

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ижевская государственная сельскохозяйственная академия»
(ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА)

На правах рукописи



Мартынов Кирилл Владимирович

МЕТОД СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕЩЁННЫХ
ОБМОТОК

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – к.т.н., доцент
Пантелеева Лариса Анатольевна

Ижевск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ГЛАВА 1 МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ | 10 |
| 1.1 Электроприводы с асинхронными двигателями сельскохозяйственных и промышленных установок | 10 |
| 1.2 Обзор методов совершенствования энергетических характеристик асинхронных двигателей | 17 |
| 1.3 Исследования машин переменного тока с совмещённой обмоткой статора | 24 |
| 1.4 Обзор существующих вариаций совмещённых обмоток | 36 |
| Выводы по главе | 45 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С 12-ЗОННОЙ ОБМОТКОЙ | 47 |
| 2.1 Разработка схем, упрощающих укладку укороченных совмещённых обмоток | 47 |
| 2.2 Исследование относительного содержания высших пространственных гармоник в магнитодвижущей силе 12-зонной совмещённой обмотки | 52 |
| 2.3 Гармонический анализ магнитодвижущей силы совмещённой обмотки . | 64 |
| 2.4 Разработка схемы совмещённой обмотки с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в магнитодвижущей силе | 68 |
| Выводы по главе | 78 |
| ГЛАВА 3. РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТАТОРЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКИ | 79 |
| 3.1 Разработка методики исследования изменения электрических потерь в статоре при изменении конструкции обмотки | 79 |
| 3.2 Оценка изменения электрических потерь в статоре при замене однослойной стандартной 6-зонной обмотки на совмещённую 12-зонную .. | 86 |

| | |
|---|------------|
| 3.3 Оценка изменения электрических потерь в статоре при замене двухслойной всыпной стандартной обмотки на совмещённую | 92 |
| Выводы по главе | 96 |
| ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ | |
| АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКОЙ | 98 |
| 4.1 Разработка методики перерасчёта обмотки статора со стандартной на совмещённую | 98 |
| 4.2 Описание оборудования, используемого в экспериментальных исследованиях | 110 |
| 4.2.1 Подготовка экспериментальных двигателей | 110 |
| 4.2.2 Описание лабораторной установки и измерительного оборудования ... | 114 |
| 4.3 Результаты экспериментального исследования асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой | 119 |
| 4.3.1 Обработка результатов исследований | 119 |
| 4.3.2 Опыт холостого хода | 120 |
| 4.3.3 Испытания двигателей под нагрузкой | 126 |
| 4.3.4 Опыт короткого замыкания | 133 |
| 4.3.5 Исследование распределения токов по фазам в двигателе с совмещённой обмоткой | 139 |
| 4.3.6 Исследование нагрева двигателей | 146 |
| Выводы по главе | 150 |
| ГЛАВА 5. РАСЧЁТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ | |
| ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКИ В АСИНХРОННОМ | |
| ДВИГАТЕЛЕ | 152 |
| 5.1 Применение асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой для турбомеханизмов | 152 |
| 5.2 Определение экономической эффективности применения совмещённой обмотки при ремонте электропривода вентилятор ВО 06-300-6,3 | 154 |
| Выводы по главе | 160 |

| | |
|--|-----|
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 161 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 164 |
| Приложение А – Пример расчёта обмоточных данных программой..... | 177 |
| Приложение Б – Патенты и свидетельства по теме исследования..... | 179 |
| Приложение В – Акт внедрения..... | 182 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Ежегодное наращивание производственных мощностей сопровождается увеличением потребления электроэнергии, а учитывая повсеместный рост тарифов на электроэнергию и повышение стоимости электрооборудования вопрос энергосбережения является весьма актуальным [9]. Энергосбережение не менее актуально и для сельского хозяйства. В зависимости от производства доля энергозатрат в себестоимости продукции может составлять от 30 до 40% с учётом кормопроизводства [33, 103, 104]. По данному показателю отечественная продукция значительно уступает соответствующей продукции западноевропейских стран [45, 105].

В качестве привода промышленных и сельскохозяйственных установок широкое распространение получили трёхфазные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. На их долю, по данным различных источников [71, 101], приходится от 60 до 80% всего электропотребления. В агропромышленном комплексе потребление электроэнергии АД также высоко, и составляет более 50% [111, 112].

