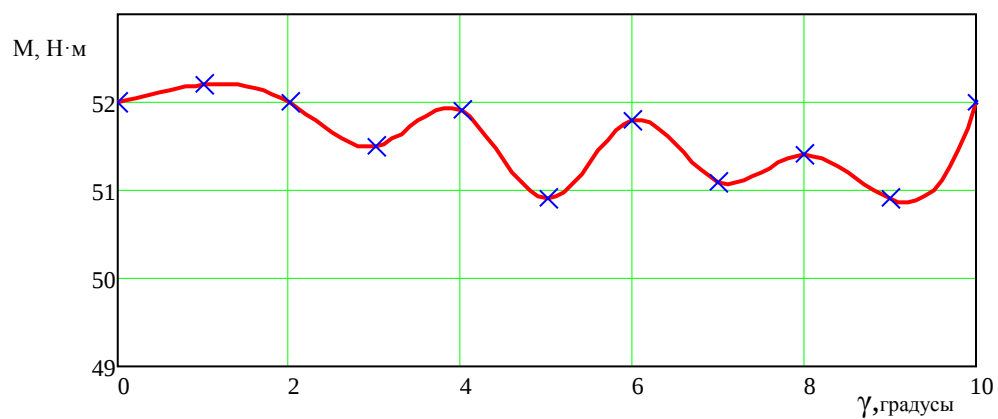


Рисунок 3.2 - Зависимость момента от угла, определяющего положение ротора относительно статора

Для режима пуска результаты расчетов сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Пульсация электромагнитного момента в пусковом режиме

Угол поворота ротора, в градусах	M , Н·м
0	100,973
1	105,108
2	99,607
3	103,11
4	101,728
5	100,512
6	101,802
7	93,393
8	96,185
9	96,506
10	101,806

Среднее арифметическое значение электромагнитного вращающего момента при номинальном скольжении будет равно 51,6 Н·м. Рисунок 3.2 иллюстрирует полученные при расчетах данные.

Для пускового режима повторим аналогичную последовательность вычислений. Для расчета пускового режима учтем, что частота перемагничивания ротора и статора будут одинаковыми 50 Гц, а плотность тока в пазах статора в режиме пуска определится выражением (2.25).

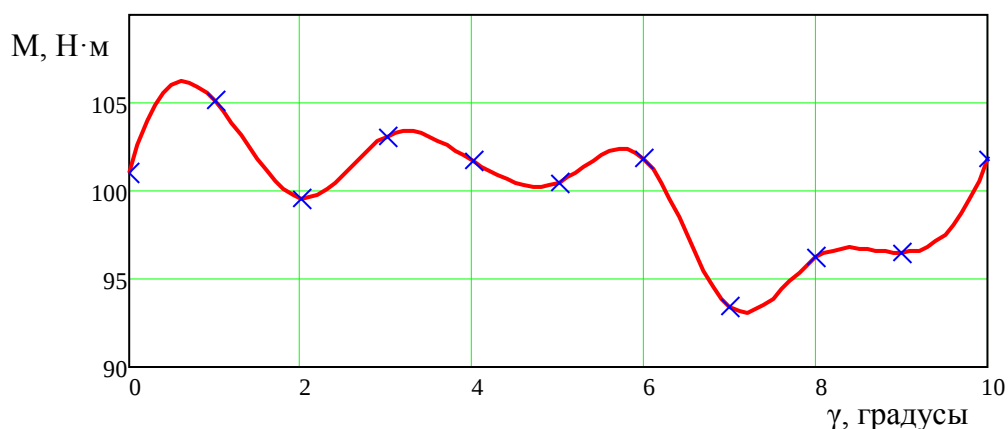


Рисунок 3.3 - Зависимость электромагнитного момента от угла, определяющего положение ротора относительно статора в момент пуска

Среднее значение момента при пуске в зависимости от положения зубцов ротора относительно зубцов статора равно 99,8 Н·м.

Полученные данные говорят о том, что для повышения точности расчета электромагнитного момента вращения следует делать несколько расчетов при различных положениях зубцов ротора относительно статора. За искомое значение электромагнитного момента следует принимать среднее арифметическое значение, понимая, что оно будет неизбежно отличаться от мгновенного значения. Таким образом, электромагнитный момент в течении одного оборота асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором периодически изменяется относительно среднего значения. И это следует учитывать.

3.2 Влияние числа пазов ротора на электромагнитный момент двигателя 4A132S4

Проанализируем влияние изменения геометрии ротора на величину электромагнитного вращающего момента.

Допущения при данном исследовании принимаются следующие:

1 Плотность тока в пазу статора принимается постоянной и равной той плотности тока, какую имеет рассматриваемый двигатель в анализируемом режиме.

2 Частота перемагничивания в задаче принимается равной частоте тока в роторе, что определяется скольжением рассматриваемого режима.

3 Варьированию подвергается число пазов ротора. Нижняя граница числа пазов не может быть меньше пяти.

4 Форма паза ротора, его размеры и площадь являются постоянными.

Число пазов будем изменять с шагом в один паз.

Воспользуемся гармоническим анализом и методам конечных элементов. Результаты расчета электромагнитного момента вращения для номинального скольжения приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Зависимость момента от числа пазов

Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м	Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м	Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м
5	15,2	18	14,9	31	54,7
6	6,4	19	47,5	32	53,6
7	19,9	20	51,2	33	52,8
8	18,5	21	50,0	34	52,0
9	9,4	22	52,8	35	50,2
10	29,9	23	54,1	36	12,6
11	30,8	24	42,7	37	47,2
12	11,7	25	56,0	38	46,0

13	35,5	26	56,4	39	45,3
14	36,7	27	52,5	40	44,9
15	42,3	28	55,0	41	43,5
16	42,5	29	56,1	42	41,7
17	44,4	30	58,5		

По данным таблицы на рисунке 3.4 приведен график зависимости электромагнитного момента вращения от числа пазов ротора.

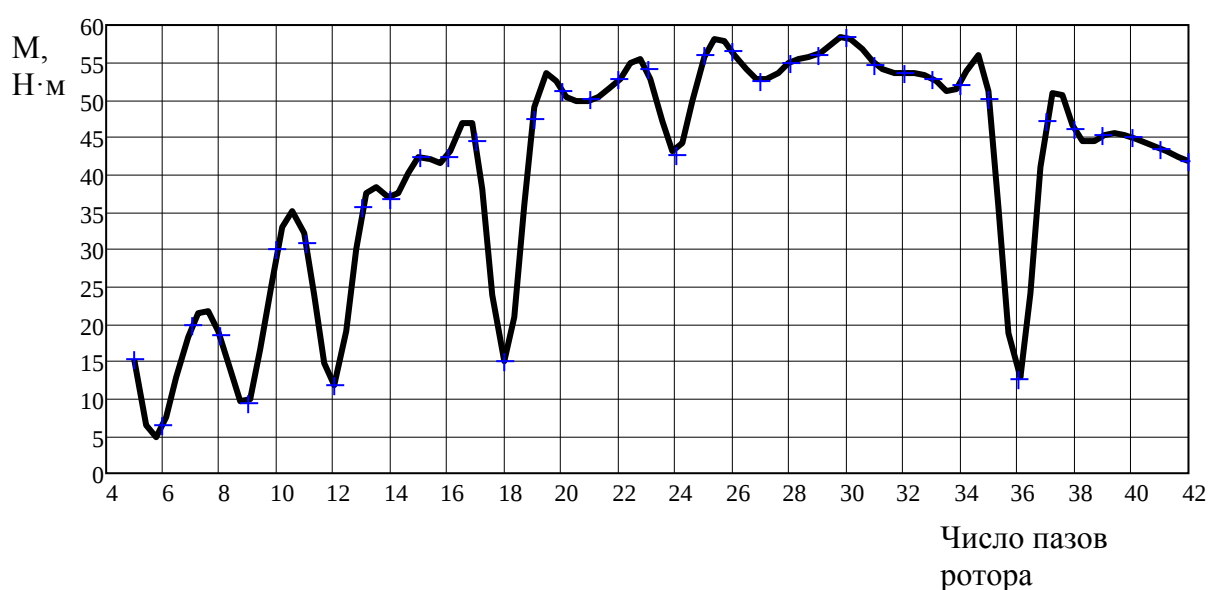


Рисунок 3.4 - Зависимость электромагнитного момента от числа пазов ротора при номинальном скольжении двигателя 4A132S4

Оценим полученные результаты. Базовому конструктивному исполнению соответствует число пазов ротора 34 и соответственно электромагнитный момент 52 Н·м. Эти данные были получены путем усреднения ряда значений электромагнитного вращающего момента. Другими словами, каждая точка графика и таблицы – это результат многих расчетов и их обработки. Анализ результатов свидетельствует о том, что оптимум числа пазов не совпадает со справочными данными базового варианта. Максимум момента имеет место при

числе пазов ротора 30, чему соответствует электромагнитный момент 58,5 Н·м. Этот момент на 12,5% больше момента в номинальном режиме.

Обратим внимание на то, что следует внимательно относиться к тому, что число пазов 30 дает лучшие результаты, чем 34 (как в базовом варианте 4A132S4). Площадь поперечного сечения паза ротора равна $100,91 \text{ мм}^2$. В этом случае базовый вариант двигателя имеет на роторе суммарное количество алюминия в поперечном сечении $100,91 \cdot 34 = 3430,94 \text{ мм}^2$. Вариант с 30 пазами на роторе будет иметь алюминия $3027,3 \text{ мм}^2$. При 30 пазах на роторе количество алюминия уменьшилось, но это уменьшение возместила электротехническая сталь. Проводимость магнитной цепи возросла, следовательно, намагничивающий ток требуется меньше. По этой причине эффективность электромеханического преобразования в данном случае возрастает, что и подтверждают расчеты электромеханического вращающего момента. В данном случае с изменением числа пазов ротора изменялась и суммарная площадь алюминия, которая, вероятно и привела к такому эффекту.

Проверим, какое влияние такое варьирование пазов ротора окажет на электромагнитный вращающий момент двигателя в пусковом режиме. В этом случае принимаем скольжение равным единице. Плотность тока в пазах статора определится выражением (2.24).

Остальные допущения для пускового режима применяются те же, что и для номинального. Результаты расчетов представлены в таблице 3.4. По данным которой, построен график зависимости $M = f(Z_2)$, представленный на рисунке 3.5.

Таблица 3.4 Зависимость электромагнитного момента от числа пазов в режиме пуска

Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м	Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м	Число пазов, Z_2	Электромагнитный момент, Н · м
5	106,2	18	126,1	31	107,6
6	108,8	19	159,5	32	109,5
7	149,0	20	160,4	33	103,9
8	147,5	21	155,1	34	101,0
9	121,3	22	144,3	35	96,5
10	178,1	23	140,3	36	24,8
11	183,6	24	108,2	37	87,0
12	130,9	25	128,6	38	79,7
13	181,6	26	124,6	39	78,8
14	178,9	27	119,4	40	72,6
15	185,7	28	109,9	41	69,0
16	167,0	29	111,1	42	60,9
17	172,3	30	102,3		

Оценивая полученные результаты можно отметить, что максимум электромагнитного момента при пуске смещается в сторону уменьшения числа пазов. Максимум электромагнитного момента в режиме с номинальным скольжением был получен при 30 пазах. Для пускового режима это число пазов следует еще уменьшить до 13 – 17.

Последнее, кстати, согласуется с известным положением, которое рекомендует увеличивать активное сопротивление короткозамкнутой клетки ротора для повышения пускового момента.

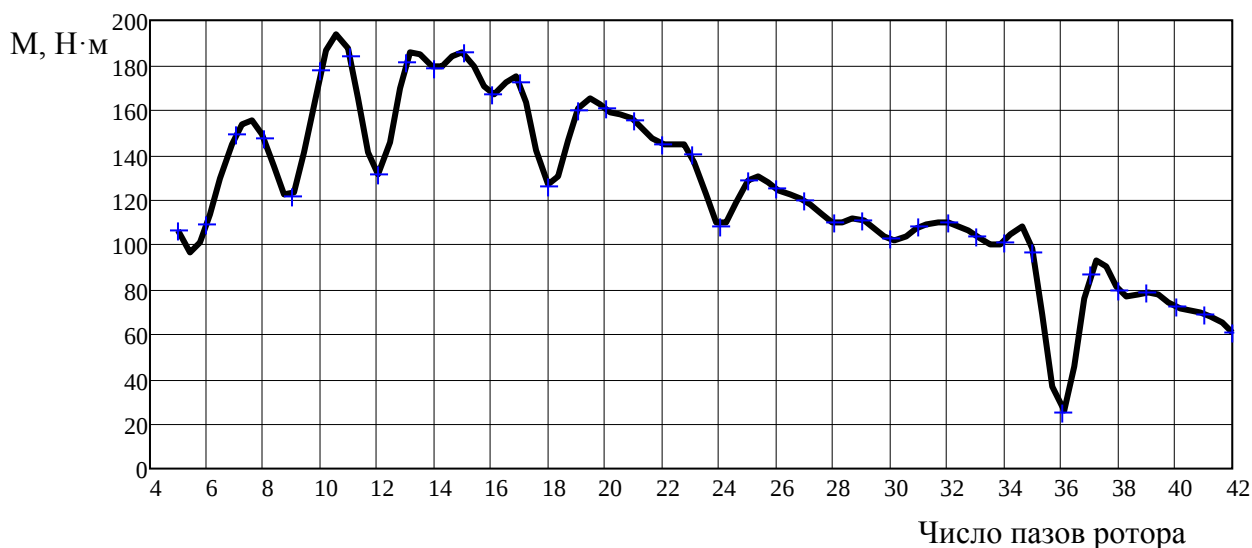


Рисунок 3.5 - Зависимость электромагнитного момента в пусковом режиме от числа пазов ротора

В завершении данного исследования отметим, что, говоря о числе пазов ротора корректно одновременно с этим оговаривать их суммарную площадь. Используем это утверждение в дальнейших исследованиях.

3.3 Влияние суммарной площади проводникового материала ротора в его поперечном сечении на электромагнитный момент вращения для четырехполюсного асинхронного двигателя мощностью 15 кВт

Имеющийся задел по расчету трехфазных асинхронных двигателей полученный выше будет использован и в данном случае [55]. За базовый вариант, который будет исследован и доведен до уровня энергоэффективного асинхронного двигателя, примем типоразмер 4A160S4 [33]. Обмоточные данные, плотность тока в обмотке статора и геометрию статорного листа возьмем из справочника. Геометрию листа ротора изменим следующим образом. Учитывая то, что число пазов статора равно 48, возьмем на роторе 50 пазов. Во-первых, число пазов рекомендуется выбирать четным, а во-вторых, эти числа должны обладать наименьшей кратностью. Форму паза примем

такой, чтобы, как вариант, была возможность использовать сварную медную клетку.

Эскиз зубцовой зоны моделируемого варианта электродвигателя показан на рисунке 3.6. Как и в предыдущих расчетах используем расчет электромагнитного поля методом конечных элементов. Пересчет скольжения в номинальном режиме дает величину 1,15 Гц. Будем использовать ее как базу для дальнейших расчетов. Плотность тока в пазу рассчитаем по выражению (2.23). Чтобы корректно учесть наличие потоков рассеяния, ограничим рассчитываемую область некоторым слоем воздуха, как показано на рисунке 3.7.

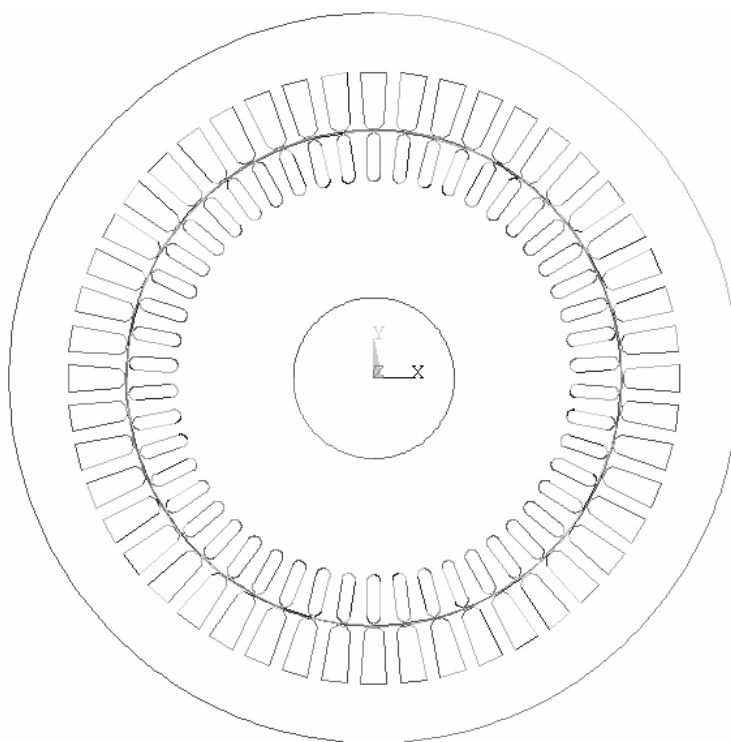


Рисунок 3.6 - Эскиз зубцовой зоны модернизируемого асинхронного двигателя
4A160S4

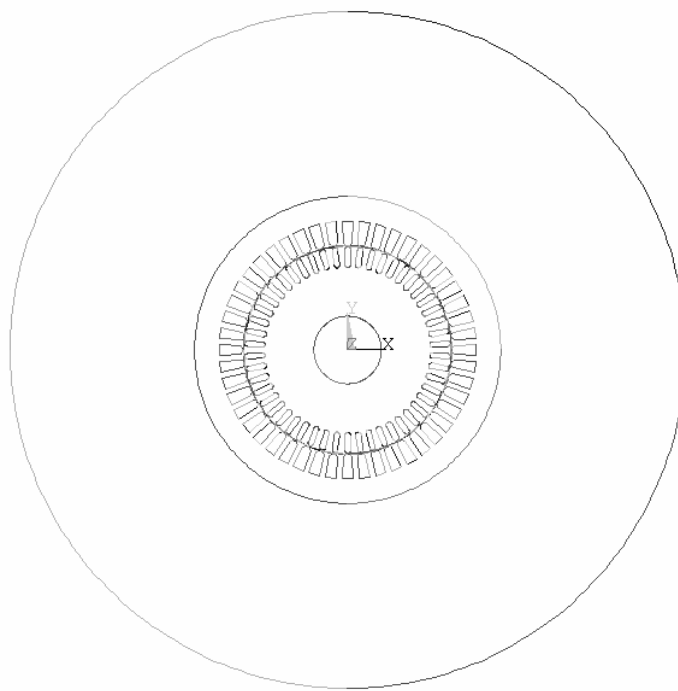


Рисунок 3.7 - Двумерная область моделирования асинхронного двигателя

Для расчета, как и ранее, применим метод конечных элементов и низкочастотный гармонический анализ. Картина распределения магнитных силовых линий поля в поперечном сечении электродвигателя при номинальной нагрузке показаны на рисунке 3.8.

Не будем приводить промежуточные данные, которые получаются при выполнении 9-10 расчетов и усреднения результирующего электромагнитного момента вращения. Приведем уже окончательный результат с учетом усреднения. То, что электромагнитный момент вращения за оборот и в номинальном, и в пусковом режимах имеет пульсации, которые объяснимы двусторонней зубчатостью воздушного зазора ранее было проиллюстрировано на рисунках параграфа 3.1.

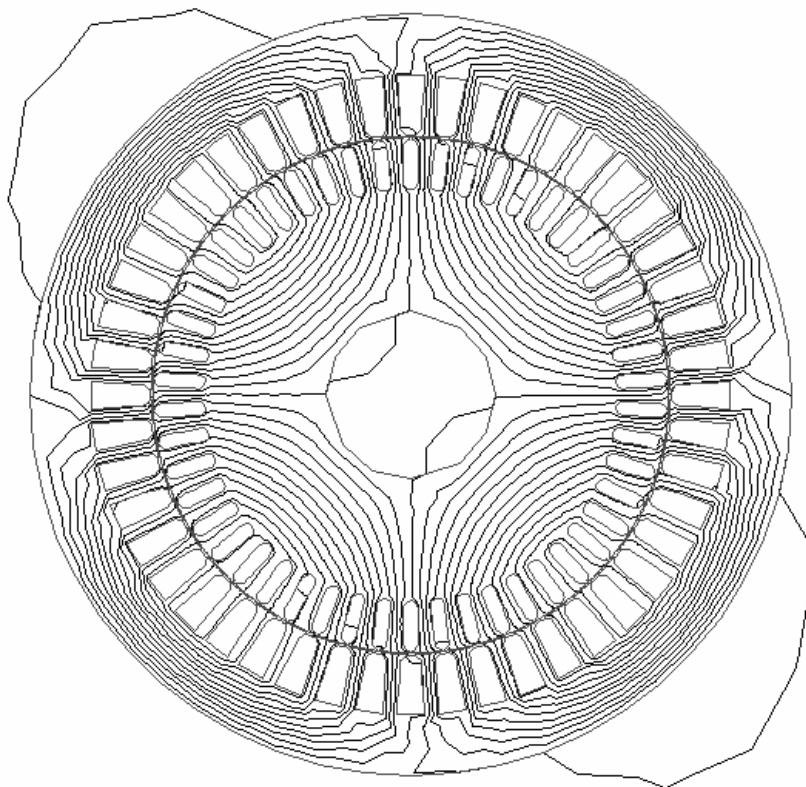


Рисунок 3.8 - Линии поля моделируемого электродвигателя при номинальном скольжении

Кривая распределения вектора магнитной индукции на протяжении пары полюсов в воздушном зазоре моделируемого электродвигателя приведена на рисунке 3.9.