Несмотря на высокую надёжность АД, нередки случаи их отказов. Так, для сельского хозяйства ежегодный выход электродвигателей из строя составляет 25–30% от всего имеющегося парка [107]. Наиболее распространённой причиной является повреждение обмотки статора, что составляет 85–95% всех случаев отказов [38, 107]. При этом АД выводится в капитальный ремонт с заменой обмотки, при котором существует риск ухудшения его энергетических характеристик и как следствие рост потребления электрической энергии установок с приводом от отремонтированных двигателей. Поэтому целесообразно применение способов и методов, способствующих улучшению энергетических характеристик электродвигателей, не только при их изготовлении, но и при ремонте.

Мероприятия, направленные на достижение данной цели, должны, по возможности, иметь низкую трудоёмкость, невысокую стоимость и доступность. Одним из таких возможных направлений повышения КПД и коэффициента мощности

двигателя является использование в нём совмещённой 12-зонной обмотки статора вместо стандартной 6-зонной.

Степень разработанности темы. Разработкой и исследованиями совмещённых обмоток за рубежом занимались такие учёные, как W. Kothals-Altes, H. Auinger, H. Kasten, M. Gwozdziwicz, S. Gawron, H. Vansompel, В.Д. Лущик, В.К. Титюк и другие. Среди российских и советских деятелей науки можно встретить исследования таких обмоток в работах: В.И. Попова, Ю.В. Гаинцева, Е.П. Бойко, В.Н. Андрианова, Д.Н. Быстрицкого и других. Несмотря на массу исследований, тема совмещённых обмоток по-прежнему остаётся недостаточно изученной.

Целью работы является совершенствование энергетических характеристик асинхронных двигателей за счёт применения совмещённых 12-зонных обмоток статора.

Для достижения цели работы поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих схем совмещённых обмоток и разработка схемы, которая обладает более высокой технологичностью конструкции;
2. Исследование МДС совмещённой обмотки и разработка схемы, имеющей большую эффективность и позволяющая снизить потери в двигателе, которые вызваны высшими гармониками;
3. Разработка методики определения изменения электрических потерь в статоре при применении в нём совмещённой обмотки вместо стандартной и проведение соответствующего исследования для серийных электродвигателей;
4. Разработка методики перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую;
5. Изготовление экспериментального образца двигателя с совмещённой обмоткой статора и исследование его характеристик;
6. Оценка экономической эффективности применения совмещённой обмотки в асинхронном электроприводе.

Объект исследования: асинхронный электродвигатель с совмещённой обмоткой.

Предмет исследования: энергетические характеристики асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой статора.

Научная новизна:

1. Разработана одно-двухслойная схема совмещённой обмотки, имеющая простую технологию изготовления;
2. Определено изменение содержания ВПГ в кривой распределения МДС двигателей с совмещённой обмоткой в сравнении со стандартной;
3. Разработана схема совмещённой обмотки с пониженным содержанием ВПГ;
4. Предложена методика определения изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую;
5. Разработана методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую.

Теоретическая значимость работы заключается в возможности анализа различных конструкций совмещённых обмоток и исследовании содержания ВПГ в МДС, создаваемой такой обмоткой. Теоретическая проработка вопросов, посвящённых исследованию асинхронного двигателя, расширяет область знания в теории электрических машин, используется в учебном процессе при подготовке бакалавров, инженеров и магистров по электротехническим специальностям.

Практическая значимость работы:

1. Предложена одно-двухслойная схема совмещённой обмотки, МДС которой имеет такой же гармонический состав, как и МДС двухслойной обмотки, но при этом обладающая более простой технологией изготовления (патент на ПМ RU 197319 U1);
2. Разработана двухслойная схема совмещённой обмотки с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в МДС (патент на изобретение RU 2735288 C1);
3. Разработана методика определения изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую, которая позволяет

оценить эффективность применения такой обмотки для конкретного двигателя по данному критерию;

4. Предложена методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую и разработана программа для ЭВМ (Свидетельство 2020663515).

Методология и методы исследования. При проведении исследований применялись методы теорий электрических цепей и машин переменного тока. Для оценки содержания ВПГ в кривой распределения МДС использовались диаграммы Гёргеса, а также гармонический анализ.

Обработка результатов и теоретические исследования проводились на ПК с использованием программ Microsoft Excel, Maple.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанные схемы совмещённой обмотки имеют более простую технологию укладки, чем аналогичные им известные совмещённые обмотки;

- методика, позволяющая определить изменения электрических потерь в статоре при замене его стандартной обмотки на совмещённую и повысить эффективность произведённой замены для АД по данному критерию;

- в МДС предложенной схемы совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами амплитуды ВПГ меньше, чем в МДС аналогичных стандартной и совмещённой укороченной обмотках;

- результаты экспериментальных исследований, подтверждают эффективность применение совмещённых обмоток вместо стандартных при ремонте АД, с целью повышения их энергетических показателей.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация выполнена по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Результаты исследования соответствуют паспорту специальности, а именно пункту 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пункту 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и пункту 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надёжность, контроль и диагностику функционирования

электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

Степень достоверности и апробация результатов. Работа проведена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА по теме «Повышение эффективности работы технологических установок в сельском хозяйстве Удмуртской Республики», рег. №11601151005.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием общепринятых методов исследований, а также повторяемостью полученных результатов.

Результаты и выводы диссертационной работы доложены и обсуждены на 11 научно-практических конференциях.

По результатам диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 из которых по специальности 05.09.01 и 1 статью, входящую в реферативную базу Scopus. Получены патенты на полезную модель, на изобретение и свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы из 112 наименований. Работа изложена на 182 страницах, включающих в себя 40 таблиц, 84 рисунка и 3 приложения.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1.1 Электроприводы с асинхронными двигателями сельскохозяйственных и промышленных установок

Электропривод сельскохозяйственных установок характеризуется широким разнообразием приводных машин, рассредоточенностью потребителей механической энергии, сезонностью работы, малым коэффициентом использования оборудования и мало мощностью сельских электрических станций и подстанций [69]. Так в агропромышленном комплексе электропривод применяется в поточных линиях приготовления и транспортировки кормов, переработке сельскохозяйственных продуктов, в отопительно-вентиляционном оборудовании, водоснабжении и т. д. [97]. В промышленности механизмы с электроприводом не менее разнообразны, а условия их работы сильно зависят от отрасли, где они применяются.

В данном разделе рассматриваются основные классификации электроприводов и распределение АД в промышленности и сельском хозяйстве.

Наиболее распространённой зависимостью, применяемой для классификации производственных механизмов (рабочих машин), является следующая формула [75, 109]:

$$M_c = M_0 + (M_{с.н.} - M_0) \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^x, \quad (1.1)$$

где M_c – момент сопротивления рабочей машины при частоте вращения n , Н·м;

M_0 – момент сопротивления рабочей машины, не зависящий от частоты вращения (например момент сопротивления трения), Н·м;

$M_{с.н.}$ – момент сопротивления машины при номинальной частоте вращения, Н·м;

n – частота вращения, об/мин;

n_n – номинальная частота вращения, об/мин;

x – коэффициент, который характеризует изменение момента сопротивления при изменении частоты вращения.

На рисунке 1.1 [75] приведены наиболее типичные механические характеристики, выражаемые формулой (1.1).

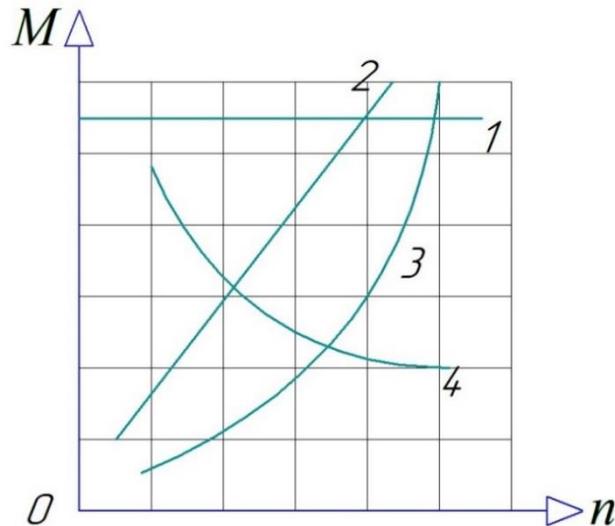


Рисунок 1.1 – Механические характеристики рабочих машин [75]

Исходя из анализа формулы (1.1) производственные и сельскохозяйственные механизмы ориентировочно разделяют на четыре основные группы:

1) $x=0$, характеристика 1 на рисунке 1.1. Момент сопротивления не зависит от частоты вращения, а мощность пропорциональна частоте вращения.

$$M_c = M_{с.н.} \quad (1.2)$$

Такой характеристикой обладают подъёмные машины, лебёдки, ленточные транспортёры, конвейеры с постоянной загрузкой, поршневые насосы и др.