Базовый вариант был рассчитан в соответствии с теми данными, которые приведены в справочнике [33]. Был определен момент при номинальном скольжении (его среднее арифметическое значение). Если принять его за базовый, то в данном случае достигается увеличение момента на 24%. Это увеличение получено за счет варьирования площадью паза ротора при неизменном их числе.

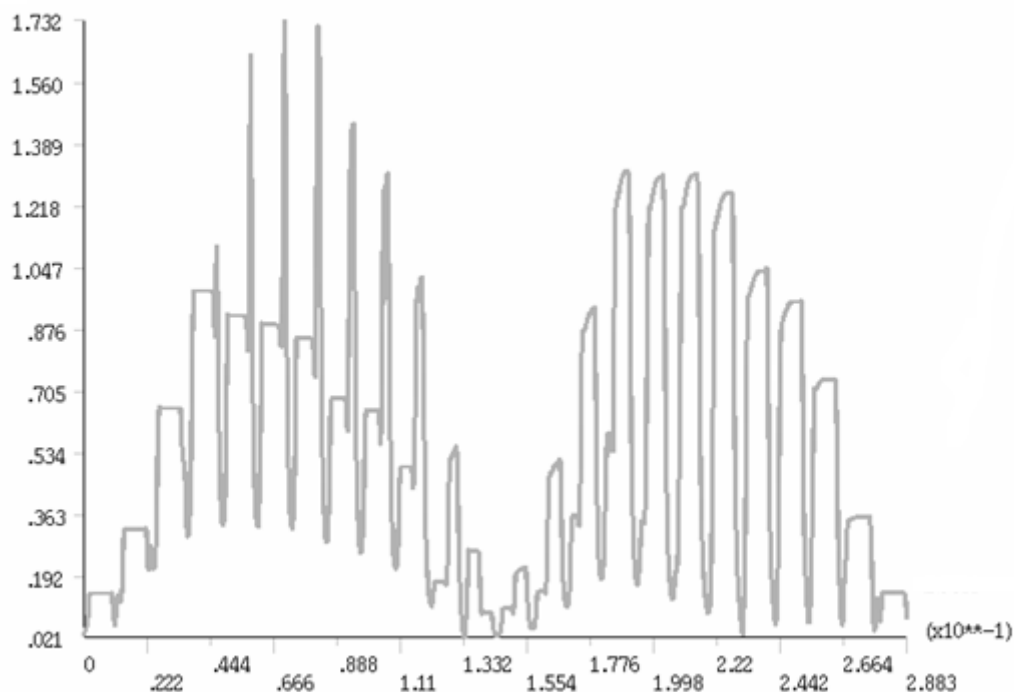


Рисунок 3.9 - Кривая магнитной индукции (в Тл) на полюсном делении

Расчеты показывают, что получить номинальный момент можно при гораздо меньшем токе статора. Оценка его ориентировочного уменьшения может быть получена как $\sqrt[2]{1,24} = 1,11$. То есть, на 11% меньше, чем в базовом варианте. Потребляемая двигателем мощность из сети уменьшится, практически, в такой же степени. Другими словами, устаревшее морально исполнение электродвигателя оказывается возможным модернизировать до более высокого уровня энергоэффективности за счет оптимизации его зубцовой зоны.

При выполнении расчетов принималось: схема обмотки статора – однослойная «вразвалку»; число эффективных проводников в пазу – 27;

в одном эффективном проводнике два элементарных; диаметр изолированного провода – 1,25 мм; диаметр голого провода – 1,33 мм; обмотка имеет две параллельные ветви. Размеры короткозамыкающих колец обмотки ротора: ширина – 12 мм, высота – 22 мм [33].

О характере насыщения магнитной цепи модернизируемого двигателя можно судить по данным рисунка 3.10.

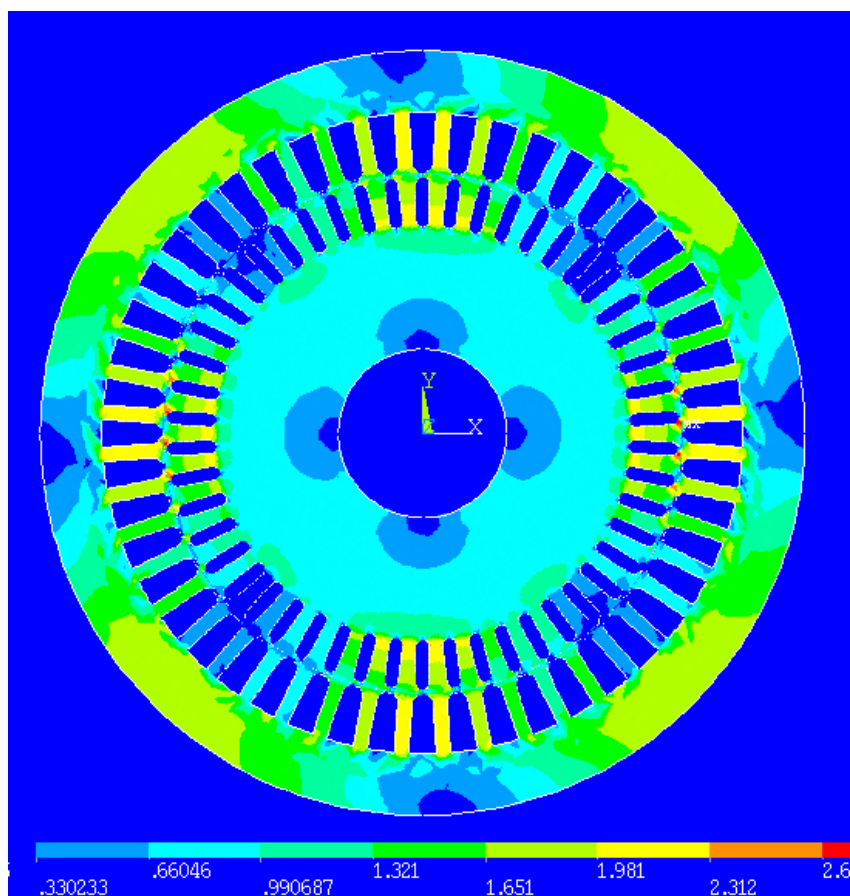


Рисунок 3.10 - Уровни индукции в поперечном сечении модернизируемого двигателя 4A160S4

Этот рисунок показывает, что спинка ротора по условиям насыщения позволят при необходимости разместить аксиальные вентиляционные каналы. Следующие размеры, характеризующие геометрию, соответствуют справочнику [33].

Наружный диаметр пакета статора – 272 мм.

Внутренний диаметр пакета статора – 185 мм.

Номинальная величина воздушного зазора – 0,5 мм.

Диаметр отверстия под вал – 60 мм.

Число пазов статора – 48.

За исключением числа пазов ротора – 50.

Для оценки суммарной площади пазов ротора, получившейся в результате оптимизации, приведем отношение ее к площади окружности ротора. Площадь одного паза ротора равна $85,7 \text{ мм}^2$. На роторе 50 пазов. Площадь алюминия ротора равна $85,7 \cdot 50 = 4285 \text{ мм}^2$. Площадь окружности ротора равна 26577 мм^2 . Назовем данный коэффициент – коэффициент пазов ротора. Искомый коэффициент равен

$$K_{\text{пр}} = 4285/26577 = 0,161.$$

Аналогичный коэффициент у базового двигателя равен 0,267. Другими словами, модернизация пазового слоя ротора приводит к уменьшению проводникового материала в его поперечном сечении.

3.4 Влияние суммарной площади проводникового материала ротора в его поперечном сечении на электромагнитный момент вращения для четырехполюсного асинхронного двигателя мощностью 0,75 кВт

В имеющемся заделе получены положительные результаты модернизации четырехполюсных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Оценим вариант двигателя исходный для модернизации 4A71B4. Это четырехполюсный двигатель мощностью 0,75 кВт. Его подробная геометрия и обмоточные данные также содержатся в справочнике [33]. Подготовим математическую модель для решения методом конечных элементов так, как уже было описано выше. Геометрия поперечного сечения базового электродвигателя 4A71B4 приведена на рисунке 3.11. Приведем его расчет, чтобы сравнить с вариантом, полученным в результате параметрической оптимизации пазовой зоны ротора. Как и ранее, рассмотрим режим, который характеризуется номинальным током обмотки статора и номинальным скольжением. В этом режиме частота тока в роторе равна 3,75 Гц. За номинальный режим будем считать такой, когда частота тока в роторе соответствует номинальному скольжению.

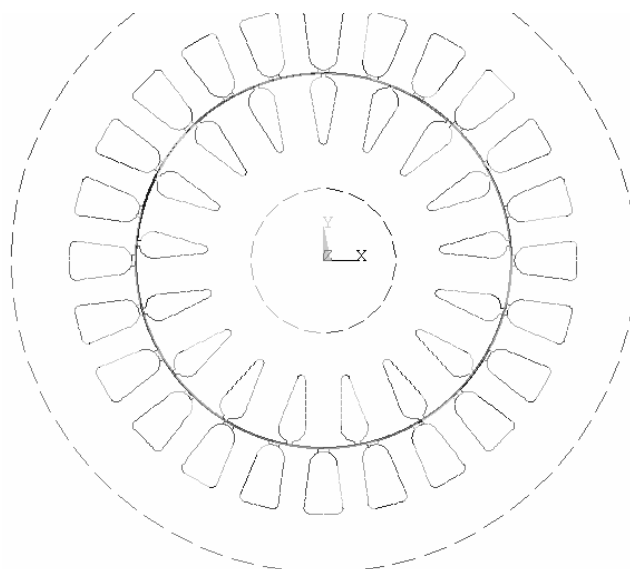


Рисунок 3.11 - Поперечное сечение базового двигателя 4A71B4

Картина распределения магнитных силовых линий в поперечном сечении двигателя в номинальном режиме приведена на рисунке 3.12, а график распределения модуля вектора магнитной индукции на полюсном делении приведена на рисунке 3.13.

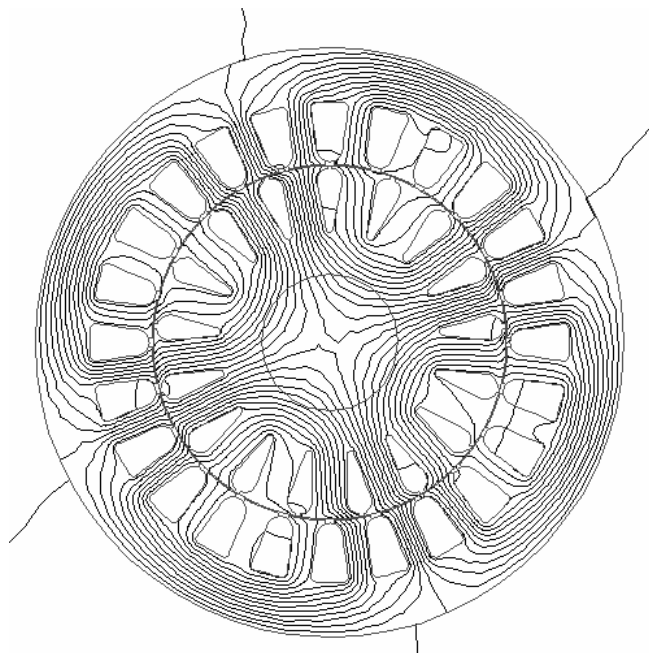


Рисунок 3.12 - Распределение магнитных силовых линий в поперечном сечении модернизируемого электродвигателя

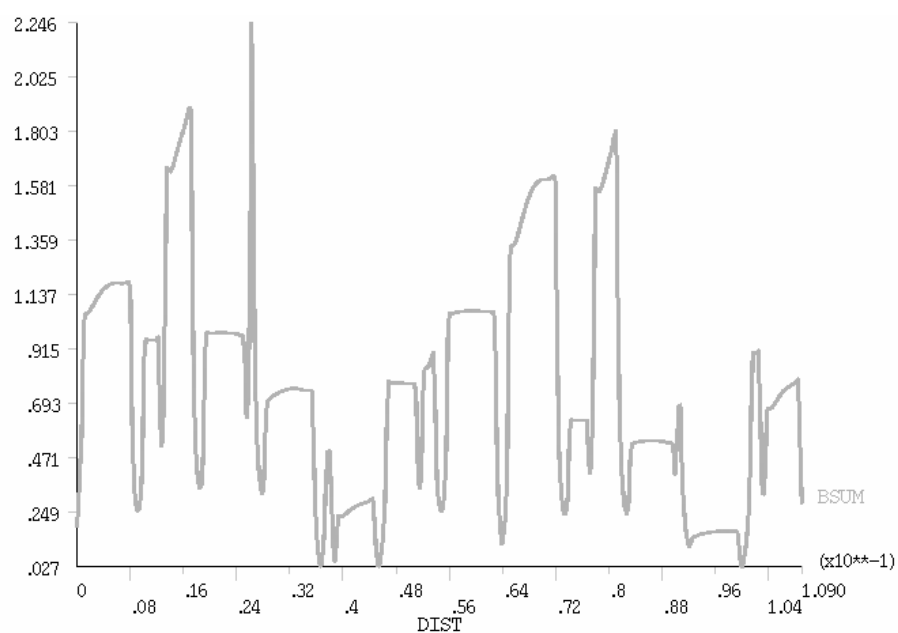


Рисунок 3.13 - График модуля вектора магнитной индукции (в Тл) на полюсном делении

На рисунке 3.14 показаны расчетным путем полученные средние магнитные силовые линии. Они заметно деформированы.

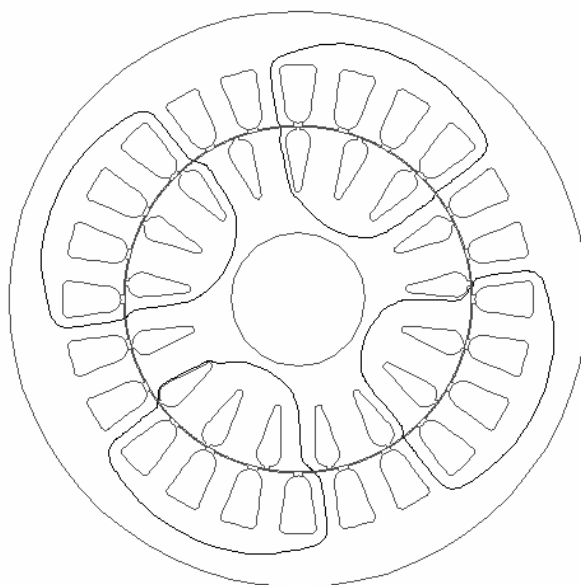


Рисунок 3.14 - Расчетное значение средних магнитных силовых линий в асинхронном двигателе 4А71В4 под нагрузкой (номинальный режим)

Полученную величину электромагнитного момента вращения для данного модернизируемого варианта примем за базовую единицу. Так будет

легче оценить полученный результат параметрической оптимизации по совершенствованию магнитной системы электродвигателя.

Геометрию листа статора и его размеры примем таким же, как у базового варианта [33]. В разделе 3.3 получены геометрические размеры листа ротора, которые заметно улучшают эффективность электромеханического преобразования энергии. То есть, при той же плотности тока в обмотке статора получается заметный прирост электромагнитного вращающего момента. Соотношение пазов статора и ротора в вариантах электродвигателей раздела 3.3 - это числа 48 и 50. Только коэффициент пазов ротора несколько уменьшим, процентов на 8 по сравнению с п. 3.3. Как ожидается, это позволит несколько сократить объем расчетов, поскольку приблизит рассчитываемый вариант к оптимальному. Проверим это.

В данном случае соотношения пазов примем таким: при 24 пазах статора на роторе выполним 26 пазов. Соотношение суммы площадей всех пазов ротора приведем к коэффициенту пазов ротора 0,148. Подчеркнем, что это только начальное приближение в параметрической оптимизации листа ротора.

Проверим на первом этапе вариант с овальными пазами ротора и зубцами с параллельными стенками при заливке ротора алюминием.

Модель такого электродвигателя приведем на рисунке 3.15.

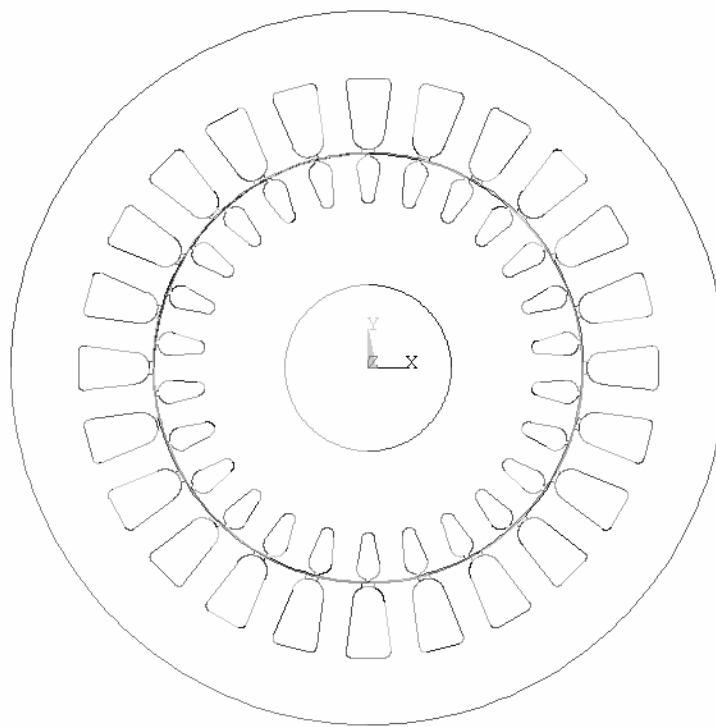


Рисунок 3.15 - Первое приближение варианта модернизации электродвигателя
4A71B4

Результаты расчетов приведены на рисунках 3.16 и 3.17.

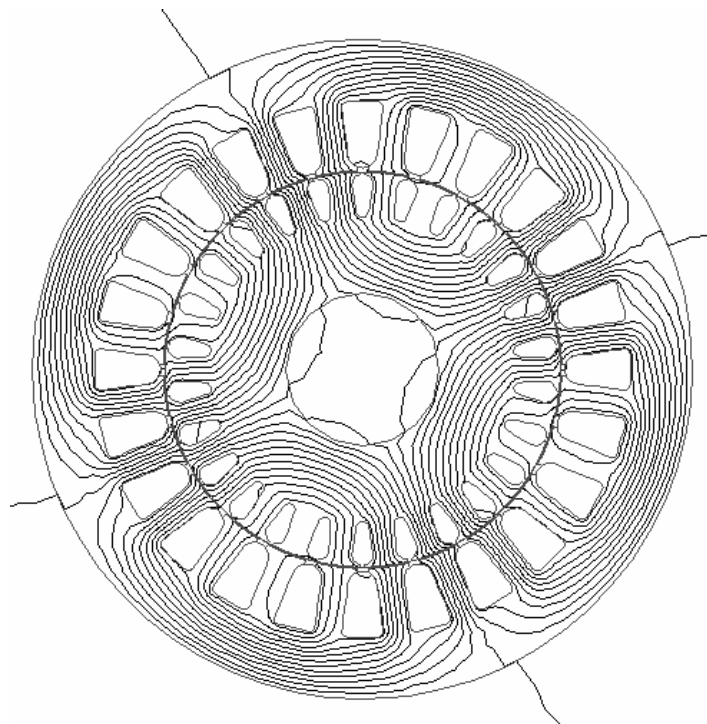


Рисунок 3.16 - Картина магнитных силовых линий в поперечном сечении
моделируемого варианта электродвигателя

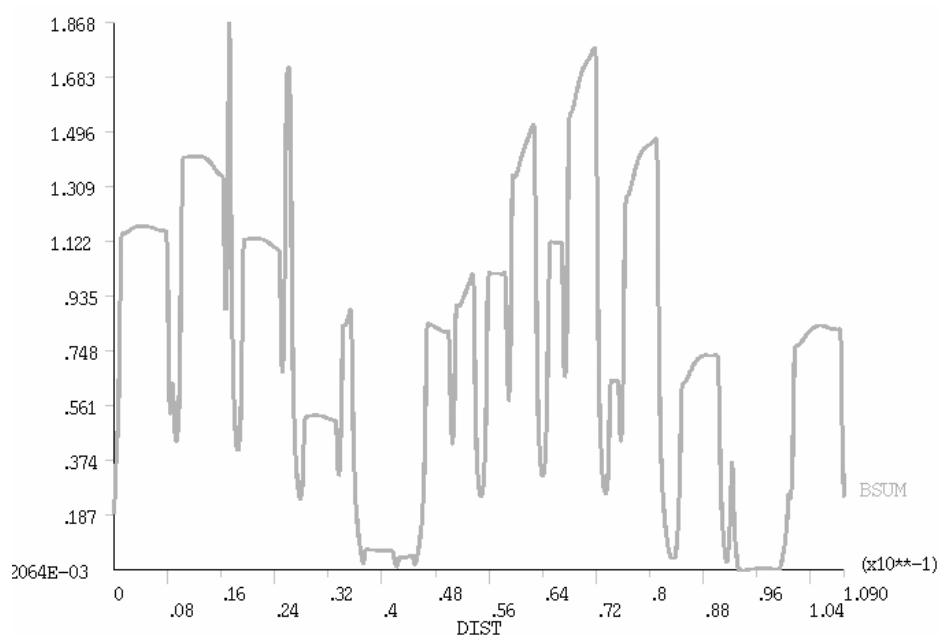


Рисунок 3.17 - Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре моделируемого электродвигателя

Несмотря на использование предположительного благоприятного соотношения чисел пазов статора и ротора, а также принятое отношение их площадей с учетом данных раздела 3.3, произошло снижение электромагнитного момента вращения по сравнению с модернизируемым вариантом на 6,7%.

Начнем плавно увеличивать площадь пазов, пересчитывая величину электромагнитного вращающего момента для нескольких положений ротора. Форму паза при этом сохраняем, выполняя зубцы с параллельными стенками. В оптимальном варианте, показывающем большее значение электромагнитного вращающего момента, площадь пазов ротора увеличилась с $21,6 \text{ мм}^2$ до $27,6 \text{ мм}^2$ при сохранении их формы. Это дает коэффициент пазов ротора равный 0,189. Геометрия полученной модели представлена на рисунке 3.18.

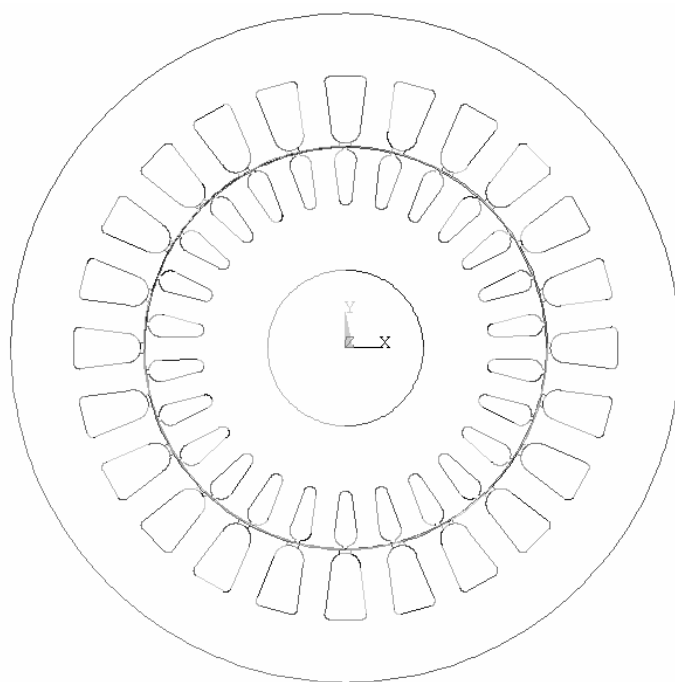


Рисунок 3.18 - Вариант модернизации электродвигателя 4A71B4

Электромагнитный момент вращения при номинальной нагрузке возрастает и становится больше момента базового варианта на 3,3%.

Изменим форму паза ротора так, чтобы уже паз получился с параллельными стенками при сохранении его площади. Измененная геометрия листа ротора приведена на рисунке 3.19. Рассчитаем вариант с алюминием в пазах ротора. Методику расчета принимаем прежней. Максимум электромагнитного момента вращения будем искать при том же скольжении для номинального режима, что и в базовом варианте.

Кривая магнитной индукции на полюсном делении, при расчете данного варианта, распределена в воздушном зазоре, так как показано на рисунке 3.20.

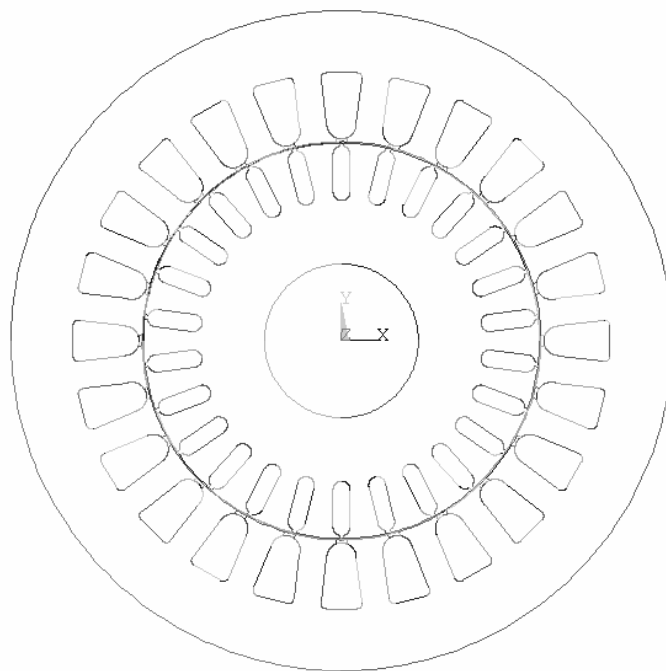


Рисунок 3.19 - Вариант модернизации электродвигателя 4A71B4

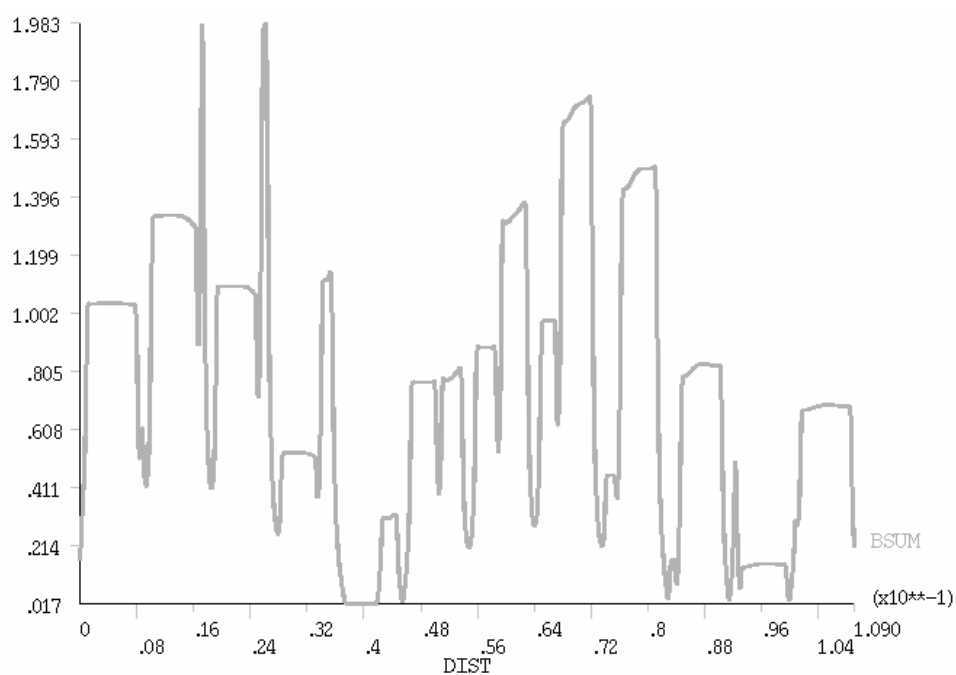


Рисунок 3.20 - Форма кривой магнитной индукции в воздушном зазоре моделируемого электродвигателя для одного из положений ротора относительно статора

Электромагнитный момент вращения практически не изменился в зависимости формы паза, что подчеркивает сделанное предположение о

существенном влиянии на характеристики машины именно суммарной площади пазов.

Если вместо алюминия в последнем варианте электродвигателя в качестве материала ротора применить медь, то произойдет заметное увеличение электромагнитного момента вращения в номинальном режиме (на 22%).

Таким образом, для асинхронного электродвигателя, имеющего четыре полюса и мощность на валу 0,75 кВт коэффициент пазов ротора равен 0,189.

Обобщив сделанные расчеты для трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором имеющих четырехполюсные статорные обмотки приведем в таблице 3.5 коэффициенты пазов.

Таблица 3.5. Коэффициенты пазов ротора исследованных электродвигателей

№ п/п	Мощность двигателя, кВт	Модернизированные исполнения	Данные серийных машин
1	0,75	0,189	0,176
2	7,5	0,185	0,212
3	15	0,161	0,266

Посмотрим, какие данные были уже получены аналогичными исследованиями в асинхронных микродвигателях [52-53]. Сведем данные в таблицу 3.6.

Проанализируем полученные данные. Во всех исполнениях (кроме 0,75 кВт) полученный параметрической оптимизацией коэффициент меньше аналогичного у серийных изделий. Это подтверждает сделанное предположение о том, что суммарная площадь пазов ротора является важным параметром, который не может быть исключен из внимания.

Таблица 3.6. Коэффициенты пазов ротора микродвигателей

№ п/п	Мощность двигателя, Вт	Модернизированные исполнения	Данные серийных машин
1	1,5	0,173	0,427
2	40	0,202	0,346
3	120	0,160	0,244

Исполнение асинхронного двигателя 4A71B4 потребовало, наоборот, увеличить площадь пазов ротора для повышения энергоэффективности. Как показали данные справочника [33], это исполнение из всего ряда четырехполюсных двигателей имеет самые высокие уровни индукции в воздушном зазоре и плотности тока в обмотки статора, то есть, по этим показателям исполнение выпадает из общего ряда серии 4A.

3.5 Выводы

1 При изменении числа пазов ротора, которое сопровождается пропорциональным изменением суммарной площади пазов, происходит изменение электромагнитного момента вращения при постоянной плотности тока в обмотке статора. Это наблюдается в режиме пуска и при номинальном скольжении.

2 Варьирование суммарной площадью пазов ротора оказывается возможным выбрать его экстремум, который для различных режимов (пускового и при номинальном скольжении) достигается при различном ее значении.

3 Коэффициент пазов ротора (отношение суммарной площади пазов ротора к окружности, описанной вокруг ротора) в оптимизированных двигателях, как правило, меньше стандартных значений серийных изделий.

4 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И РАСЧЕТ ПУСКА

4.1 Параметры асинхронного двигателя постоянны при пуске

Анализ поля и оценка параметров асинхронных двигателей не отвечает на ряд вопросов практики: а именно, как происходит пуск двигателя. Исследование пуска асинхронного двигателя проводят на основе решения систем дифференциальных уравнений. Выполнить точное аналитическое описание условий работы реального асинхронного двигателя крайне сложно. Выражения получаются громоздкими и неудобными в работе. Построим математическую модель в системе координатных осей d, q [56, 57].

В практике инженерных расчетов рассматривают некоторую идеализированную асинхронную машину, для которой часто принимаются следующие допущения [5, 56, 57 и др.]:

- 1 Изменение насыщения магнитной цепи не учитывается.
- 2 Потери в стали, явления гистерезиса, и вытеснения тока отсутствуют.
- 3 Кривые магнитодвижущих сил и индукции распределены в воздушном зазоре синусоидально.
- 4 Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток асинхронных машин не зависят от положения ротора в пространстве.
- 5 Обмотки асинхронных машин симметричны. Фазы статорных обмоток имеют одинаковые числа витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей. Стержни короткозамкнутых обмоток ротора расположены симметрично относительно продольной (d) и поперечной (q) осей ротора.
- 6 Асинхронная машина работает от сети бесконечно большой мощности.
- 7 Переменные напряжения, приложенные к зажимам обмоток, синусоидальны.

Для описания переходных процессов, происходящих в асинхронных машинах, составляют уравнения равновесия напряжений обмоток и уравнения равновесия моментов (уравнения движения). Форма их записи определяется выбором системы координатных осей и положительных направлений величин.

Применим для асинхронной машины систему координатных осей $d - q$, жестко связанных с ротором [56, 57 и др.]. Обычно ее применяют для синхронных машин, потому, что появляется «лишняя» переменная. Ниже покажем ее назначение. При этом положительным направлением фазных токов считается направление от концов фаз к их началам. За положительные направления осей трехфазной обмотки принимаются положительные направления магнитодвижущих сил (МДС) соответствующих катушек. Направление продольной оси ротора d совпадает с осью полюса ротора, а направление поперечной оси ротора q опережает ось d на 90 электрических градусов. Вращение ротора и системы координатных осей против часовой стрелки принимается в качестве положительного. Положительными являются величины (проекции векторов), направления которых совпадают с положительным направлением координатных осей [56, 57 и др.].

В преобразованной системе координат d, q решение уравнений синхронной машины существенно упростится, поскольку таким приемом можно избавиться от периодических коэффициентов в выражениях для потокосцеплений [56, 57].

Отметим, что обмотки ротора приведены к статорной обмотке. То есть, роторные обмотки пересчитаны на число фаз и витков обмотки статора [5]. Это дает возможность применять одну систему относительных единиц для обмоток ротора и статора.

Кроме того, реальную короткозамкнутую обмотку ротора заменим двумя эквивалентными короткозамкнутыми контурами по продольной и поперечной осям [56].

В выбранной нами системе координатных осей d и q , вращающихся вместе с ротором, и в системе относительных единиц дифференциальные уравнения асинхронной машины принимают следующий вид [56, 57]:

$$\frac{d\psi_d}{d\tau} = \psi_q \omega - r i_d - U \sin \theta;$$

$$\frac{d\psi_q}{d\tau} = -\psi_d \omega - r i_q + U \cos \theta;$$

$$\frac{d\psi_{yd}}{d\tau} = -r_{yd} i_{yd};$$

$$\frac{d\psi_{yq}}{d\tau} = -r_{yq} i_{yq}; \quad (4.1)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{H} (M - M_c);$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = 1 - \omega.$$

где электромагнитный момент вращения определяется выражением

$$M = \psi_d i_q - \psi_q i_d, \quad (4.2)$$

а потокосцепления обмоток записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_{yd}; & \psi_q &= L_q i_q + M_{aq} i_{yq}; \\ \psi_f &= M_{ad} i_d + M_{ad} i_{yd}; & \psi_{yq} &= M_{aq} i_q + L_{yq} i_{yq}; \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\psi_{yd} = M_{ad} i_d + L_{yd} i_{yd}.$$

В выражениях (4.1) – (4.3) использованы следующие обозначения:

r, r_{yd}, r_{yq} - активные сопротивления соответствующих контуров;

$L_d, L_q, L_f, L_{yd}, L_{yq}$ - индуктивности;

M_{ad}, M_{aq} - взаимные индуктивности;

i_d, i_q, i_{yd}, i_{yq} - мгновенные значения тока;

$\psi_d, \psi_q, \psi_{yd}, \psi_{yq}$ - мгновенные значения потокосцеплений;

u_d, u_q - мгновенные значения напряжений;

M - электромагнитный вращающий момент;

M_c - момент сопротивления на валу;

ω - мгновенное значение угловой скорости вращения ротора;

H - механическая постоянная вращающихся масс;

τ - время, выраженное в системе относительных единиц.

Выражения для потокосцеплений (4.3) записаны через индуктивности и взаимноиндуктивности. Можно показать, что в системе относительных единиц индуктивности и индуктивные сопротивления, рассчитанные для номинальной (базисной) частоты, выражаются одним и тем же числовым значением

$$L = \frac{L}{L_b} = \frac{L \omega_b}{L_b \omega_b} = \frac{x}{x_b} = x, \quad (4.4)$$

где x - индуктивные сопротивления.

С учетом этого (4.3) удобнее записать так:

$$\begin{aligned} \psi_d &= x_d i_d + x_{ad} i_{yd}; & \psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_{yq}; \\ \psi_{yd} &= x_{ad} i_d + x_{yd} i_{yd}, & \psi_{yq} &= x_{aq} i_q + x_{yq} i_{yq}; \end{aligned} \quad (4.5)$$

где

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma; \quad X_q = X_{aq} + X_\sigma;$$

$$X_{yd} = X_{ad} + X_{\sigma yd}; \quad X_{yq} = X_{aq} + X_{\sigma yq}. \quad (4.6)$$

В выражениях (4.6) индекс σ указывает на индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих контуров.

Для решения системы (4.1) следует подставить в нее токи, выраженные через параметры асинхронной машины и индуктивные сопротивления соответствующих контуров. Приведем фрагмент программы для соответствующих аналитических преобразований на рисунке 4.1.

Given

$$(x_{ad} + x_s) \cdot id + x_{ad} \cdot i_{yd} = Y_0$$

$$x_{ad} \cdot id + (x_{ad} + x_{syd}) \cdot i_{yd} = Y_2$$

$$\text{Find}(id, i_{yd}) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{x_{ad} \cdot Y_0 - x_{ad} \cdot Y_2 + x_{syd} \cdot Y_0}{x_s \cdot x_{ad} + x_s \cdot x_{syd} + x_{ad} \cdot x_{syd}} \\ \frac{x_s \cdot Y_2 - x_{ad} \cdot Y_0 + x_{ad} \cdot Y_2}{x_s \cdot x_{ad} + x_s \cdot x_{syd} + x_{ad} \cdot x_{syd}} \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.1 - Аналитическое преобразование токов по оси d на основании выражений (4.5)

В этих выражениях, с целью последующей реализации на компьютере, значения переменных потокоцеплений приведены как переменные с индексами (Y_0 соответствует ψ_d , а $Y_2 - \psi_{yd}$). Аналогично решенная система выражений по оси q позволяет выразить составляющие токов по этим осям. Результат преобразований приведен на рисунке 4.2. Соответствующая индексация переменных Y будет понятна, если обратиться к исходной системе дифференциальных уравнений (4.1). Если теперь в систему (4.1) подставить токи из выражений рисунка 4.1 и рисунка 4.2, то получим систему шести

дифференциальных уравнений с шестью неизвестными. Правые части системы (4.1) готовые к реализации на компьютере приведены на рисунке 4.3.

$$\begin{aligned}
 &\text{Given} \\
 &(\text{xaq} + \text{xs}) \cdot \text{iq} + \text{xaq} \cdot \text{iyq} = Y_1 \\
 &\text{xaq} \cdot \text{iq} + (\text{xaq} + \text{xsyq}) \cdot \text{iyq} = Y_3 \\
 &\text{Find}(\text{iq}, \text{iyq}) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{\text{xaq} \cdot Y_1 - \text{xaq} \cdot Y_3 + \text{xsyq} \cdot Y_1}{\text{xs} \cdot \text{xaq} + \text{xs} \cdot \text{xsyq} + \text{xaq} \cdot \text{xsyq}} \\ \frac{\text{xs} \cdot Y_3 - \text{xaq} \cdot Y_1 + \text{xaq} \cdot Y_3}{\text{xs} \cdot \text{xaq} + \text{xs} \cdot \text{xsyq} + \text{xaq} \cdot \text{xsyq}} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.2 - Аналитическое преобразование токов по оси q на основании выражений (4.5)

$$D(\tau, Y) := \begin{bmatrix} Y_1 \cdot Y_4 - r \cdot \left(\frac{\text{xad} \cdot Y_0 - \text{xad} \cdot Y_2 + \text{xsyd} \cdot Y_0}{\text{xs} \cdot \text{xad} + \text{xs} \cdot \text{xsyd} + \text{xad} \cdot \text{xsyd}} \right) - 1 \cdot \sin(Y_5) \\ -Y_0 \cdot Y_4 - r \cdot \left(\frac{\text{xaq} \cdot Y_1 - \text{xaq} \cdot Y_3 + \text{xsyq} \cdot Y_1}{\text{xs} \cdot \text{xaq} + \text{xs} \cdot \text{xsyq} + \text{xaq} \cdot \text{xsyq}} \right) + 1 \cdot \cos(Y_5) \\ -r_{yd} \cdot \left(\frac{\text{xs} \cdot Y_2 - \text{xad} \cdot Y_0 + \text{xad} \cdot Y_2}{\text{xs} \cdot \text{xad} + \text{xs} \cdot \text{xsyd} + \text{xad} \cdot \text{xsyd}} \right) \\ -r_{yq} \cdot \left(\frac{\text{xs} \cdot Y_3 - \text{xaq} \cdot Y_1 + \text{xaq} \cdot Y_3}{\text{xs} \cdot \text{xaq} + \text{xs} \cdot \text{xsyq} + \text{xaq} \cdot \text{xsyq}} \right) \\ \frac{1 \cdot \left[Y_0 \cdot \left(\frac{\text{xaq} \cdot Y_1 - \text{xaq} \cdot Y_3 + \text{xsyq} \cdot Y_1}{\text{xs} \cdot \text{xaq} + \text{xs} \cdot \text{xsyq} + \text{xaq} \cdot \text{xsyq}} \right) - Y_1 \cdot \left(\frac{\text{xad} \cdot Y_0 - \text{xad} \cdot Y_2 + \text{xsyd} \cdot Y_0}{\text{xs} \cdot \text{xad} + \text{xs} \cdot \text{xsyd} + \text{xad} \cdot \text{xsyd}} \right) \right] - M_c}{h} \\ 1 - Y_4 \end{bmatrix}$$

Рисунок 4.3 - Правые части дифференциальных уравнений системы (4.1)

Нумерация переменных с индексами также соответствует исходной системе. Для решения системы (4.1) с учетом сделанных преобразований применим метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Расчеты выполним в системе относительных единиц для двигателя 4A132S4. Параметры схемы-замещения

двигателя возьмем из справочника [33]. Для удобства записи уравнений на компьютере на рисунке 4.1 – рисунке 4.3 вместо индекса (σ) использован индекс (s). В относительных единицах параметры равны: $r = 0,06$; $r_{yd} = r_{yq} = 0,033$; $x_{ad} = x_{aq} = 3,0$; $x_s = 0,085$; $x_{syd} = x_{syq} = 0,13$; $M_c = 0,5$; $H = 150$. Результаты расчетов приведем на следующих рисунках 4.4 – 4.9.