2) $x=1$, характеристика 2 на рисунке 1.1. Момент сопротивления растёт линейно, а мощность пропорциональна квадрату частоты вращения.

$$M_c = M_0 + \frac{M_{с.н.} - M_0}{n_H} \cdot n. \quad (1.3)$$

Подобной характеристикой обладают зерноочистительные механизмы, вакуумные насосы для доильных установок и др.

3) $x>1$, характеристика 3 на рисунке 1.1. Момент сопротивления возрастает нелинейно с увеличением частоты вращения. Такого рода характеристику имеют вентиляторы, центробежные насосы, сепараторы, молотильные барабаны при

включении на холостом ходу. При $x=2$ такую характеристику называют вентиляторной.

4) $x < 0$, характеристика 4 на рисунке 1.1. Момент сопротивления нелинейно спадает с увеличением частоты вращения. К таким механизмам относят некоторые металлообрабатывающие станки, токарные станки, колосовой элеватор, зерновые нории и др.

Рассмотренные выше группы механических характеристик являются идеализированными. В действительности реальные характеристики имеют более сложный характер. Так в работе [97] зависимость момента сопротивления рабочей машины от частоты вращения представлена в виде ряда:

$$M_c = A \cdot n^{-1} + B + C \cdot n + D \cdot n^2 + \dots = f(n), \quad (1.4)$$

где A, B, C, D – коэффициенты, характеризующие ту или иную рабочую машину.

По формуле (1.4) авторами предлагается объединить сельскохозяйственные механизмы со схожими механическими характеристиками в пять групп. Их механические характеристики изображены на рисунке 1.2 [97].

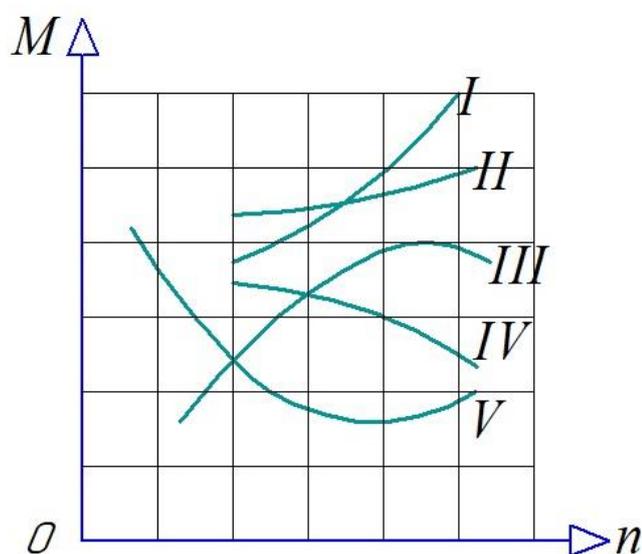


Рисунок 1.2 – Механические характеристики некоторых сельскохозяйственных механизмов [97]

К группе I, согласно [97], относятся зерноочистительные машины, мельницы, льноочистительные машины, насосы для орошения, корнерезки и молотилки хлебные.

Группа *II* включает в себя протравители, зерносушилки, льнообрабатывающие машины, овощетёрки, маслоизготовители, глиномялки и измельчители кормов.

Механической характеристикой группы *III* обладают молотилки кукурузные.

В группу *IV* входят сепараторы, очистители молока, жмыходробилки и соломосилосорезки.

Корнеклубнемойки относятся к группе *V*.

В работе [37] рассмотрена классификация сельскохозяйственных механизмов по нагрузочным диаграммам, примерный вид которых изображён на рисунке 1.3 [37].