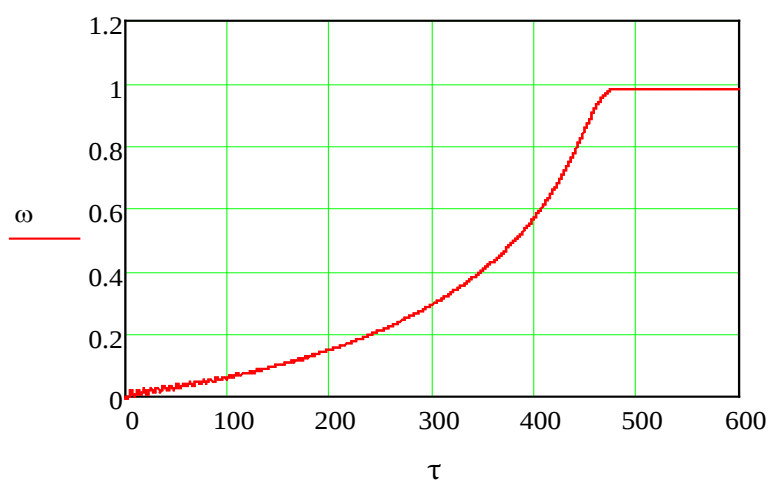


Рисунок 4.4 - Изменение угловой скорости при пуске двигателя 4A132S4 с постоянными параметрами

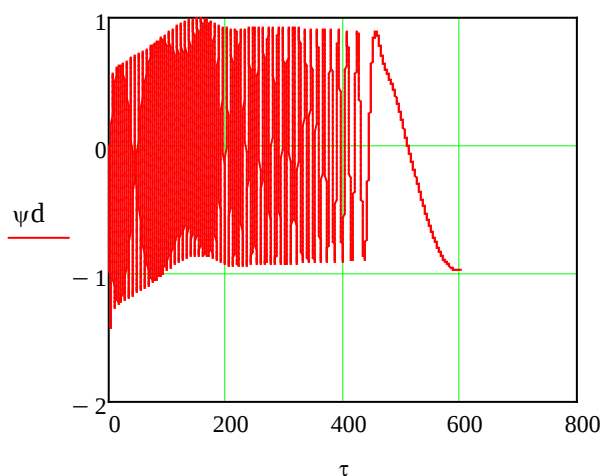


Рисунок 4.5 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси d

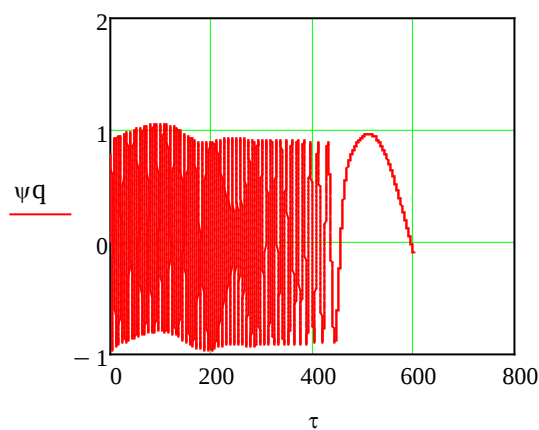


Рисунок 4.6 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси q

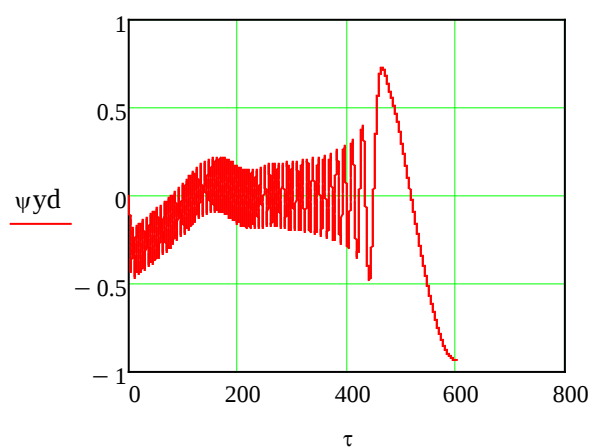


Рисунок 4.7 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси d

Подчеркнем, что все параметры принимались в относительных единицах. Для расчета электромагнитного момента вращения используем формулу (4.2). Результаты вычисления электромагнитного момента приведем на рисунке 4.9.

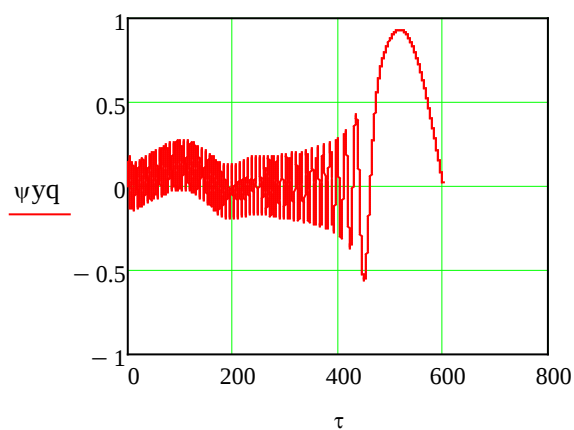


Рисунок 4.8 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси q

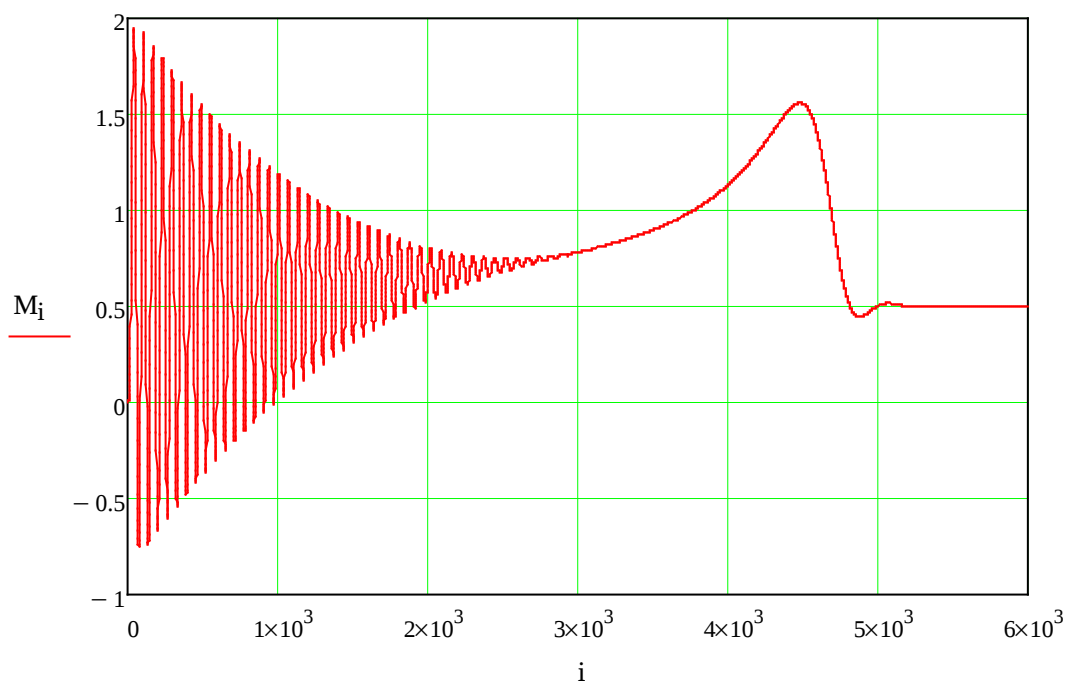


Рисунок 4.9 - Изменение электромагнитного вращающего момента при пуске при условии постоянных параметров схемы замещения от i ($i - 0,1$ электрическая секунда)

4.2 Пуск асинхронного двигателя в условиях изменения параметров схемы замещения

Значения параметров асинхронного двигателя 4A132S4 из справочника [33] показывают общеизвестные тенденции изменения параметров. Активное сопротивление ротора за счет эффекта вытеснения тока в первый период пуска возрастает, достигая своего установившегося значения к тому моменту, когда скорость ротора перестанет увеличиваться. Сделаем допущение, что закон изменения сопротивления близок к экспоненте. В этом случае формулу, по которой изменяется активное сопротивление ротора можно представить так.

$$r_{yd} = r_{yd0} + r_{yd\Delta} \cdot e^{-t/T}, \quad (4.7)$$

где $r_{yd0} = 0,033$ о. е. [33]; $r_{yd\Delta} = 0,007$ о. е. [33].

Постоянная времени T в данном случае равна 40 эл. с. При изменении параметров она может быть уточнена после первого расчета. Выражению (4.7) соответствует график изменения этого сопротивления при пуске двигателя. Покажем его на рисунке 4.10.

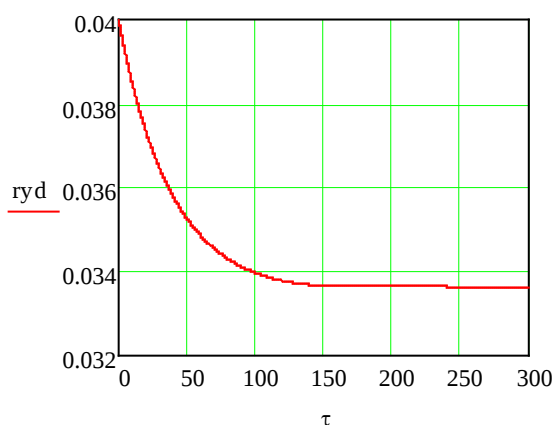


Рисунок 4.10 - Изменение активного сопротивления ротора при пуске двигателя
(все величины, включая время, выражены в относительных единицах)

Ротор асинхронного двигателя неявнополюсный, поэтому активные сопротивления по продольной и поперечной осям равны ($r_{yd} = r_{yq}$). Такой же график, как на рисунке 4.10 будет характеризовать изменение активного сопротивления ротора по поперечной оси.

Индуктивные сопротивления взаимоиндукции по осям d и q будут определяться формулами вида (4.7), если заменить знак активного сопротивления на индуктивное.

$$x_{ad} = x_{ad0} + x_{ad\Delta} \cdot e^{-t/T}, \quad (4.8)$$

где

$$x_{ad0} = 3,0 \text{ о. е. [33]}; x_{ad\Delta} = 0,6 \text{ о. е. [33]}.$$

Постоянная времени T в данном случае равна 40 эл. с., а индуктивные сопротивления взаимоиндукции по осям также будут равны. Выражению (4.8) соответствует график изменения индуктивного сопротивления взаимоиндукции (по осям графики не будут различаться) при пуске двигателя. Покажем его на рисунке 4.11.

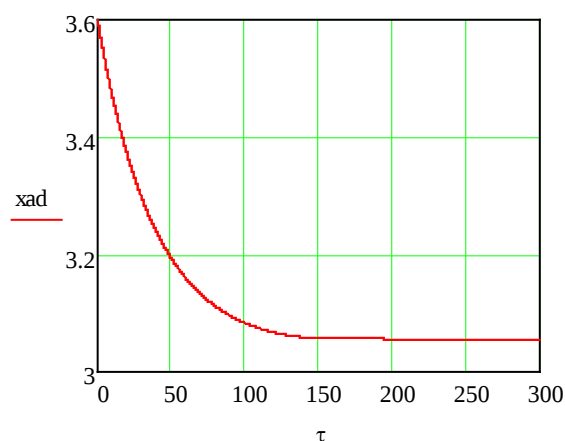


Рисунок 4.11 - Изменение сопротивления взаимоиндукции при пуске двигателя
(все величины, включая время, выражены в относительных единицах)

Индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора имеют другой вид изменения во время пуска. Имеются в виду индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора по продольной и поперечной осям. Вначале эти сопротивления минимальны, а затем возрастают до установившегося режима, когда частота перемагничивания ротора уменьшится до частоты скольжения. Формула (4.9) отражает характер изменения сопротивлений.

$$x_s = x_{s11} + x_{s\Delta11} \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (4.9)$$

где x_{s11} — начальное значение ($x_{s11} = 0,06$ о. е. [33]);

$x_{s\Delta11}$ — амплитуда изменения ($x_{s\Delta11} = 0,025$ о. е. [33]).

График изменения сопротивления рассеяния по оси $d(q)$ приведем на рисунке 4.12.

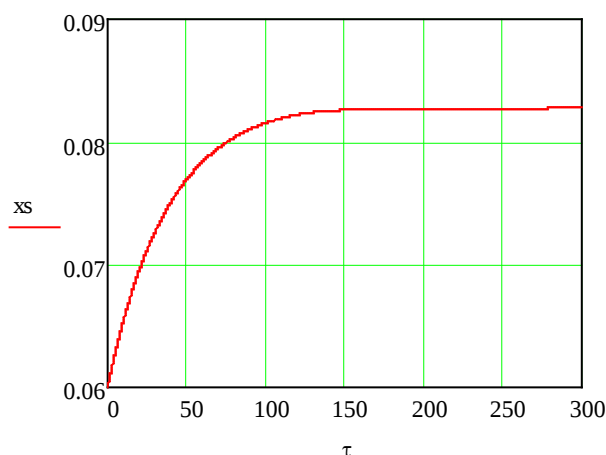


Рисунок 4.12 - Изменение сопротивления рассеяния обмотки статора при пуске двигателя (все величины, включая время, выражены в относительных единицах)

Индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора имеют похожий вид изменения во время пуска. Имеются в виду индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора по продольной и поперечной осям. Вначале эти сопротивления минимальны, а затем возрастают до установившегося режима,

когда частота перемагничивания ротора уменьшится до частоты скольжения. Формула (4.10) отражает характер изменения сопротивлений.

$$x_{syd} = x_{syd11} + x_{syd\Delta11} \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (4.10)$$

где x_{syd11} – начальное значение ($x_{syd11} = 0,09$ о. е. [33]);

$x_{syd\Delta11}$ – амплитуда изменения ($x_{syd\Delta11} = 0,04$ о. е. [33]).

График изменения сопротивления рассеяния по оси $d(q)$ приведем на рисунке 4.13.

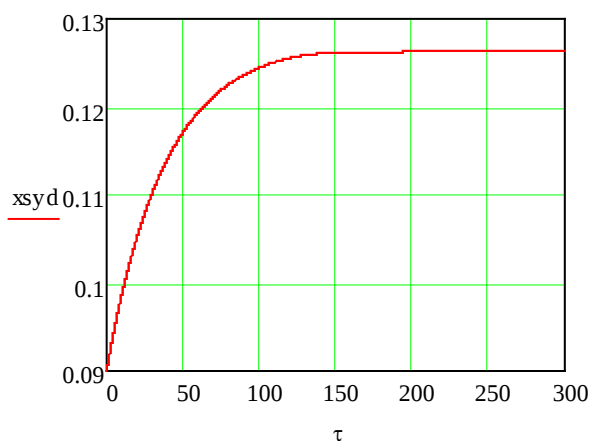


Рисунок 4.13 - Изменение сопротивления рассеяния обмотки ротора при пуске двигателя (все величины, включая время, выражены в относительных единицах)

Для решения задачи пуска асинхронного двигателя в условиях изменения параметров (активного сопротивления ротора и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора) воспользуемся той же системой дифференциальных уравнений (4.1) с выражениями для потокосцеплений (4.3). Учтем преобразования токов в соответствии с рисунком 4.3. Формулы для изменяющихся сопротивлений выше были записаны (4.7) – (4.9).

Для решения системы (4.1) с учетом сделанных преобразований применим метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Расчеты выполним в системе

относительных единиц для двигателя 4A132S4. Параметры схемы-замещения двигателя возьмем из справочника [33], но учтем, что они изменяются во время пуска. Интегрирование дает следующие результаты.

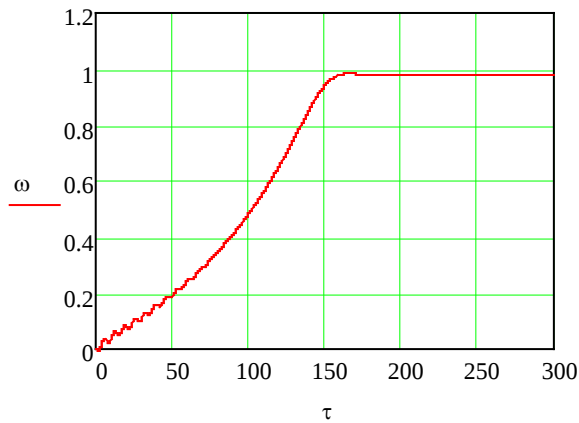


Рисунок 4.14 - Изменение угловой скорости при пуске двигателя 4A132S4 с изменяющимися параметрами

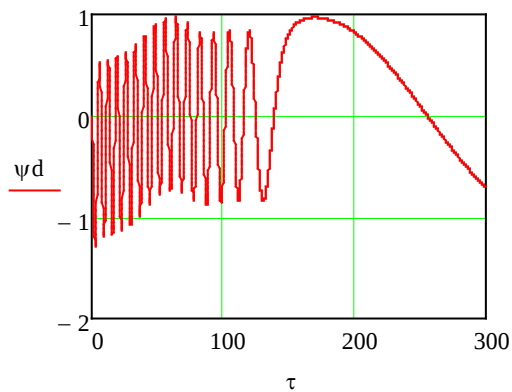


Рисунок 4.15 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси d в условиях переменных параметров

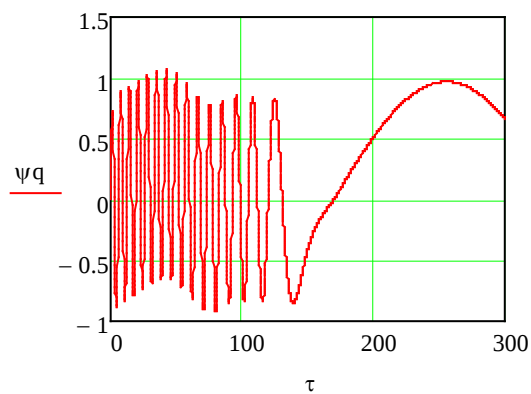


Рисунок 4.16 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси q в условиях изменяющихся параметров при пуске

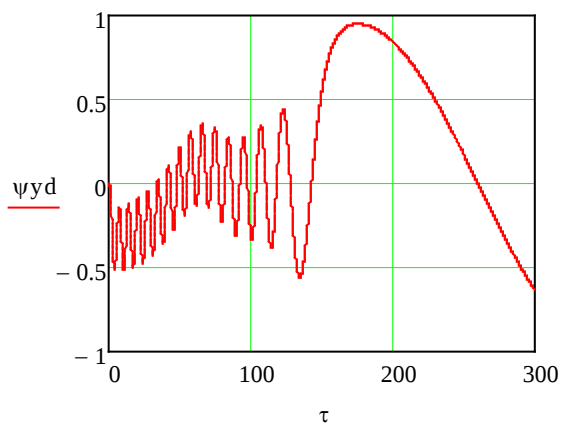


Рисунок 4.17 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси d в условиях переменных параметров при пуске

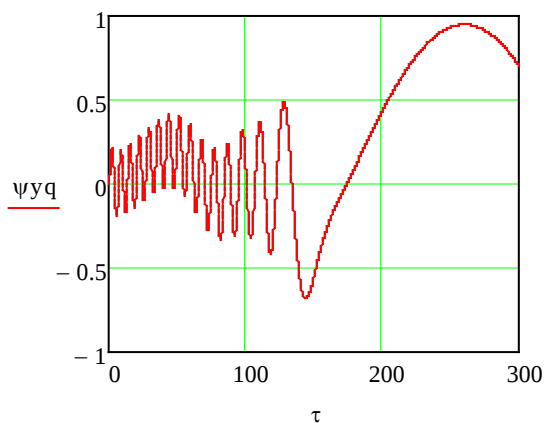


Рисунок 4.18 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси q в условиях изменяющихся параметров

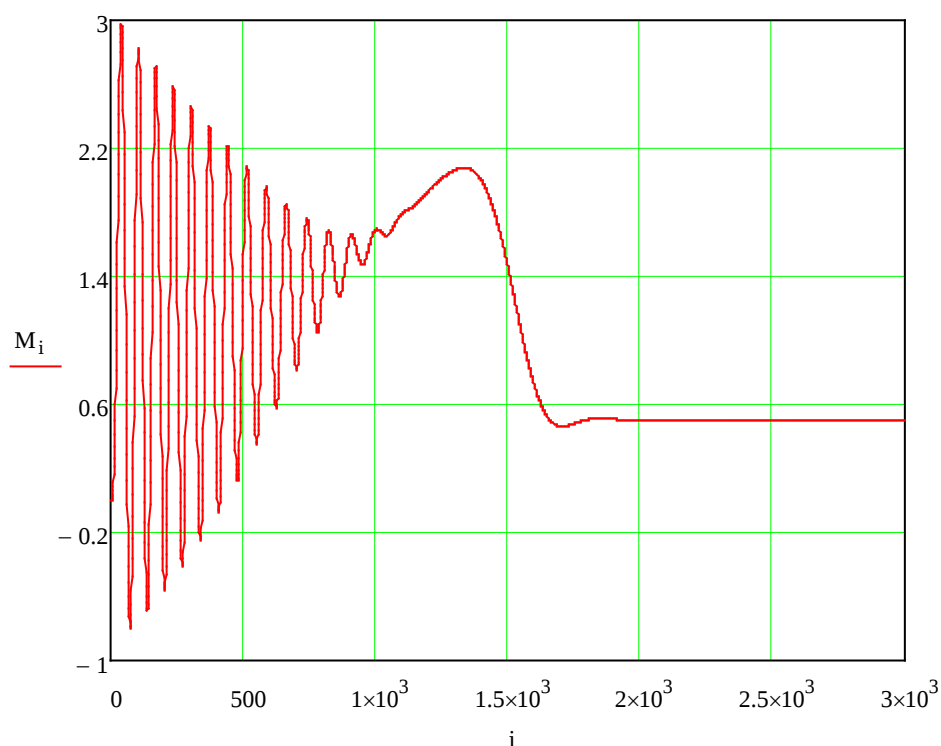


Рисунок 4.19 - Изменение электромагнитного вращающего момента при пуске при условии переменных параметров схемы замещения от i (i – 0,1 электрическая секунда)

Из полученных результатов можно сделать вывод, что время пуска асинхронного двигателя составляет 190 эл. секунд. По сравнению с предыдущим пунктом, когда параметры двигателя принимались постоянными, время пуска уменьшилось в 2,7 раза!

4.3 Пуск асинхронного двигателя в условиях учета механического демпфирования в двигателе и соединения его с нагрузкой при помощи упругой муфты

Рассмотрим теперь более точно одно из слагаемых уравнения движения – момент сопротивления на валу M_c , зависящий от характера нагрузки. Известно также, что на динамические свойства двигателя будут влиять силы трения [57, 59]. Силы трения, препятствующие изменению скорости ротора, будем называть силами механического демпфирования. Они возникают в

подшипниковых опорах [59], и будут учитываться нами в системах дифференциальных уравнений коэффициентом механического демпфирования.

Момент сопротивления на валу представим двумя слагаемыми, первое из которых является моментом сопротивления на валу асинхронного двигателя при синхронной (скорости холостого хода) угловой скорости вращения, а второе – дополнительной составляющей, возникающей в случае отклонения скорости вращения ротора от синхронной.

С учетом этого выражение для момента сопротивления при работе двигателя от нерегулируемого источника можно представить следующим образом:

$$M_c = M_{c0} + k_m (\omega - \omega_1), \quad (4.11)$$

где $\omega_1 = 1$ - синхронная угловая скорость вращения;

k_m - коэффициент механического демпфирования, в относительных единицах равный

$$k_m = \frac{S_T \omega_1^2}{P_b p^2}. \quad (4.12)$$

Здесь S_T - сопротивление трения вращающихся масс, или k_m в физической системе единиц СИ, Н·м·с/рад;

P_b - базисная единица мощности;

p - число пар полюсов.

В случае частотного управления синхронная угловая скорость вращения в системе относительных единиц численно равна α , и уравнение (4.11) можно преобразовать

$$M_c = M_{c0} + k_m (\omega - \alpha). \quad (4.13)$$

Таким образом, момент сопротивления M_c в системе уравнений (4.1) определяется выражением (4.11).

Двигатель и рабочий механизм, соединенные между собой упругой муфтой, представляют собой колебательную систему. В этом случае двигатель с нагрузкой на валу можно рассматривать как систему с двумя массами, соединенными невесомым упругим валом с жесткостью на кручение c_v [59]. Эта система представлена на рисунке 4.20.

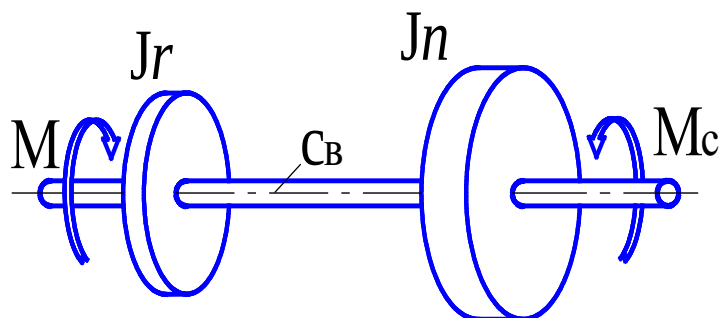


Рисунок 4.20 - Схема соединения двигателя с нагрузкой (J_r и J_n – моменты инерции ротора и нагрузки)

В связи с упругостью вала и наличием момента сопротивления вал «закручивается» и возникает упругий крутящий момент, равный

$$M_k = c_v \varphi, \quad (4.14)$$

где φ – угол закручивания вала, рад;

c_v – жесткость вала на кручение, Нм/рад.

Обозначим угол поворота ротора в пространстве через γ/p . А нагрузки – γ_n/p . Тогда

$$\varphi = (\gamma - \gamma_n) / p. \quad (4.15)$$

В этом случае угловые скорости вращения ротора и привода определяются первыми производными

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt}; \quad \omega_n = \frac{d\gamma_n}{dt}, \quad (4.16)$$

здесь углы γ и γ_n не пространственные, а определяемые из векторной диаграммы, то есть выражаются в электрических радианах.

Поскольку вал гибкий, то уравнения движения (уравнения моментов) составляются для каждой из масс отдельно [59], то есть отдельно для двигателя и привода.

Электромагнитный момент вращения, развиваемый двигателем, уравнивается динамическим моментом ротора, моментом сопротивления двигателя (моментом в подшипниковых опорах ротора и моментом от вентиляционных потерь) и упругим моментом

$$M = J_r \frac{d\Omega}{dt} + c_\epsilon \left(\gamma - \gamma_n \right) \frac{1}{p} + M_{сдв}, \quad (4.17)$$

здесь Ω – механическая угловая скорость вращения ротора. Она связана с ω известным соотношением $\Omega = \omega/p$;

$\frac{\gamma - \gamma_n}{p}$ – это пространственный угол закручивания;

$M_{сдв}$ – момент сопротивления двигателя.

Упругий момент для двигателя является тормозящим, а для привода он является движущим и уравнивается динамическим моментом нагрузки и моментом сопротивления M_c

$$c_\epsilon \left(\gamma - \gamma_n \right) \frac{1}{p} = J_n \frac{d\Omega_n}{dt} + M_c, \quad (4.18)$$

где $\Omega_n = \frac{\omega_n}{p}$ - угловая скорость вращения нагрузки;

J_n – момент инерции нагрузки, приведенный к валу.

Уравнения моментов (4.17) и (4.18) должны рассматриваться совместно с уравнениями равновесия напряжений обмоток двигателя. Поскольку для последних была использована система относительных единиц, то и уравнения моментов нужно представить в относительных единицах.

Для этого разделим каждый член уравнения (4.17) на базисный момент. Тогда окончательно в относительных единицах вместо указанного выражения получим

$$M = H_r \frac{d\omega}{d\tau} + k_\epsilon (\gamma - \gamma_n) + M_{сдв}, \quad (4.19)$$

где $k_\epsilon = c_\epsilon \frac{\omega_1}{P_\epsilon p^2}$ - коэффициент упругости муфты;

$H_r = \frac{J_r \omega_1^3}{P_\epsilon p^2}$ - электромеханическая постоянная ротора.

Если упругий крутящий момент для двигателя является тормозящим, то для привода он является движущим. С учетом этого преобразуется и уравнение (4.18), которое в относительных единицах примет вид

$$k_\epsilon (\gamma - \gamma_n) = H_n \frac{d\omega_n}{d\tau} + M_c, \quad (4.20)$$

где $H_n = \frac{J_n \omega_1^3}{P_\epsilon p^2}$ - электромеханическая постоянная нагрузки.

Таким образом, система уравнений асинхронной машины с учетом упругой муфты между двигателем и нагрузкой будет состоять из уравнений равновесия напряжений и уравнений моментов (4.19) и (4.20). По этой причине исходная система (4.1) преобразуется в следующую

$$\frac{d\psi_d}{d\tau} = \psi_q \omega - r i_d - U \sin \theta;$$

$$\frac{d\psi_q}{d\tau} = -\psi_d \omega - r i_q + U \cos \theta;$$

$$\frac{d\psi_{yd}}{d\tau} = -r_{yd} i_{yd};$$

$$\frac{d\psi_{yq}}{d\tau} = -r_{yq} i_{yq}; \quad (4.21)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{H_r} \left(M - M_{c\partial\partial} - k_{\epsilon}(\varphi') \right)$$

$$\frac{d\omega_n}{d\tau} = \frac{1}{H_n} \left(k_{\epsilon}(\varphi') - M_c \right)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = 1 - \omega;$$

$$\frac{d\varphi'}{d\tau} = \omega - \omega_n.$$

Здесь угол закручивания вала (φ) выражен в электрических радианах. Для упрощения записи штрих в обозначении угла φ будем опускать.

Если вал (муфта) абсолютно жесткие, то $\gamma = \gamma_n$ и $\omega = \omega_n$. В этом случае вместо двух уравнений движения будет одно, а два последних уравнения системы (4.21) не понадобятся. Порядок системы понизится на три и она примет вид (4.1).

Решим систему (4.21) методом Рунге-Кутты, как делали в предыдущем параграфе для асинхронного двигателя 4A132S4. Вначале параметры двигателя в момент пуска примем постоянными. Результаты расчетов покажем на рисунках 4.21 - 4.28.

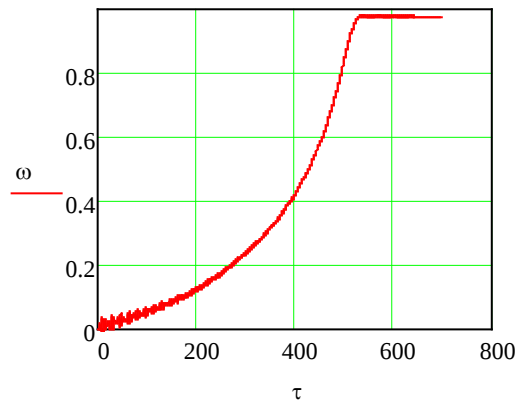


Рисунок 4.21 - Изменение угловой скорости при пуске двигателя 4A132S4 с постоянными параметрами и упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е., величины на графике выражены в относительных единицах)

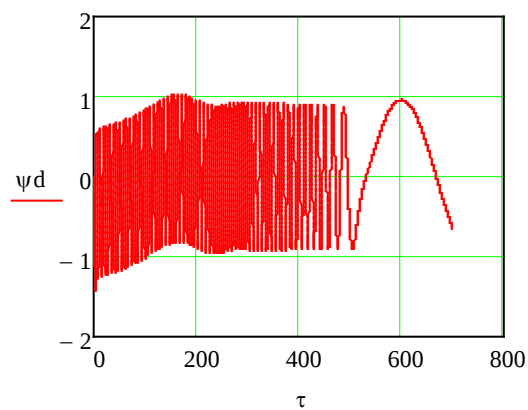


Рисунок 4.22 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси d при пуске с упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике выражены в относительных единицах)

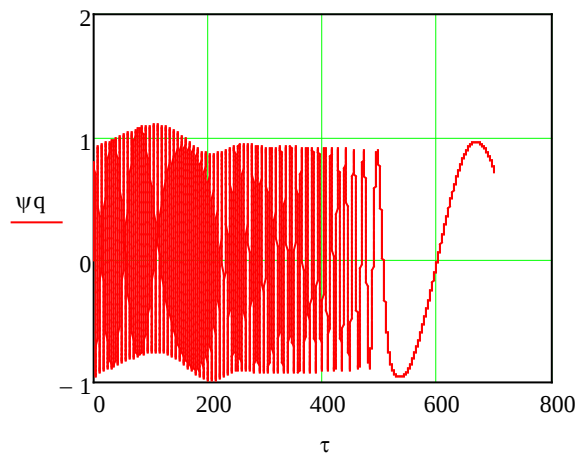


Рисунок 4.23 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси q при пуске с упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

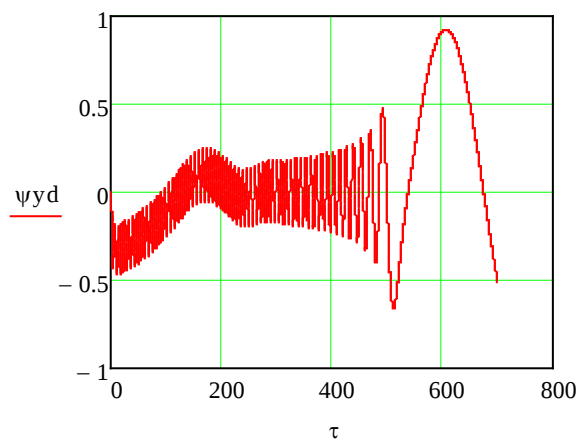


Рисунок 4.24 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси d при пуске с упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

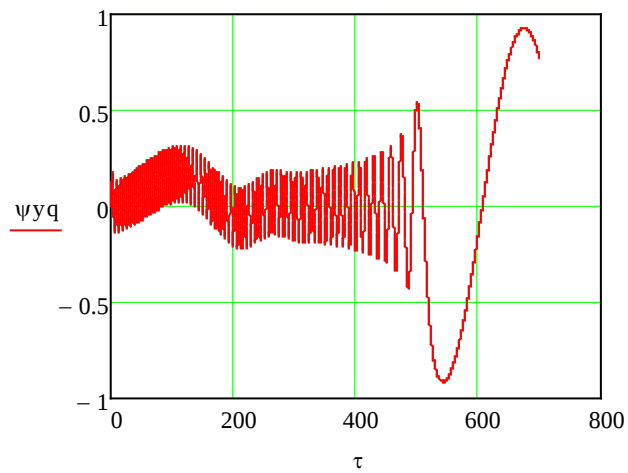


Рисунок 4.25 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси q при соединении двигателя с нагрузкой упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

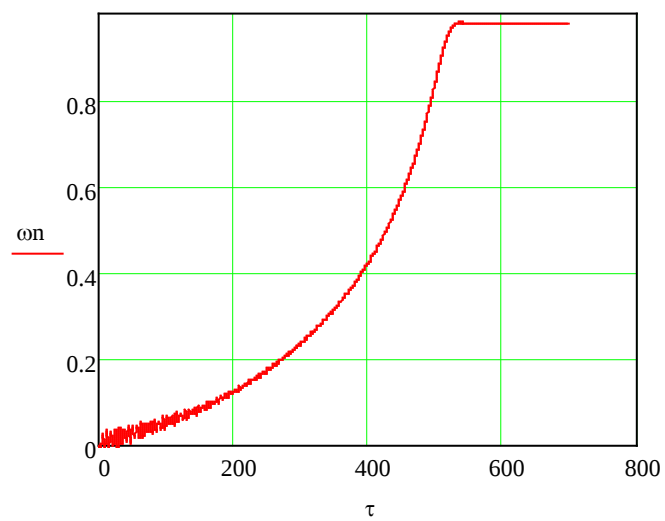


Рисунок 4.26 - Изменение угловой скорости нагрузки, соединенной с валом двигателя упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

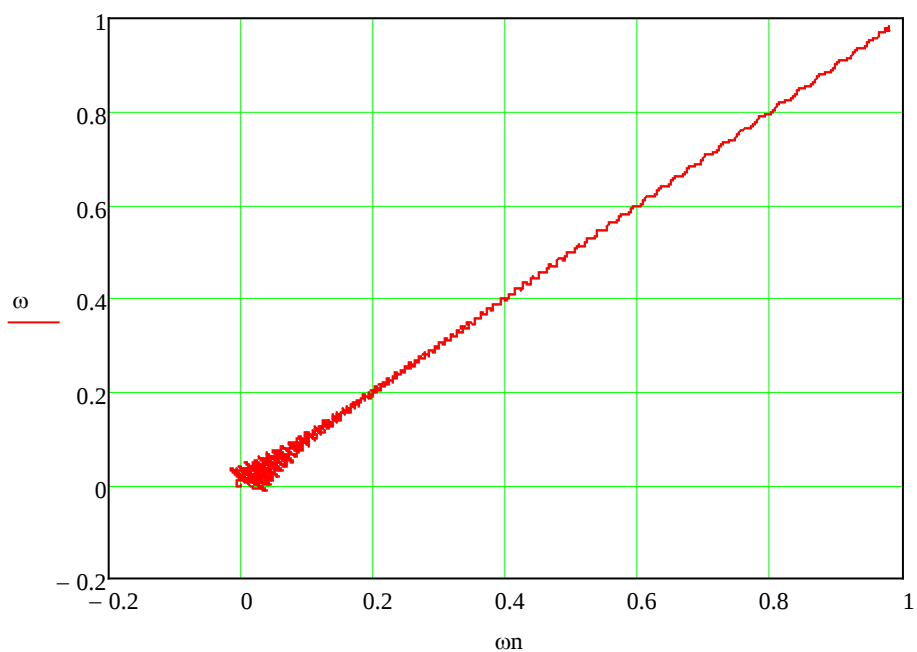


Рисунок 4.27 - Изменение угловой скорости двигателя от угловой скорости нагрузки, соединенной с валом двигателя упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

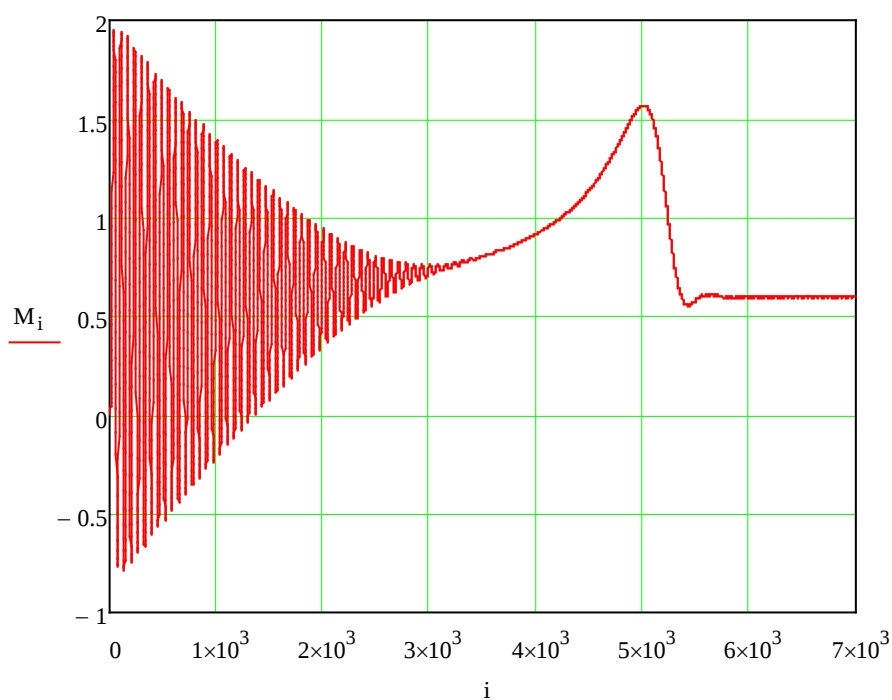


Рисунок 4.28 - Изменение электромагнитного вращающего момента при пуске с упругой муфтой и постоянных параметрах схемы замещения от i ($i - 0,1$ электрическая секунда)

При решении уравнений (4.21) можно учесть изменение параметров при пуске, как это было сделано в предыдущем параграфе. Полученные результаты приведем на рисунках 4.29 – 4.32.

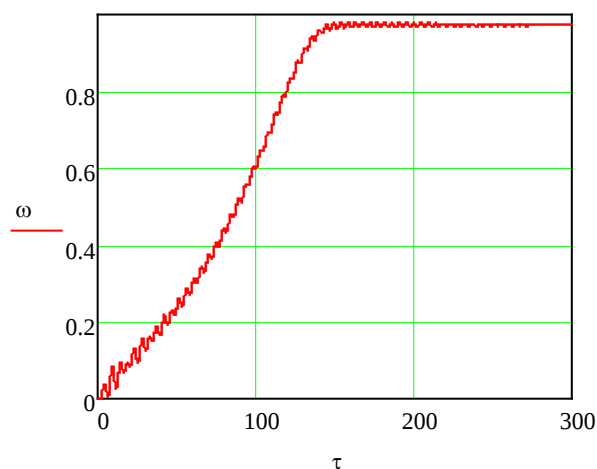


Рисунок 4.29 - Изменение угловой скорости при пуске двигателя 4A132S4 с переменными параметрами и упругой муфтой ($\kappa_b = 60$ о. е., величины на графике выражены в относительных единицах)

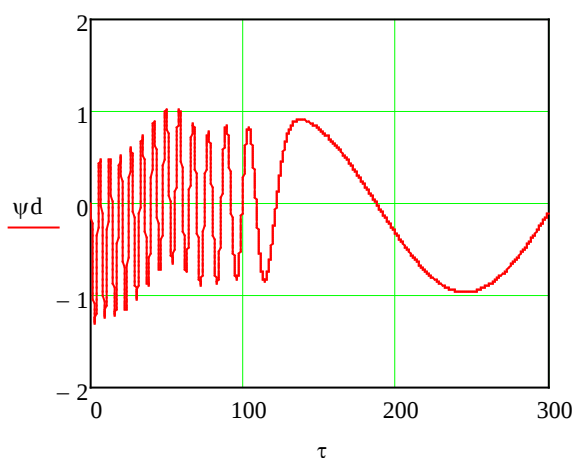


Рисунок 4.30 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси d при пуске с упругой муфтой и переменными параметрами ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике выражены в о. е.)