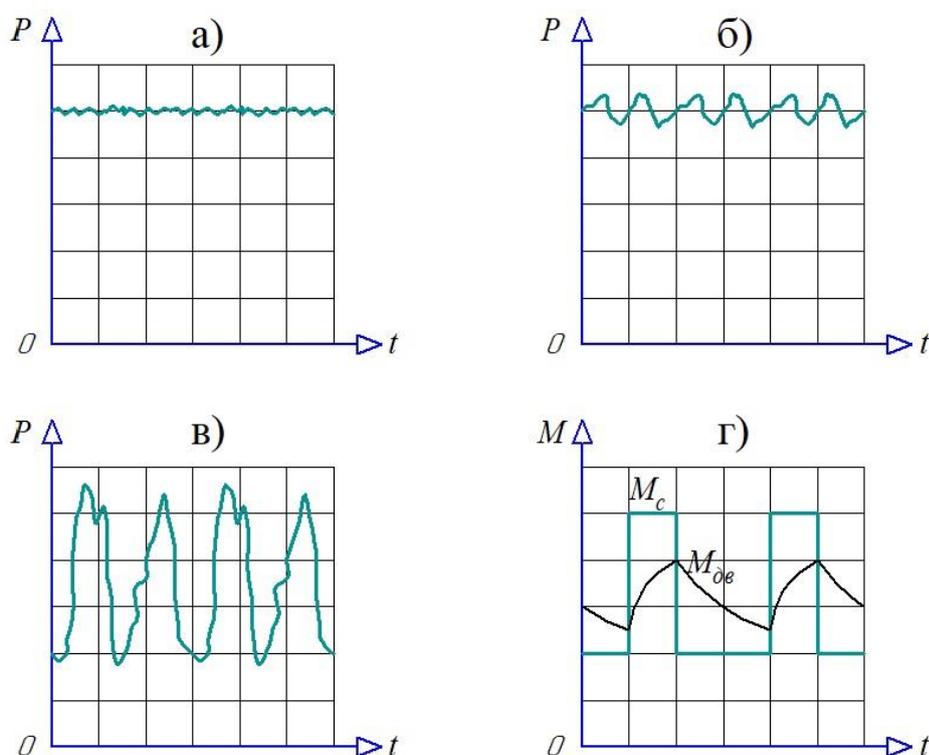


Рисунок 1.3 – Примерный графики изменения нагрузки на рабочих органах сельскохозяйственных машин: а) постоянная нагрузка; б) слабопеременная; в) резкопеременная; г) ударная [37]

Постоянной нагрузкой (рисунок 1.3 а) обладают центробежные насосы, центрифуги, транспортёры, подъёмные механизмы, мельницы. Слабопеременная нагрузка (рисунок 1.3 б) свойственна измельчителям сочных кормов и зернодробилкам. Для измельчителей грубых кормов и дробилок возможна резкопеременная

нагрузка (рисунок 1.3 в), а для сеносоомопрессов, поршневых насосов, компрессоров и пилорам – ударная (рисунок 1.3 г).

Классификация машин в зависимости от требований по реализации пусковых режимов приведена в таблице 1.1 [35].

Таблица 1.1 – Классификация машин в зависимости от момента трогания [37]

| Группа | Минимальная требуемая кратность пускового момента k_n | Механизм |
|--------|---|--|
| 1 | 0,3 | Вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, зернодробилки при пуске без нагрузки |
| 2 | 0,3-1,0 | Транспортёры, конвейеры, грузоподъёмные механизмы, молотильные агрегаты при пуске без нагрузки, смесители |
| 3 | >1,0 | Дробилки и измельчители грубых кормов при пуске под нагрузкой, пилорамы, поршневые компрессоры, прессы-грануляторы |

По среднегодовой наработке сельскохозяйственные установки можно разделить на четыре группы [99]:

Нарботка 500 ч. Подъемники, погрузчики, разгрузчики, навозоуборочные транспортеры, ковшовые транспортеры, шнековые насосы, соломосилосорезки, картофелечистки, пневмомолоты, точильные станки, кормораздаточные транспортеры.

Нарботка 1500 ч. Оборудование первичной обработки молока, мешалки, смесители, сепараторы, агрегаты витаминной муки, шнеки, триерные блоки, нории, вакуум-насосы, тестомялки, токарные, сверлильные, фуговальные станки, измельчители кормов, пресс-грануляторы.

Наработка 3000 ч. Компрессоры, вентиляторы, дымососы, пилорамы, дробилки, насосы, транспортеры, сушильные барабаны, зерноочистительные сушильные комплексы, яйцесортировочные и яйцемоечные машины.

Наработка 3000-8000 ч. Питатели, дозаторы, укладчики, штабелеры, насосы.

В таблице 1.2 [51] представлено распределение двигателей в сельском хозяйстве по нескольким критериям.