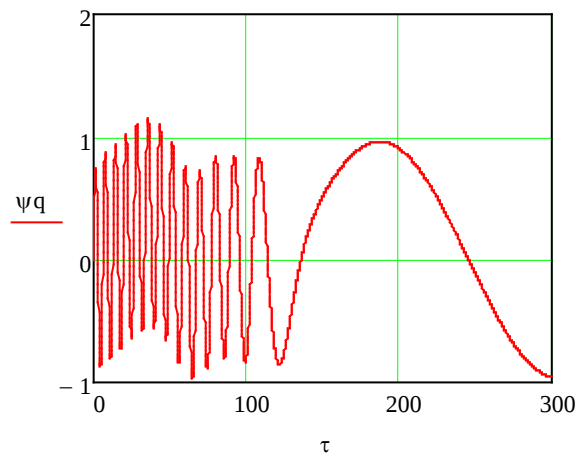


Рисунок 4.31 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки статора по оси q при пуске с переменными параметрами и упругой муфтой ($\kappa_B = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

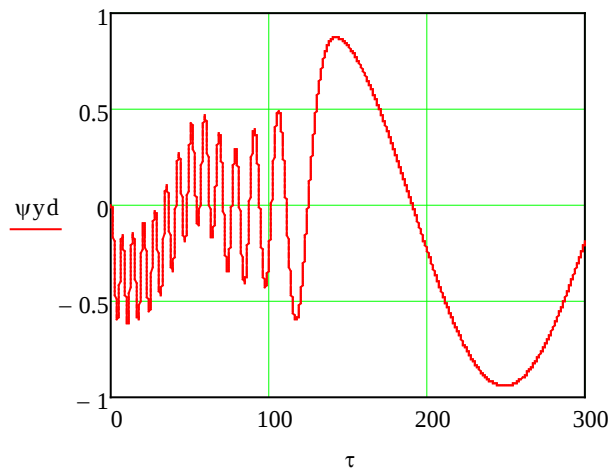


Рисунок 4.32 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси d при пуске с упругой муфтой и переменными параметрами ($\kappa_B = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

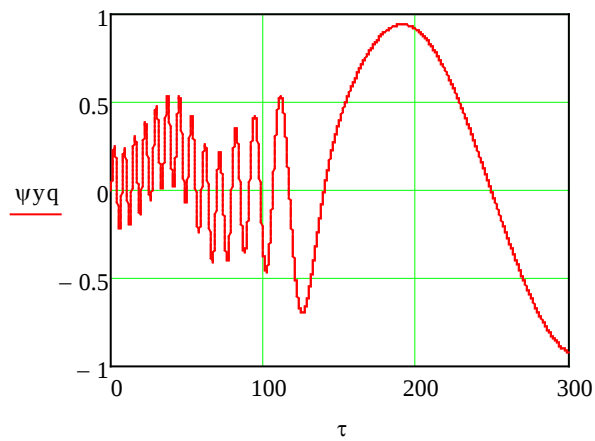


Рисунок 4.33 - Изменение потокосцепления эквивалентного контура обмотки ротора по оси q при соединении двигателя с нагрузкой упругой муфтой в условиях переменных параметров ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

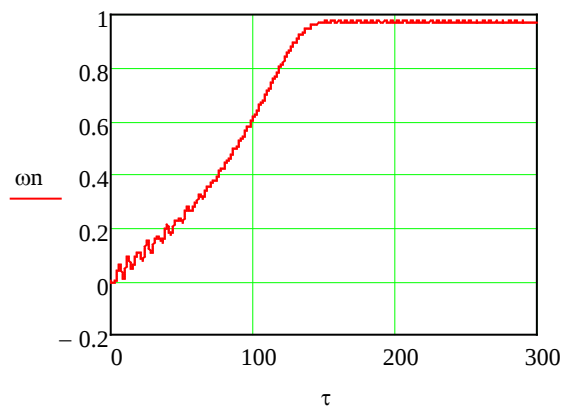


Рисунок 4.34 - Изменение угловой скорости нагрузки, соединенной с валом двигателя упругой муфтой в условиях переменных параметров ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

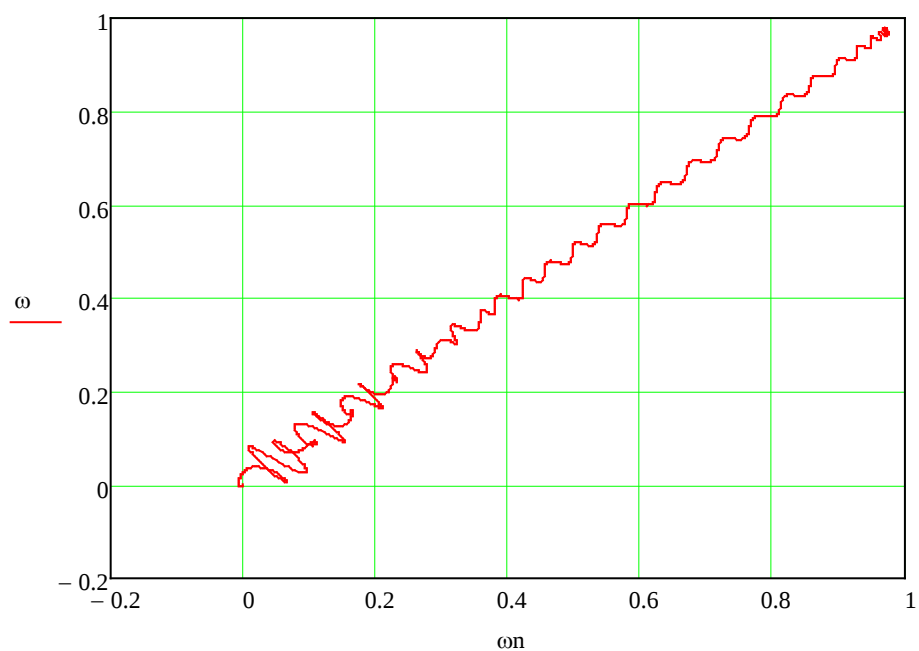


Рисунок 4.35 - Изменение угловой скорости двигателя от угловой скорости нагрузки, соединенной с валом двигателя упругой муфтой в условиях переменных параметров ($\kappa_b = 60$ о. е.; величины на графике - в относительных единицах)

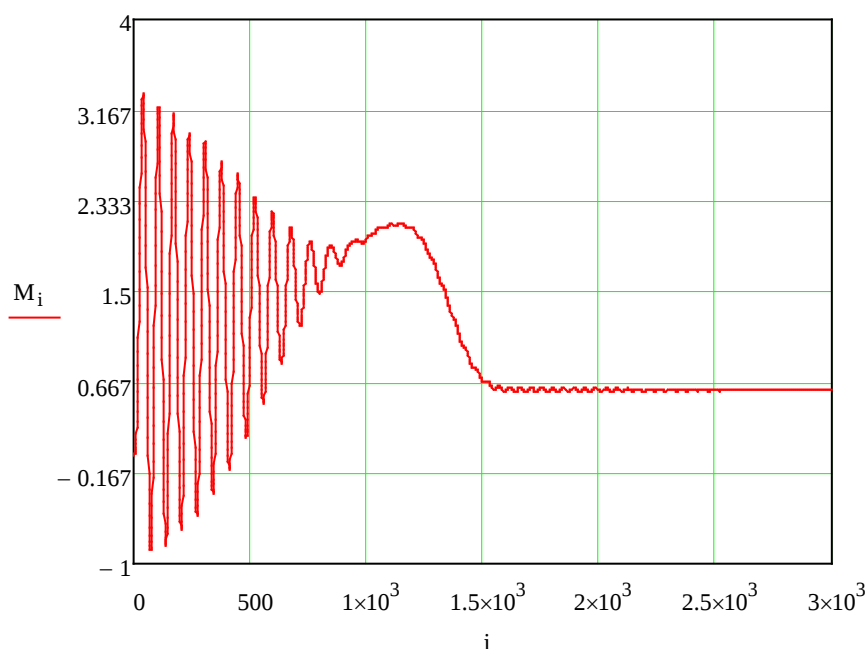


Рисунок 4.36 - Изменение электромагнитного вращающего момента при пуске с упругой муфтой и переменных параметрах схемы замещения от i (i – 0,1 электрическая секунда)

Оценивая полученные результаты можно отметить следующее. В условиях исследования двигателя с упругой муфтой переменные индуктивные сопротивления двигателя и активное сопротивление ротора приводят почти к троекратному уменьшению времени пуска.

Коэффициент упругости муфты (σ , e) принят минимально возможным с точки зрения устойчивости пуска двигателя. Если учитывать упругость муфты время пуска будет еще несколько меньше.

4.4 Выводы

1 Учет изменения индуктивных сопротивлений обмоток и активного сопротивления пусковой обмотки выполнялись по соотношениям (4.7) – (4.10).

2 Учет изменения индуктивных сопротивлений обмоток и активного сопротивления пусковой обмотки приводят к сокращению времени пуска. В нашем случае это 2,9 раза.

3 Введение в рассмотрение упругой муфты между двигателем и нагрузкой еще несколько сокращает время пуска (еще 15%).

5 СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

5.1 Определение потерь холостого хода и данных к построению круговой диаграммы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Испытаниям был подвергнут асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью $P_2 = 7,5$ кВт в режимах холостого хода и короткого замыкания.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А132S4У3 имеет следующие номинальные данные: $P_2 = 7,5$ кВт; $n_s = 1500$ об/мин; $I_n = 15$ А; $f = 50$ Гц; $\cos \varphi_n = 0,86$; $\eta_n = 87,5$ %; $s_n = 0,029$. Габаритные размеры по высоте и длине соответственно равны 350 мм и 480 мм.

Опыт холостого хода производится при работе двигателя без нагрузки на валу [60-62]. При номинальном напряжении $U_1 = 380$ В пускаем в ход двигатель. Уменьшая напряжение индукционным регулятором до $U_1 = 100$ В, делаем еще несколько замеров (5 – 6 точек). Результаты измерений заносим в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 Экспериментальные и расчетные данные опыта холостого хода.

Опытные данные			Расчетные данные				Примечание
U_1 , В	I_0 , А	P_w , Вт	P_0 , Вт	$\cos \varphi_0$	$P_{эл}$, Вт	$P_c + P_{мех}$, Вт	$f_1 = 50$ Гц
380	6,0	273	819	0,207	62	757	
320	4,8	218	654	0,245	40	614	
270	4,0	163	489	0,261	28	461	
220	3,2	128	384	0,313	18	366	
150	2,3	95	285	0,477	9,0	276	
100	1,75	75	225	0,742	5,0	220	

Мощность холостого хода p_0 и коэффициент мощности определяем по следующим соотношениям $\cos \varphi_0$,

$$p_0 = 3p_w, \quad (5.1)$$

где p_w – измеренная мощность холостого хода одной фазы,

$$\cos \varphi_0 = p_0 / \sqrt{3} U_1 I_0, \quad (5.2)$$

где I_0 – измеренный ток холостого хода.

По результатам опыта при номинальном напряжении ($U_1 = 380$ В) производим разделение потерь холостого хода на электрические $p_{эл}$, потери p_c в стали и механические $p_{мех}$. Электрические потери равны

$$p_{эл} = m_1 I_0^2 r, \quad (5.3)$$

где $m_1 = 3$ – число фаз,

r – активное сопротивление обмотки статора.

Для разделения потерь p_c и $p_{мех}$ строим зависимость $(p_c + p_{мех})(U_1^2)$ представленную на рисунке 5.1.

Тогда для $U_1^2 = 380^2$ В имеем $p_{мех} = AB = 180$ Вт и $p_c = BC = 576$ Вт.

Опыт короткого замыкания проводится при неподвижном роторе и пониженном напряжении. Тормозным устройством ротор фиксируем в неподвижном состоянии и устанавливаем на выходе индукционного регулятора минимальное напряжение. Изменяя U_1 , устанавливаем 3-4 значений токов короткого замыкания до $I_k = 1,25 I_{1н}$.

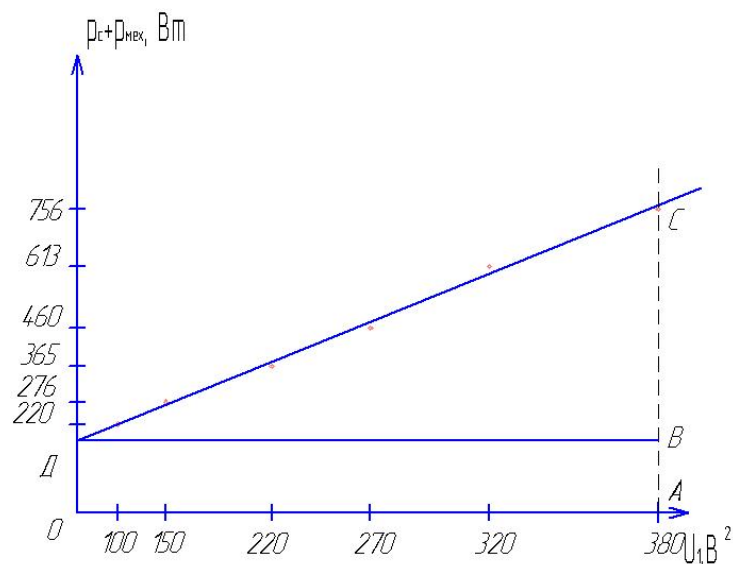


Рисунок 5.1 - Зависимость $(p_c + p_{мех})(U_1^2)$

Показания приборов записываем в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 Экспериментальные и расчетные данные опыта холостого хода.

Опытные данные			Расчетные данные		Примечание
$U_k, В$	$I_k, А$	$p_w, Вт$	$p_k, Вт$	$\cos \varphi_k$	$f_1 = 50 Гц$
50	16	313	939	0,677	
32	12	230	590	0,888	
22	10	148	344	0,903	

Мощность при коротком замыкании p_k и коэффициент мощности определяем по следующим соотношениям $\cos \varphi_k$,

$$p_k = 3p_w, \quad (5.4)$$

где p_w – измеренная мощность при коротком замыкании одной фазы,

$$\cos \varphi_k = p_k / \sqrt{3} U_k I_k, \quad (5.4)$$

где I_k – измеренный ток короткого замыкания.

По результатам расчета определяем действительный ток в фазе при коротком замыкании, соответствующий номинальному напряжению $U_{1H} = 380\text{В}$ при расчетной рабочей температуре 75°C :

$$I_{кH75} = I_{кH} \frac{Z_k}{Z_{к75}}, \quad (5.5)$$

где $I_{кH}$ - фазный ток короткого замыкания при номинальном напряжении

$$I_{кH} = I_K \frac{U_{1H}}{U_K}, \quad (5.6)$$

$$I_{кH} = 16 \frac{380}{50} = 121,6 \text{ А};$$

Z_k – полное сопротивление короткого замыкания определяемое по результатам опыта

$$Z_k = \frac{U_H}{I_K}, \quad (5.7)$$

$$Z_k = \frac{50}{16} = 3,13 \text{ Ом};$$

$Z_{к75}$ – полное сопротивление короткого замыкания, при расчетной рабочей температуре 75°C .

$$Z_{к75} = \sqrt{r_{к75}^2 + X_k^2}. \quad (5.8)$$

Для определения $I_{кH75}$ необходимые расчетные величины берутся из таблицы 5.2.

Активное сопротивление короткого замыкания определи по следующему соотношению

$$r_k = \frac{p_k}{3I_k^2} \quad (5.9)$$

$$r_k = \frac{939}{3 \cdot 16^2} = 1,22 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания определим

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (5.10)$$

$$X_k = \sqrt{3,13^2 - 1,22^2} = 2,88 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания при расчетной рабочей температуре 75°C определяется

$$r_{k75} = r_k \frac{75^\circ + 235^\circ}{\theta^\circ + 235^\circ}, \quad (5.11)$$

где $\theta^\circ = 20^\circ\text{C}$ - температура окружающей среды, тогда

$$r_{k75} = 1,22 \frac{75^\circ + 235^\circ}{20^\circ + 235^\circ} = 1,48 \text{ Ом.}$$

По соотношению (5.8) определим полное сопротивление короткого замыкания при расчетной рабочей температуре 75°C

$$Z_{k75} = \sqrt{1,48^2 + 2,88^2} = 3,24 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем действительный ток в фазе при коротком замыкании, по соотношению (5.5)

$$I_{кн75} = 121,6 \frac{3,13}{3,24} = 117,5 \text{ А.}$$

Все выше приведенные расчеты нам потребуются для построения круговой диаграммы.

Наглядное представление о количественных и качественных соотношениях токов, мощностей и напряжений в отдельных элементах асинхронной машины дает круговая диаграмма. Она является, по сути дела, векторной диаграммой схемы замещения асинхронной машины с некоторыми дополнительными построениями. Круговая диаграмма позволяет определить графически все величины для построения рабочих и электромеханических характеристик двигателя [4,5,7]

Круговую диаграмму асинхронного двигателя можно построить согласно ГОСТ 7217-87 по результатам двух опытов: холостого хода и короткого замыкания [11]. Однако определенная таким образом круговая диаграмма даст возможность определить механическую характеристику с большой погрешностью. Выход из этого положения может быть таким.

5.2 Построение механической характеристики экспериментально при помощи электромагнитного тормоза

Испытаниям подвергался асинхронный двигатель 4А132S4У3. Двигатель был предоставлен кафедрой ЭМСЭС ВГТУ из лаборатории электрических машин. Этот же двигатель был предварительно испытан, как показано в предыдущем разделе.

В качестве нагрузки был использован электромагнитный порошковый тормоз ПТ-16М1. Физический смысл работы тормоза основан на том, что при задании тока управления от отдельного источника тока сопротивление карбонильного железа и масла, находящихся в зазоре тормоза между вращающимися узлами изменяется. При этом усилие посредством рабочей смеси (карбонильное железо и масло) передается на корпус. Это отклонение фиксируется упругой скобой, к которой приставлен индикатор, фиксирующий величину отклонения. Эта величина пропорциональна передаваемому на вал моменту. Фотография порошкового тормоза приведена на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 - Порошковый тормоз ПТ-16М1

Общая компоновка электродвигателя 4А132S4У3 с порошковым тормозом приведена на рисунке 5.3.

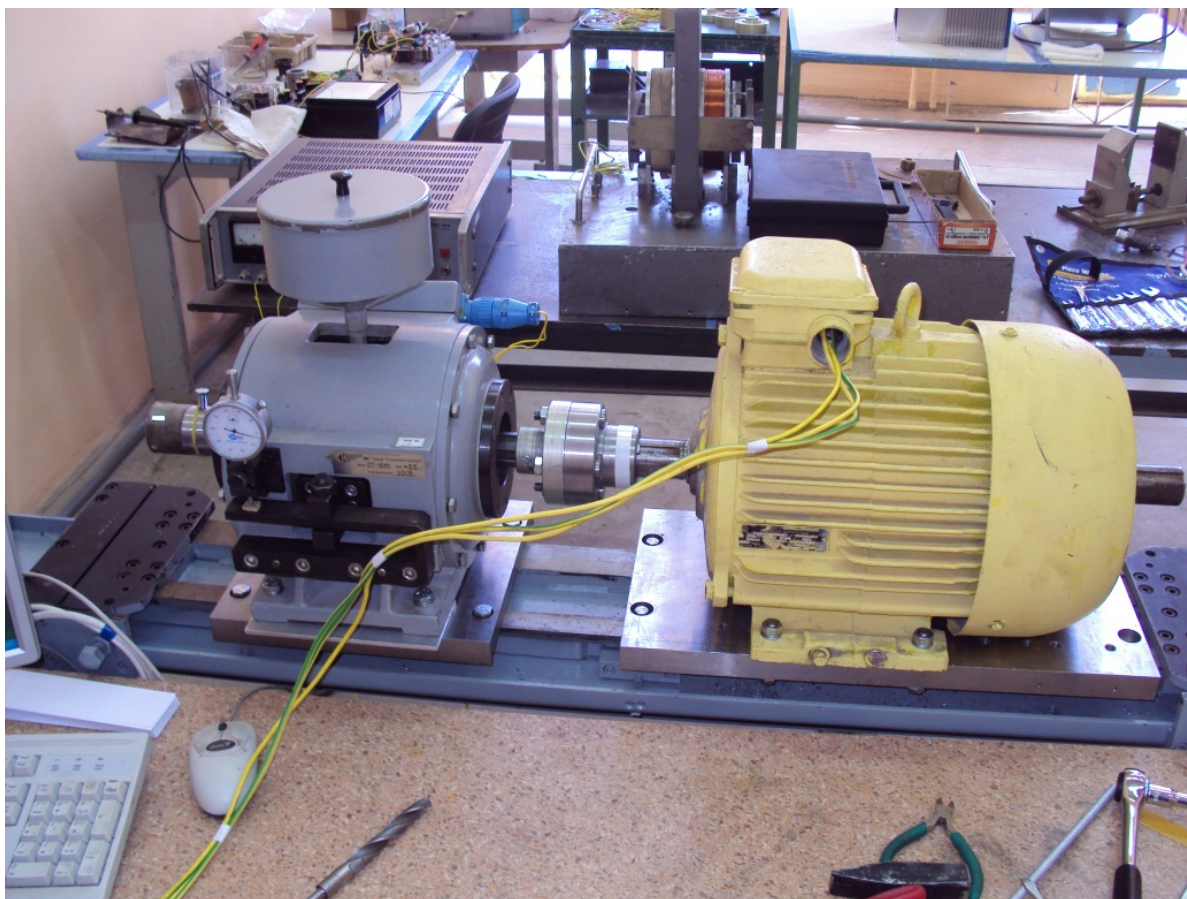


Рисунок 5.3 - Экспериментальная установка для измерения момента вращения на валу двигателя 4A132S4Y3

Типоразмер порошкового тормоза обеспечивает хорошую точность измерений в диапазоне моментов от 0 до 100 Н·м и частоты вращения вала от 3000 до 1000 об/мин. Синхронная частота вращения четырехполюсного асинхронного двигателя равна 1500 об/мин.

В разделе 2 была получена зависимость электромагнитного вращающего момента от скольжения. Потери холостого хода двигателя 4A132S4Y3 были экспериментально определены в предыдущем пункте. Это позволяет расчетную характеристику раздела 2 для электромагнитного момента вращения пересчитать на зависимость момента на валу от скольжения.

Используемые для измерения момента вращения на валу при помощи порошкового тормоза приборы приведем в таблице 5.3.

Таблица 5.3 Используемые приборы

Наименование прибора	Тип прибора
Тахометр	DT-2234A
Вольтметр постоянного тока	M2044
Регулируемый источник тока	ТЭС-21
Порошковый электромагнитный тормоз	ПТ-16М1
Пульт питания и защиты	ОДИК.468310.003
Мультиизмеритель	DKM16

В таблице 5.4 приведены данные измерений механической характеристики двигателя 4A132S4Y3. Экспериментальная механическая характеристика может быть сравнена с расчетной, полученной методом конечных элементов в разделе 2.

Характеристика, которая подходит для сравнения может быть получена из данных рисунка. 2.13.

Таблица 5.4 Механическая характеристика асинхронного двигателя 4A132S4Y3

№ п/п	Частота вращения вала, об/мин	Ток порошкового тормоза, mA	Момент на валу, Н·м	Ток двигателя, А
1.	1491	0	6,5	8,7
2.	1486	0,5	16,0	9,3
3.	1478	1,0	29,5	12,0
4.	1474	1,2	36,5	13,5
5.	1466	1,5	46,0	15,9
6.	1454	2,0	61,0	20,4
7.	1430	2,5	77,0	25,5
8.	1422	3,0	92,0	29,7
9.	1410	3,5	104,0	37,2
10.	1394	4,0	120,0	41,4

Для проведения сравнения достаточно сузить интервал частот вращения по сравнению с рисунком 2.13. В интервале скольжения $0 - 0,1$ о.е. механическую характеристику асинхронного двигателя можно считать линейной. Проведем интерполяцию отмеченных точек. Напомним, что момент потерь холостого хода, определенный через потери холостого хода, следует вычесть из каждой точки соответствующего электромагнитного вращающего момента. Результаты расчетов сведем в таблицу 5.5.