Таблица 1.2 – Распределение асинхронных двигателей в сельском хозяйстве [51]

| Критерий | Доля двигателей, % |
|-------------------------------|---------------------------|
| По мощности, кВт | |
| 0,25-0,75 | 10,2 |
| 0,75-3,0 | 18,6 |
| 3,0-11,0 | 12,0 |
| 11,0-18,5 | 10,4 |
| 18,5-30,0 | 7,4 |
| 30,0-55,0 | 1,9 |
| По частоте, об/мин | |
| 1500 | 30,4 |
| 1000 | 15,2 |
| 3000 | 6,3 |
| 750 | 2,2 |
| Многоскоростные | 3,4 |
| По механизмам | |
| Транспортёры, конвейеры | 17,2 |
| Вентиляторы | 16,8 |
| Дробилки | 10,0 |
| Смесители | 5,0 |
| Групповой привод | 2,8 |
| Зачистные, щёточные механизмы | 2,2 |

Продолжение таблицы 1.2

| | |
|-------------------------|-----|
| Машины барабанного типа | 1,8 |
| Шнеки, экструдеры | 1,7 |
| Насосы | 1,4 |
| Питатели, дозаторы | 1,2 |

Распределение асинхронных двигателей по виду механизма и мощности в промышленности изображено на рисунке 1.4 [71].

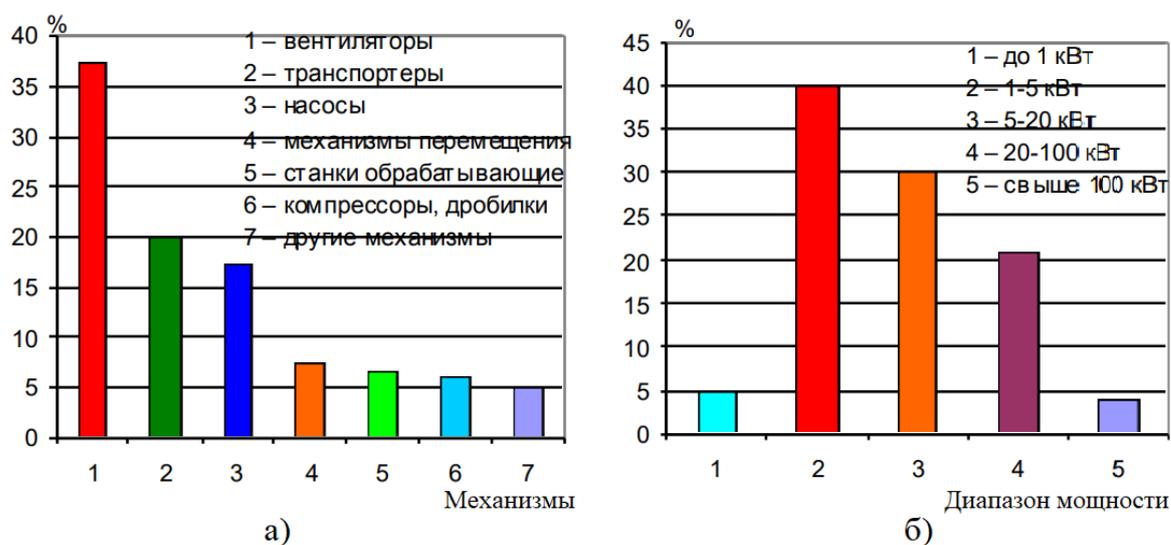


Рисунок 1.4 – Диаграммы распределения асинхронных двигателей: а) по виду промышленного механизма; б) по мощности [71]

Известно, что наилучшими энергетическими характеристиками обладают двигатели большой мощности. Однако, по данным распределения АД в сельском хозяйстве (таблица 1.2) и промышленности (рисунок 1.4) видно, что наибольшее применение получили двигатели небольшой и средней мощности от 0,75 до 20 кВт. По этой причине задача совершенствования их энергетических характеристик является актуальной.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что условия работы электроприводов сельскохозяйственных и промышленных механизмов очень разнообразны, а значит технология совершенствования энергетических характеристик электродвигателя должна быть достаточно универсальной.

1.2 Обзор методов совершенствования энергетических характеристик асинхронных двигателей

В данном разделе рассматриваются методы повышения КПД и коэффициента мощности АД за счёт изменения его конструкции.