Данные сопоставления результатов эксперимента и расчета механической характеристики представим на рисунке 5.4. Здесь сплошной линией представлены результаты механической характеристики, полученные расчетом, а точки представляют экспериментальные значения механической характеристики испытуемого двигателя.

Таблица 5.5 Расчетная механическая характеристика по рисунку 2.13.

№ п/п	Частота вращения вала, об/мин	Момент на валу, Н·м
1	1482	6,5
2	1476	16,0
3	1468	29,5
4	1463	36,5
5	1457	46,0
6	1448	61,0
7	1438	77,0
8	1428	92,0
9	1420	104,0
10	1410	120,0

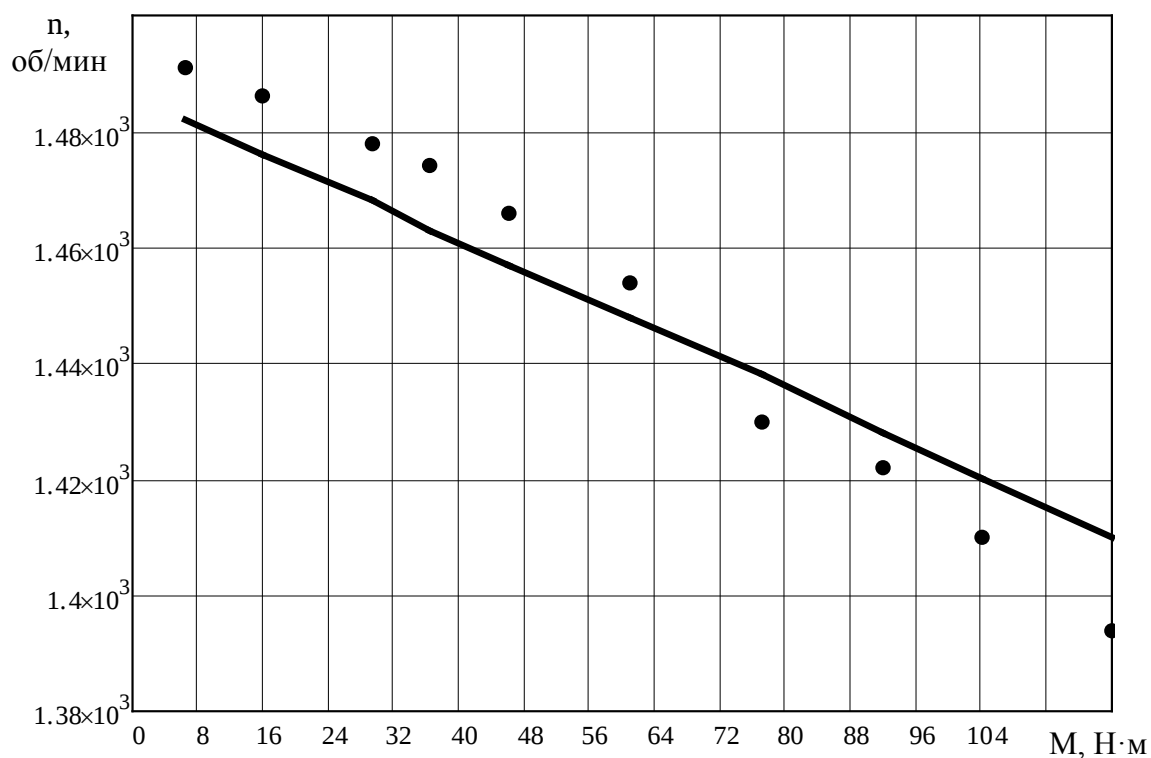


Рисунок 5.4 - Сопоставление расчета механической характеристики двигателя 4A132S4Y3

Оценивая графические зависимости можно сделать вывод о некоторой погрешности в данных. Однако она не превышает 1,5% при больших моментах и менее процента – в остальных случаях. Этот вывод графически еще более нагляден, если перестроить графики в другом масштабе, как показано на рисунке 5.5.

В представленном на рисунке 5.5. варианте экспериментальные точки практически сливаются с расчетной кривой, что подтверждает сделанный вывод о хорошей сходимости данных расчета с экспериментом.

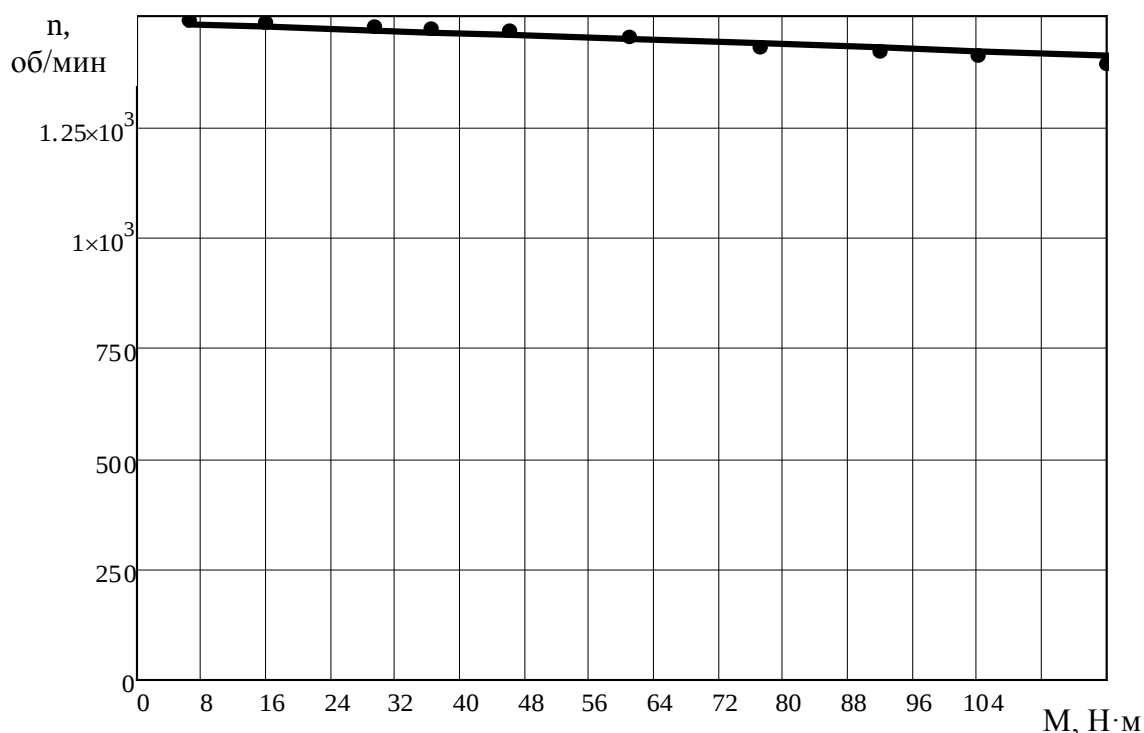


Рисунок 5.5 - Сопоставление расчета механической характеристики двигателя 4A132S4Y3 (рисунок 5.4. перестроен в другом масштабе)

Таким образом, метод конечных элементов, который был использован для расчета электромагнитного момента в предлагаемой модели асинхронного двигателя, хорошо согласуется с его экспериментальным определением.

5.3 Отработка предлагаемых решений в условиях серийного завода

Используемый в работе метод конечных элементов позволил создать математическую модель, которая адекватно отражает процессы, происходящие в асинхронном двигателе.

Другими словами, можно с большой долей вероятности доверять полученным результатам о влиянии результирующей площади пазов ротора на энергоэффективность, которые были получены в разделах 2 и 3.

Отработка предлагаемых конструктивных решений была выполнена в ОАО «Уралэлектро» г. Медногорск. Для этого был выбран серийный двигатель АДМ132S4У3 мощностью 7,5 кВт. На рисунке 5.6. приведен лист ротора, доработанный в соответствии с рекомендациями разделов 2 и 3.

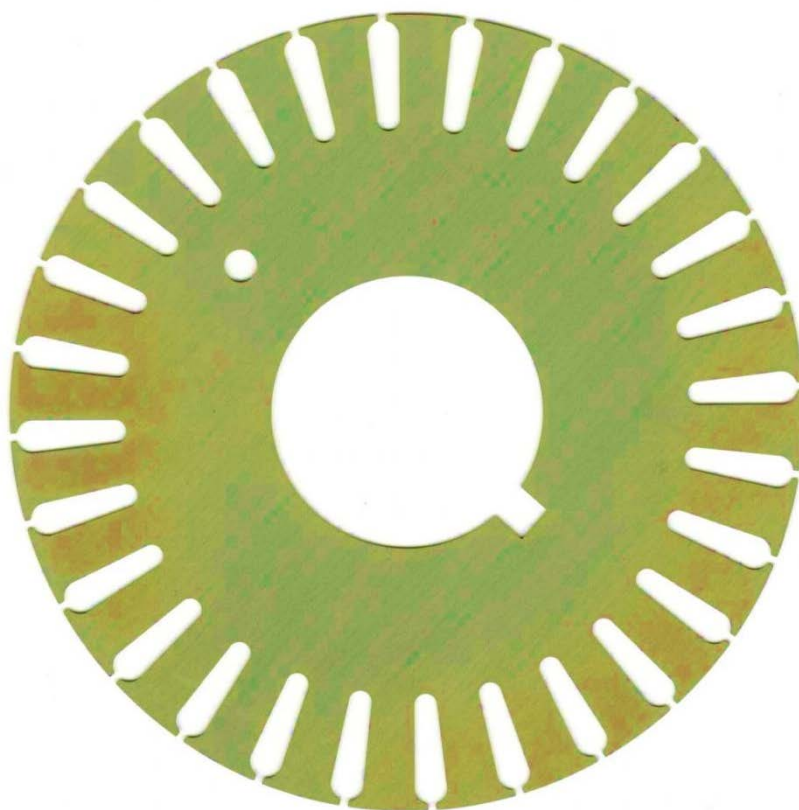


Рисунок 5.6 - Лист ротора электродвигателя АДМ132S4У3 с измененной геометрией пазов

Расчеты, выполненные при оптимизации листа ротора, позволили получить коэффициент пазов ротора 0,163. После чего листы ротора были вырезаны методом электро-эрозии из электротехнической стали в соответствии с чертежом. Заливка, сборка и динамическая балансировка ротора выполнялась по серийной технологии.

После этого была произведена сборка двух двигателей АДМ132S4У3 с модернизированными роторами (в части площади пазов с $K = 0,163$). Двигатели были переданы в центральную заводскую лабораторию и подвергнуты типовым испытаниям. Протоколы испытаний приведены в приложении 1.

Объект испытаний: асинхронные электродвигатели АДМ132S4 У2 № 110,111 производства ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО» г. Медногорск.

Цель испытания: типовые (изменения конфигурации листа ротора).

Таблица 5.6 Номинальные параметры:

Тип. эл. двигателя;	АДМ132S4 У2
Напряжение, В:	380
Ток, А:	15,8
Мощность, кВт:	7,5
КПД, %:	87,0
Cos φ:	0,83
Кл. изоляции:	F
Режим работы:	S1
Степень защиты:	IP54
Об/мин	1432

Испытания эл. двигателей проводились по программе ТУ 3325-003-05758017-2002 Двигатели асинхронные трехфазные серии АДМ.

Методика испытаний использовалась следующая.

Определение основных энергетических и виброакустических параметров.

Определение тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания, начального пускового тока, кривой вращающего момента, начального пускового, минимального и максимального моментов проведены в соответствии с ГОСТ 7217, ГОСТ 11828.

Определение рабочих характеристик, коэффициента мощности, КПД, скольжения, а также испытания на нагревание проведены в соответствии с ГОСТ 25941, ГОСТ 7217, ГОСТ 11828.

Определение среднего значения уровня звука, максимального значения вибрации и степени защиты проведены в соответствии с ГОСТ 11929, ГОСТ 20815, ГОСТ 17494, ГОСТ Р МЭК 60034-14.

Перечень приборов и оборудования, используемых при испытаниях.

1. Источники питания: потенциал – регулятор МА 195 – 56 – 24.

2. Стенды укомплектованы приборами класса точности 0,5:

- вольтметры типа Э59;
- ваттметры - Д539;
- амперметры – Э59;
- милливольтамперметры – М253.

3. Динамометр: тип MS 2218-4; весовое устройство: тип 27-0.

4. Мегаомметр М4100 / 3 500В.

5. Виброметр С3203 с датчиком АП39.

6. Пробойная установка УПУ – 1М.

Результаты испытаний приведены в таблице 5.7. Полученные результаты можно сравнить с данными серийного двигателя, которые приведены в приложении 2. Результаты сравнения показывают следующее.

1 Поперечное сечение алюминия в пазовой части ротора было уменьшено на 19,5%. Это приводит к увеличению активного сопротивления клетки ротора.

2 Ожидаемое увеличение пускового момента не сопровождается с неизбежным уменьшением КПД. Более того, в одном из образцов он увеличился на 0,5%.

Таблица 5.7 Испытания двигателя АДМ132S4 У2

№п\п	Наименование параметров	Обозначен.	Ед. Изм.	Результаты испытаний	
				№110	№111
1	Соединение фаз	Y		Y	Y
2	Режим работы	S		S	S
3	Полезная мощность	P2	Квт	7,5	7,5
4	Напряжение	U	В	380	380
5	Ток статора	I	А	15,5	15,3
6	Частота	F	Гц	50	50
7	Скорость вращения	N	Об/мин	1435,4	1437,5
8	Скольжение	S	%	4,3	4,2

9	Коэф. полезн. действ.	КПД	%	87,0	87,5
10	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$		0,842	0,851
11	Мощность потребляемая	P_1	КВт	8,615	8,571
12	Номинальный момент	$M_{ном}$	КГ м	5,01	5,0
13	Кратн. Нач. пуск. Мом.	$M_{пуск}/M_{ном}$		2,51	2,41
14	Кратн. Макс. Момент.	$M_{макс}/M_{ном}$		2,8	2,7
15	Кратн. Мин. момента	$M_{мин}/M_{ном}$		2,23	2,27
16	Кратн. Пускового тока	$I_{пуск}/I_{ном}$		6,7	6,4
17	Ток холостого хода	I_0	А	7,52	7,42
18	Потери холостого хода	P_0	Вт	405	371,3
19	Ток короткого замыкания	I_k	А	18,8	19,2
20	Потери короткого замыкания	P_k	Вт	1400	1370
21	Макс. уровень вибрации		Мм/с	0,4	0,4
22	Средний уровень звука		db	62,7	63,1
23	Превыш темп обм статора	Q	С	88,0	86,5
24	Сопр обм стат при 20° С	R20	Ом	0,559	0,549
25	Сопр.изол обм. статора: хол / гор	Rиз	Мом	∞	∞
26	Потери в стали	$P_{ст}$	Вт	224,3	189,9
27	Потери в обмотке статора	$P_{м1}$	Вт	410,4	408,3
28	Потери в обмотке ротора	$P_{м2}$	Вт	401,7	390,1
29	Потери механические	$P_{мех}$	Вт	35,0	40,0
30	Потери добавочные	$P_{доб}$	Вт	43,7	43,3
31	Сумма потерь	$P_{общ}$	Вт	1115,1	1071,6
32	Напряжение разворота	U	В	70	70
33	Масса	кг	кг	46,920	46,920

Результаты типовых испытаний показывают следующее: электродвигатели АДМ132S4 У2 с доработанными роторами соответствуют требованиям ТУ3325-003-05758017- 2002.

5.4 Рекомендации к проектированию трехфазных асинхронных двигателей в части требований к геометрии пазовой зоны ротора

1 Методику, основанную на схемах замещения и круговых диаграммах, следует использовать только для предварительных расчетов. При этом начальным приближением для энергоэффективных двигателей, сокращающим время вычислений, будет такое, при котором пазовая часть ротора соответствует следующей таблице 5.8.

Таблица 5.8 Коэффициенты пазов ротора исследованных электродвигателей

№ п/п	Мощность двигателя, кВт	Модернизированные исполнения	Данные серийных машин
1	0,75	0,189	0,176
2	7,5	0,185	0,212
3	15	0,161	0,266

2 Если к двигателю предъявляются требования повышенного пускового момента, то сохраняя КПД стандартного двигателя, данные столбца модернизированного исполнения следует умножить на поправочный коэффициент 0,75. При этом возможно получить возрастание пускового момента без снижения КПД стандартного двигателя.

3 Выполненные ранее исследования показывают, что в области мощностей менее 750 Вт значения коэффициентов пазов ротора при модернизации близки к данным приведенной таблицы [52, 53].

4 Параметрической оптимизацией с использованием метода конечных элементов уточняется пазовая зона ротора в сторону увеличения или уменьшения коэффициента пазов ротора исследуемого двигателя.

5 Число пазов ротора желательно брать четным.

6 Числа пазов ротора и статора должны быть близкими, но не равными.

7 После деления числа пазов ротора на 2 желательно получить простое число.

5.5 Выводы

1 Электромагнитный вращающий момент, рассчитанный методом конечных элементов, хорошо совпадает с данными экспериментальных исследований, когда нагрузка на валу задавалась электромагнитным порошковым тормозом ПТ-16М1, а момент потерь холостого хода определялся из опыта.

2 Испытания четырехполюсного асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт с измененным листом пакета ротора в условиях серийного завода (ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО» г. Медногорск) подтвердил полученную в работе тенденцию, когда пазы на роторе выбираются с учетом полученных коэффициентов.

3 Одновременное увеличение КПД и пускового момента свидетельствует о правильно сделанном предположении, что кроме соотношения числа пазов ротора и статора, а также их формы на энергоэффективность асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором заметное влияние оказывает суммарная площадь пазов ротора.

4 Параметрическая оптимизация с использованием метода конечных элементов показала, что полученные коэффициенты пазов ротора отличаются от данных серийных изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время проблема энергосбережения в асинхронных двигателях стоит перед многими предприятиями. Для ее достижения разработчики идут на некоторое увеличение себестоимости машины понимая, что сделанные затраты при производстве асинхронных двигателей многократно окупятся при их эксплуатации. Надо отметить, что в этом направлении есть много неиспользованных возможностей: разработчики часто не проводят с потребителями рекламных компаний, которые бы показывали явные преимущества энергоэффективных асинхронных двигателей над стандартными изделиями. Дело в том, что отпускная цена энергоэффективных асинхронных двигателей, конечно, будет несколько больше, чем у стандартных. Выигрыш получится при эксплуатации. Он будет ощутимым.

Цель и задачи, поставленные вначале работы, получили теоретическое и практическое решение. Проведенные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать следующие основные результаты.

1 Исследование электромагнитного поля при варьировании геометрии ротора показало путь, как из стандартного асинхронного двигателя получить энергоэффективный.

2 Выявлено, что площадь проводникового материала в поперечном сечении ротора оказывает влияние на способность асинхронного двигателя к эффективному преобразованию энергии.

3 Варьирование числом пазов ротора при их неизменной форме и площади позволило найти экстремум электромагнитного вращающего момента в режиме пуска и при номинальном скольжении.

4 Как правило, в оптимизированных энергоэффективных двигателях суммарное количество проводникового материала ротора меньше, чем в стандартных изделиях. Эта закономерность нарушается, когда магнитная система двигателя имеет верхний предел насыщения.

5 Исследование пуска с учетом упругости муфты и изменения параметров асинхронного двигателя дало заметное сокращение времени переходного процесса.

6 Электромагнитный вращающий момент, рассчитанный методом конечных элементов, хорошо совпадает с данными экспериментальных исследований, когда нагрузка на валу задавалась электромагнитным порошковым тормозом ПТ-16М1, а момент потерь холостого хода определялся из опыта.

7 Испытания четырехполюсного асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт с измененным листом пакета ротора в условиях серийного завода (ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО» г. Медногорск) подтвердил полученную в работе тенденцию, когда пазы на роторе выбираются с учетом полученных коэффициентов.

8 Одновременное увеличение КПД и пускового момента свидетельствует о правильно сделанном предположении, что кроме соотношения числа пазов ротора и статора, а также их формы на энергоэффективность асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором заметное влияние оказывает суммарная площадь пазов ротора.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Абрамкин Ю.В. Теория и расчет пондеромоторных и электродвижущих сил и преобразования энергии в электромагнитном поле. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 208 с.
- 2 Максвелл Д.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Гостехиздат, 1954. – 688 с.
- 3 Тамм И.Е. Основы теории электричества. 9-е изд. – М.: Наука, 1976, 620 с.
- 4 Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. “Электромеханика”. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
- 5 Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
- 6 Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах/ Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
- 7 Иванов-Смоленский А.В., Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- 8 Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для ВУЗов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
- 9 Костенко М.П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
- 10 Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 2: Асинхронные и синхронные машины. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
- 11 ГОСТ 7217 – 87 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
- 12 Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 368 с.
- 13 Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин: Учеб.

пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

14 Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. - М.: Высш. школа, 1980. – 359 с.

15 Минаков В.Ф. О схемах замещения асинхронных и синхронных машин // Электричество. – 1995. – № 4. – с. 27-29.

16 Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

17 Архангельский Н.Л., Курнышев Б.С., Захаров П.А. Применение тензорной методологии к описанию электромагнитных процессов в асинхронном двигателе // Электричество. – 1995. – № 2. – с. 37-39.

18 Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 176 с.

19 Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 256 с.