Для анализа возможных путей совершенствования энергетических характеристик АД его устройство можно разбить на следующие составные части:

1. Сердечники статора и ротора;
2. Обмотка статора;
3. Обмотка ротора;
4. Вспомогательные элементы (подшипники, система охлаждения).

Сердечник статора и ротора выполняются из отдельных изолированных листов электротехнической стали, чаще всего изотропной, в машинах большой мощности может использоваться анизотропная сталь [11, 18]. Электротехническая сталь по своим магнитным свойствам является ферромагнетиком. Её основная функция заключается в том, чтобы уменьшить необходимую магнитодвижущую силу (МДС), для возбуждения в двигателе требуемого магнитного потока. Так ухудшение способности стали намагничиваться приводит к повышению тока холостого хода, и как следствию возрастанию потерь в двигателе.

Второй особенностью электротехнической стали, которое отличает её от магнитотвёрдых материалов, являются малые магнитные потери: потери на гистерезис, потери от вихревых токов, дополнительные потери [36]. Магнитные потери возникают в результате воздействия переменного магнитного потока и, в первую очередь, они проявляются в сердечнике статора, так как для ротора в процессе установившегося режима работы двигателя магнитное поле вращается с меньшей частотой, чем для статора. Для борьбы с вихревыми токами, как уже было упомянуто ранее, сердечники машины выполняют из отдельных изолированных друг от друга листов. Нарушение между листами изоляции или наличие заусенцев приводит к возрастанию потерь от вихревых токов. Потери на гистерезис зависят от свойств материала, которые в процессе эксплуатации, либо ремонта могут ухудшаться.

Известно, что повышение температуры ферромагнитного материала в течение длительного времени способствует его структурным изменениям, называемыми процессами старения. В период эксплуатации сердечники двигателя нагреваются вследствие магнитных потерь, а также за счёт теплопередачи от других элементов двигателя (например обмоток) [36]. При ремонте нагрев машины может происходить во время операции обжига, которая иногда выполняется для облегчения удаления старой обмотки [73], а также во время сушки двигателя. Старение ферромагнетика приводит как к возрастанию тока, так и потерь холостого хода.

Кроме того, стоит отметить, что магнитные свойства электротехнической стали чувствительны не только к температуре, но и к чрезмерным механическим напряжениям [20, 36].

В работе [72, 73] авторы предлагают перед ремонтом проводить оценку состояния электротехнической стали статора машины. Для этого необходимо собрать испытательный стенд, электрическая схема которого изображена на рисунке 1.4 [73].

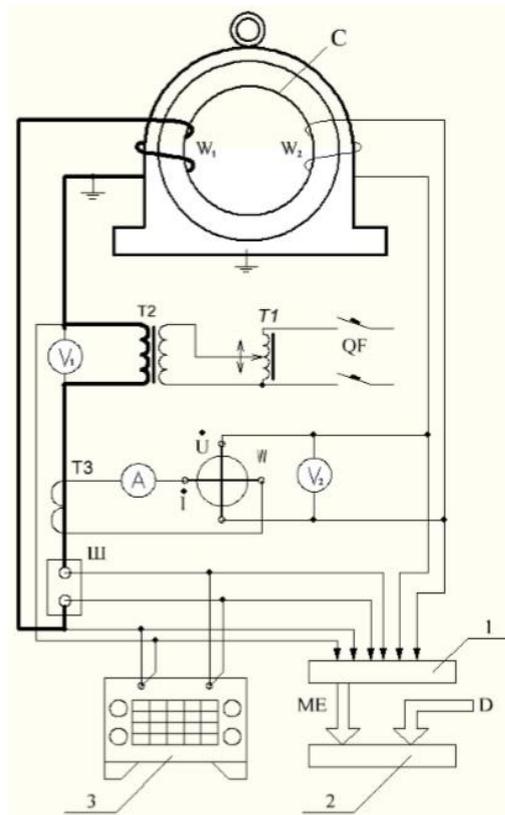


Рисунок 1.5 – Электрическая схема испытания сердечника статора [73]

Схема изображённая на рисунке 1.5 включает в себя [73]: С – испытываемый статор; W_1 – намагничивающая обмотка; W_2 – измерительная обмотка; QF – автоматический выключатель; Т1 – автотрансформатор; Т2 – трансформатор намагничивающий; V_1, V_2 – вольтметры; А – амперметр; W – ваттметр; Т3 – трансформатор тока измерительный; Ш – шунт измерительный; D – данные электромагнитной системы АД; ME – измеренные электрические сигналы; 1 – аналого-цифровой преобразователь; 2 – ноутбук; 3 – осциллограф.