20 Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация (перевод с англ.). – М.: Мир, 1986. – 318 с.

21 Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.

22 Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов. / Кислицын А.Л., Крицштейн А.М., Солнышкин Н.И., Эрнст А.Д. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1980. – 174 с.

23 Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с.

24 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

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

26 Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров:

Справ. пособие. – М.: Машиностроение - 1, 2004. - 512 с.

27 Analysis of torsional torques in starting of large squirrel-cage induction motors / Shaltout Adel A. // IEEE Trans. Energy Convers. – 1994. – 9, № 1. – p. 135—141.

28 A novel approach to circuit-field-torque coupled time stepping finite element modeling of electric machines: Pap 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG'99), Sapporo, Oct. 25-28, 1999. Pt 1. Ho S. L., Li H. L., Fu W. N., Wong H. IEEE Trans. Magn. 2000. 36, № 4, Pt. 1, p. 1886-1889.

29 A time-stepped 2D-3D finite element method for induction motors with skewed slots modeling: 1. Dziwniel P., Piriou F., Ducreux J.-P., Thomas P. IEEE Trans. Magn. 1999. 35, № 3, p. 1262-1265.

30 Finite element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters: Selec. Pap. 11th Conf. Comput. Electromagn. Fields (COMPUMAG'97), Rio de Janiero, Nov. 3-6, 1997 / Zhou P., Grilmore J., Badics Z., Cendes Z. J. // IEEE Trans. Magn. – 1998. – 34, № 5, Pt 1 – p. 3499-3502.

31 Induction motor modelling using finite elements: [Papp.] Conf. int. Mach. Elec. (ICEM), Paris, Sept., 1994 / Williamson S. // Rev. gen. elec. – 1994. – № 8. – p. 2—8.

32 Асинхронные двигатели общего назначения / Бойко Е.П., Ковалев Ю.М. и др.; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

33 Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504с.

34 Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб для электромех. спец. Вузов / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.

35 Справочник по электрическим машинам. В 2-х томах. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

36 Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Под ред. В.И. Радина – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

37 Макаров Л.Н. Разработка и освоение производства высокоэффективной конкурентоспособной серии асинхронных машин. Диссертация в форме научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 2006. 40 с.

38 Кругликов О.В., Макаров Л.Н. Состояние и перспективы разработок и производства новых электродвигателей специалистами ОАО «НПТИЭМ» и ОАО «ВЭМЗ» // Электротехника. 2008. № 11. с. 3 – 11.

39 ГОСТ Р 54413-2011 – Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE).

40 Стандарт МЭК (IEC) 60034-30-1 "Электрические машины вращательного действия. Часть 30-1: Классы эффективности электродвигателей переменного тока с питанием от сети (код IE)".

41 Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

42 Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины (обзор зарубежных разработок) // Электричество. 2015. №4. С. 45-55.

43 Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В., Макаров Л.Н. Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий // Электротехника, 2015, №4. С.34-41.

44 Кобзистый С.Ю. Влияние параметров на установившиеся и переходные режимы работы трехфазных асинхронных двигателей: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Воронеж: 2004. – 17 с.

45 Тонн Д.А. Квазиустановившиеся и переходные процессы несимметричных асинхронных двигателей, работающих от однофазной сети: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Воронеж: 2004. – 17 с.

46 Кононенко А.В. Влияние магнитной проводимости клиньев статора на электромагнитный момент асинхронного двигателя// Вестник Воронежского

государственного технического университета. Т.2. №5. Воронеж, 2006. - с. 127-129.

47 Кононенко А.В. Влияние геометрии зубцовой зоны на рабочие и пусковые характеристики асинхронных двигателей малой мощности // Автореферат дисс. канд. техн. наук., Воронеж. 2006. – 16 с.

48 Луценко Е.В. Развитие методики проектирования асинхронных двигателей малой мощности в части расчета реактивных моментов// Автореферат дисс. канд. техн. наук., Воронеж. 2009. – 18 с.

49 Луценко Е.В. Реактивные моменты в асинхронных двигателях малой мощности и способы борьбы с ними // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. №10 (т. 5). – С. 135 – 138.

50 Белозоров С.А. Оценка эффективности обмоток трехфазных асинхронных двигателей с учетом зубчатого строения воздушного зазора// Автореферат дисс. канд. техн. наук., Воронеж. 2012. – 17 с.

51 Кононенко А.В. Формирование геометрии поперечного сечения магнитопровода энергоэффективного асинхронного микроэлектродвигателя с короткозамкнутым ротором / А.В. Кононенко, В.В. Юрканов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. №2. – С. 1-5.

52 Юрканов В.В. Проектирование зубцовой зоны энергоэффективных трехфазных асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором / В.В. Юрканов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. №2. – С. 29-34.

53 Юрканов В.В. Зубцовые зоны энергоэффективных трехфазных асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором// Автореферат дисс. канд. техн. наук., Москва. 2015. – 17 с.

54 Кононенко К.Е., Кононенко А.В., Крутских С.В. Оценка некоторых технических решений, принятых при создании асинхронных двигателей серии РА с позиций теории электромагнитного поля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2009. № 3. С. 79-80.

55 Кононенко К.Е., Кононенко А.В., Крутских С.В. Основной резерв повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 1. С. 54-60.

56 Кононенко Е.В. Электрические машины (специальный курс) /Е.В. Кононенко, Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков. – М.: Высш. шк., 1975. – 279 с.

57 Кононенко А.В. Устойчивость работы и переходные процессы электрических машин переменного тока [Электронный ресурс 2,7 Мб] / А.В. Кононенко, К.Е. Кононенко. – Воронеж: ФГБОУ ВГТУ, 2014. № Гос. Регистрации - 0321403572.

58 Гаррис М., Лауренсон П., Стефенсон Дж. Системы относительных единиц в теории электрических машин: Пер. с англ. М.: Энергия, 1975. 119 с.

59 Видеман Е., Келленбергер В. Конструкции электрических машин. Л.: Энергия, 1972. 520 с.

60 Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин – М.: Высшая школа, 1990. – 255 с.

61 Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергия, 1968. – 574 с.

62 Пиотровский Л.М., Васютинский С.Б., Несговорова Е.Д. Испытание электрических машин. Часть 2: Трансформаторы и асинхронные машины. – М.-Л.: Гос. Энерг. Изд., 1960. – 291с.

63 Кононенко К.Е. Расчет статической механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя методом конечных элементов / К.Е. Кононенко, С.В. Крутских //Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2008», г. Воронеж, 2008 г., С.46-47.

64 Кононенко К.Е. Изменение характеристик асинхронных двигателей применением магнитных клиньев на статоре / К.Е. Кононенко, С.В. Крутских// Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных

исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2011», г. Воронеж, 2011 г., С.214-215.

65 Щедрин В.В. Построение графика токовой характеристики асинхронного двигателя по уточненной круговой диаграмме / В.В. Щедрин, С.В. Крутских, А.В. Кононенко // Труды всероссийской студенческой научно-технической конференции «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники», г. Воронеж, 2011 г, С.14-15.

66 Щедрин В.В. Расчет статической механической характеристики асинхронного двигателя методом конечных элементов / В.В. Щедрин, С.В. Крутских, А.В. Кононенко // Труды всероссийской студенческой научно-технической конференции «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники», г. Воронеж, 2011 г, С.24-25.

67 Кононенко К.Е. Влияние повышенного сопротивления стержня ротора, обрыв одного или нескольких стержней на характеристики асинхронных двигателей / К.Е. Кононенко, С.В. Крутских // Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2011», г. Воронеж, 2011 г., С.210-211.

68 Кононенко К.Е. Влияние соотношений пазов статора и ротора на эффективность электромеханического преобразования энергии в асинхронных машинах / К.Е. Кононенко, С.В. Крутских // Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2011», г. Воронеж, 2011 г., С.216-217.

69 Кононенко К.Е. Моделирование дефекта стержня ротора асинхронного двигателя / К.Е. Кононенко, С.В. Крутских // Труды всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2013», г. Воронеж, 2013 г., С.176-177.

70 Кононенко К.Е. Параметрическая оптимизация геометрии пазов ротора как способ повышения КПД асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, С.В. Крутских // Электротехнические комплексы и системы управления, №2 (38), 2015 г., С.45-49.

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ОАО «Уралэлектро»

В.И. Попов



02 2016 г.

А К Т

внедрения в производственный процесс результатов диссертационной работы
Крутских Сергея Владимировича «Способ повышения энергоэффективности
асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором»

Полученные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы Крутских С.В. использованы при разработке асинхронных двигателей в рамках ОКР «Разработка трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором межвидового исполнения повышенной надежности с мощностью от 0,75 до 15 кВт в модульном исполнении с микропроцессорным преобразователем частоты».

В работе показано, что в большей степени, чем форма и число пазов на энергоэффективность асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором оказывает влияние суммарная площадь пазов листа ротора.

Практическая апробация основных теоретических выводов работы произведена на двух опытных образцах электродвигателя АДМ132S4 с модернизированными роторами в центральной заводской лаборатории ОАО «Уралэлектро». Правильность принятых технических решений подтверждена положительными результатами испытаний.

Главный конструктор по ЭМ
« 10 » 02 2016 г.

А.Ю. Мамыкин



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО»

В.И. Попов

10. 02. 2016 г.

Протокол № 61-18-1399

Типовые испытания асинхронных
электродвигателей АДМ132S4 У2

10.02.2016г.

ЛИСТОВ 4

И.О. Начальника ЦЗЛ Ежков Н.Ф. Ежков

Испытания провели: Кердинский А.М. Кердинский.

Гусейнов Р.Р. Гусейнов.
Согласовано

Главный конструктор по ЭМ Мамыкин А.Ю. Мамыкин

Центральная заводская лаборатория
ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО»
2016г.

Объект испытаний: асинхронный электродвигатель АДМ132S4 У2 № 110,111

производства ОАО «Уралэлектро» г.Медногорск.

Цель испытания: типовые (изменения конфигурации листа ротора)

Место проведения испытаний: Центральная заводская лаборатория ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО»

Номинальные параметры:

Тип. эл. двигателя;	АДМ132S4 У2
Напряжение, В:	380
Ток, А:	15,8
Мощность, кВт:	7,5
КПД, %:	87,0
Cos φ:	0,83
Кл.из:	F
Режим работы:	S1
Степень защ:	IP54
Об/мин	1432

Программа испытаний

Испытания эл. двигателей проводились по программе ТУ 3325-003-05758017-2002 п.3 табл. 7

1 Внешний осмотр: п.п 1.1,1.2.4,,1.3.4,1.3.8,1.6; метод: 4.2

2. Проверка массы: п.п 1.2.4,4.20

3. Испытания по программе приёмочных испытаний по ГОСТ 31606

Методика испытаний

Определение основных энергетических и виброакустических параметров.

Определение тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания, начального пускового тока, кривой вращающего момента, начального пускового, минимального и максимального моментов проведены в соответствии с ГОСТ 7217, ГОСТ 11828.

Определение рабочих характеристик, коэффициента мощности, КПД, скольжения, а также испытания на нагревание проведены в соответствии с ГОСТ 25941, ГОСТ 7217, ГОСТ 11828.

Определение среднего значения уровня звука, максимального значения вибрации и степени защиты проведены в соответствии с ГОСТ 11929, ГОСТ 20815, ГОСТ 17494, ГОСТ Р МЭК 60034-14.

Перечень приборов и оборудования, используемых при испытаниях.

1. Источники питания: потенциал – регулятор МА 195 – 56 - 24

2. Стенды укомплектованы приборами класса точности 0,5:

- вольтметры типа Э59;
- ваттметры - Д539;
- амперметры – Э59;
- милливольтамперметры – М253;

3. Динамометр постоянного тока: тип MS 2218-4; весовое устройство: тип 27-0

4. Мегаомметр М4100 / 3 500в;

5. Виброметр С3203 с датчиком АП39

6. Алгоритм 05

7. Пробойная установка УПУ – 1М.

Результаты испытаний.

1. Внешний осмотр: по внешнему осмотру двигателя требованиям ТУ3325-003-05758017- 2002 соответствуют.
2. Проверка массы, Значение массы приведено в таблице электрических параметров
3. Испытания по программе приёмочных испытаний по ГОСТ 31606 приведены в таблице электрических параметров

Таблица
электрических параметров эл. двигателя АДМ132S4 У2
по результатам испытаний.

№п \п	Наименование параметров	Обозн ачен.	Ед. Изм.	Каталожные данные			Результаты испытаний	
				ном	низ	верх	№110	№111
1	Соединение фаз	Y		Y			Y	Y
2	Режим работы	S		S			S	S
3	Полезная мощность	P2	КВт	7,5			7,5	7,5
4	Напряжение	U	В	380			380	380
5	Ток статора	I	А	15,8		16,7	15,5	15,3
6	Частота	F	Гц	50			50	50
7	Скорость вращения	N	Об/мин	1432	1419	1446	1435,4	1437,5
8	Скольжение	S	%	4,5	3,6	5,4	4,3	4,2
9	Козф. полезн. действ.	КПД	%	87,0	85,05		87,0	87,5
10	Козффициент мощности	Cosφ		0,83	0,802		0,842	0,851
11	Мощность потребляемая	P1	КВт	8,7		8,9	8,615	8,571
12	Номинальный момент	M ном	КГ м	5,01		5,15	5,01	5,0
13	Кратн. Нач. пуск. Мом.	M пуск/ M ном		2,4	2,04		2,51	2,41
14	Кратн. Макс. Момент.	M макс/ M ном		2,6	2,34		2,8	2,7
15	Кратн. Мин. момента	M мин/ M ном		1,6	1,36		2,23	2,27
16	Кратн. Пускового тока	I пуск/ I ном		7,0		8,4	6,7	6,4
17	Ток холостого хода	I0	А			9,5	7,52	7,42
18	Потери холостого хода	P0	Вт			513	405	371,3
19	Ток короткого замыкания	Iк	А		9,2		18,8	19,2
20	Потери короткого замыкания	Pк	Вт		893		1400	1370
21	Макс. уровень вибрации		Мм/с			1,6	0,4	0,4
22	Средний уровень звука		db			66	62,7	63,1
23	Превыш темп обм статора	Q	С			90	88,0	86,5
24	Сопр обм стат при 20° С	R20	Ом	0,555	0,522	0,577	0,559	0,549
25	Сопр.изол обм. статора: ^{хол} /гор	Rиз	Мом	>10 / >3	10 / 3	∞	∞	∞
26	Потери в стали	Pст	Вт				224,3	189,9
27	Потери в обмотке статора	Pм1	Вт				410,4	408,3
28	Потери в обмотке ротора	Pм2	Вт				401,7	390,1
29	Потери механические	Pмех	Вт				35,0	40,0
30	Потери добавочные	Pдоб	Вт				43,7	43,3
31	Сумма потерь	Pобщ	Вт				1115,1	1071,6
32	Напряжение разворота	U	В	70		75	70	70
33	Масса	кг	кг	47,7		50,1	46,920	46,920
34	Сопротивление между заземляющим элементом и каждой металлической частью	R	Ом	≤ 0,1			-	-

35	Испытание межвитковой изол. на эл. прочность	U t	В мин	$1,3U_{\text{ном}}$			494 выдержал	494 выдержал
36	Эл.прочность изоляции относ. корпуса и между фаз	U t	В мин	$1000+2U_{\text{ном}}$			1760 выдержал	1760 выдержал
37	Испытание при повышенной частоте вращения	N t	Об/мин мин	$1,2 n_{\text{ном}}$			1718,0 выдержал	1718,0 выдержал
38	Испытание на кратковрем.перегр. по току	J t	А мин	$1,5I_{\text{ном}}$			23,7 выдержал	23,7 выдержал

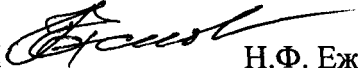
Заключение: электродвигатели АДМ132S4 У2 с доработанными роторами соответствуют требованиям ТУ3325-003-05758017- 2002.

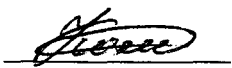
1

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО «Уралэлектро»
 В.И. Попов
2015г.

Протокол № 61-18-822
периодические испытания асинхронных
электродвигателей АДМ132S4 У2 № 713, 714
(по электрическим параметрам)
17.02.2015г..

листов 4

И.О. начальника ЦЗЛ  Н.Ф. Ежков

Испытания провёл:  А.М. Кердинский

Центральная заводская лаборатория
ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО»
2015г.

6х 56/13-28-116
19.02.15

Результаты испытаний.

1. Внешний осмотр:

По внешнему осмотру двигателя требованиям ТУ отвечают.

2. Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров

АДМ 132 S4 Y2

	Обоз. По ГОСТ 8592- 79	Размер по чертежу с учетом допуска	Фактический результат измерения мм		№ п/п	Обоз. По ГОСТ 8592- 79	Размер по чертежу с учетом допуска	Фактический результат измерения мм	
			№ 713	№ 714				№ 713	№ 714
	L 1	80 ±0,23	80,1	80,0	9.	b 16	16±0,43	16,2	16,1
2.	L 10	140±0,6	140,2	140,2	10.	d 1	38k6 ^{+0,018} _{+0,002}	38,006	38,005
3.	L 17	12,5±0,43	12,52	12,5	11.	d 30	252 max	252,0	252,0
4.	L 30	485max	483,0	483,0	12.	h	132 _{-0,5}	132,0	132,0
5.	L 31	89 ±2,0	88,0	89,0	13.	h 1	8 _{-0,09}	8,0	8,0
6.	b 1	10 h9 _{-0,036}	10,0	10,0	14.	h 5	41 ⁰ _{-0,29}	41,0	41,0
7.	b 10	216±0,6	216,1	216,1	15.	h 10	16±0,36	16,0	16,0
8.					16.	h 31	298,0max	298,0	298,0

	Наименование размеров	Размер по чертежу с учетом допуска	Фактический результат мм	
			№ 713	№ 714
1.	Не параллельность оси вращения вала	0,15/100	0,05	0,06
2.	Не плоскостность опорной поверхности лап	0,15	0,01	0,01
3.	Радиальное биение выступающего конца вала	0,05	0,02	0,02

Заключение: Габаритные, установочные и присоединительные размеры требованиям ТУ отвечают.

3. Проверка массы

Масса: требованиям ТУ отвечает. Значение массы приведено в таблице электрических параметров.

4. Испытания по программе приёмочных испытаний по электрическим параметрам ГОСТ

69

Таблица
электрических параметров эл. двигателей АДМ132S4 –Y2
по результатам испытаний.

№п/п	Наименование параметров	Обозначен.	Ед. Изм.	Каталожные данные			Результаты испытаний	
				Ном	низ	верх	№ 713	№ 714
	Соединение фаз	Y		Y			Y	Y
2	Режим работы	S		S1			S1	S1
3	Полезная мощность	P2	КВт	7,5			7,5	7,5
4	Напряжение	U	В	380			380	380

5	Ток статора	I	A	15,8		16,7	15,95	16,1
6	Частота	F	Гц	50			50,0	50,0
7	Скорость вращения	N	Об/мин	1432	1419	1446	1446,0	1443,3
8	Скольжение	S	%	4,5	3,6	5,4	3,6	3,78
9	Коэф полезн действ.	КПД	%	87,0	85,05		87,45	86,88
10	Коэффициент мощности	Cosφ		0,83	0,802		0,818	0,816
11	Мощность потребляемая	P1	Квт	8,7		8,9	8,5761	8,6325
12	Номинальный момент	M ном	Кг м	5,01		5,15	4,95	4,96
13	Кратн. Нач. пуск. Мом.	M пуск/ M ном		2,4	2,04		2,21	2,24
14	Кратн. Макс. Момент.	M макс/ M ном		2,6	2,34		3,0	2,96
15	Кратн. Мин. момента	M мин/ M ном		1,6	1,36		1,92	1,9,0
16	Кратн. Пускового тока	I пуск/ I ном		7,0		8,4	6,8	6,97
17	Ток холостого хода	I0	A			9,5	7,5	7,2
18	Потери холостого хода	P0	Вт			513,0	371,3	393,8
19	Ток короткого замыкан	Iк	A		9,2		19,42	18,83
20	Потери короткого замыкани	Pк	Вт		893,0		1850,0	1750,0
21	Макс. уровень вибрации		Мм/с			1,6	0,7	1,5
22	Средний уровень звука		db			66	61,2	63,0
23	Превыш темп обм статора	Q	C			90	82,0	84,0
24	Сопр обм стат при 20° C	R20	Ом	0,555	0,522	0,577	0,507	0,507
25	Сопр.изол обм. статора: хол / гор	Rиз	Мом	>10 / >3	10 / 3	∞	500	500
26	Потери в стали	Pст	Вт				230,125	248,992
27	Потери в обмотке статора	Pм1	Вт				471,202	481,675
28	Потери в обмотке ротора	Pм2	Вт				281,917	298,689
29	Потери механические	Pмех	Вт				50	60,0
30	Потери добавочные	Pдоб	Вт				42,881	43163
31	Сумма потерь	Pобщ	Вт				1076,124	1132,5
32	Напряжение разворота	U	B	70		75	75,0	75,0
33	Масса	кг	кг	47,7		50,1	46,56	46,56
34	Испытание межвитковой изол. на эл. прочность	U t	B мин	1,3U _{ном}			выдержал	выдержал
35	Эл.прочность изоляции относ. корпуса и между фаз	U t	B мин	1000+2U _{ном}			выдержал	выдержал
36	Испытание при повышенной частоте вращения	N t	Об/мин мин	1,2 n _{ном}			выдержал	выдержал
37	Испытание на кратковрем.перегр. по току	J t	A мин	1,5I _{ном}			выдержал	выдержал

Вывод: электродвигатели АДМ132S4 У2 требованиям ТУ3325-003-05758017-2002 по основным электрическим параметрам соответствуют.