Параметры обмоток рассчитывают заранее в зависимости от ремонтируемого двигателя. Показателями качества сердечника в исследовании, являются величина напряжения намагничивающей обмотки U_1 и угол сдвига фаз между напряжением и током φ_{Σ} , которые сравниваются с эталонным напряжением $U_{1ЭТ}$ и минимальный угол сдвига между напряжением и током φ_{\min} . В зависимости от этого предлагаются три варианта:

1. Если $U_1 \leq 0,7 \cdot U_{1ЭТ}$, то сердечник непригоден для дальнейшего ремонта или модернизации, независимо от значения или величины угла φ_{Σ} .

2. Если $U_1 \geq U_{1ЭТ}$, $\varphi_{\Sigma} \geq \varphi_{\min}$, то сердечник статора считается исправным и пригодным для ремонта АД по прежним обмоточным данным без снижения его мощности.

3. Если $U_{1ЭТ} > U_1 > 0,7 \cdot U_{1ЭТ}$, $\varphi_{\Sigma} \geq \varphi_{\min}$, то сердечник статора пригоден для ремонта и модернизации с уменьшением номинальной мощности АД по пересчитанным обмоточным данным.

В третьем случае предлагается увеличить число витков в фазе, на величину, которая определяется в зависимости от результатов исследования. Увеличение числа витков позволит уменьшить ток и потери холостого хода, за счёт уменьшения величины магнитного потока. Однако при этом снижается максимальный момент двигателя, увеличивается скольжение и при больших нагрузках может снижаться КПД (за счёт возросших потерь в роторе).

Недостатком данного метода является усложнение технологии ремонта и необходимость в дополнительном оборудовании для исследований, что усложняет его реализацию на небольших ремонтных предприятиях.

Одним из способов совершенствования магнитной цепи двигателя является заполнение воздушных промежутков ферромагнитным материалом. Так, например при наличии открытых пазов на статоре можно использовать магнитные клинья, которые могут способствовать уменьшению тока холостого хода двигателя. Однако, на практике такие клинья оказались несовершенны в связи с их частыми повреждениями [110], кроме того, их применение может приводить к увеличению нежелательных магнитных потоков рассеяния [12].

Несмотря на это попытки реализовать идею магнитного клина продолжают по сей день, известно более 300 патентов и авторских свидетельств. Макаров Ф.К. в своей работе [56] выделяет 3 наиболее характерных вида магнитных клиньев:

1. Стальные клинья, набранные из изолированных пластин ($10^2 \leq \mu \leq 10^4$);
2. Клинья на основе электроизоляционных материалов, содержащие массивные ферромагнитные составляющие;
3. Клинья, полученные прессованием или литьём магнитодиэлектриков, которые представляют из себя какую-либо вязущую основу с наполнителем в виде ферромагнитного порошка (магнитная проницаемая таких клиньев $\mu=3-10$).

Наибольший интерес вызывает последний вариант исполнения клиньев. Ранее проведённые исследования [43] показывают их эффективность. Небольшие значения магнитной проницаемой позволяют сохранить необходимый пусковой момент, а также электромагнитные силы, действующие на магнитный клин не столь велики по сравнению с клиньями с большей магнитной проводимостью.

Интересным является способ повышения коэффициента мощности за счёт использования диэлектриков с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости для покрытия листов сердечников [108]. Это позволяет повысить ёмкость АД, тем самым частично или полностью компенсируя потребляемую им реактивную мощность.

Некоторыми методами снижения потерь за счёт совершенствования обмотки ротора АД являются:

1. Использование медных стержней в короткозамкнутом роторе вместо алюминиевых [5]. Из-за меньшего сопротивления получившейся обмотки происходит

снижение электрических потерь в роторе, также изменяется скольжение двигателя при одинаковом моменте на валу [19].

2. Для роторов обладающих скосом пазов может применяться изолирование его обмотки от сердечника, что приводит к снижению добавочных потерь [12].

Рассмотренные выше способы целесообразны в некоторых случаях при изготовлении новых двигателей, но не при его ремонте. Ремонт и изготовление новой обмотки короткозамкнутого ротора является сложной задачей, кроме того, отказ двигателей по причине её повреждения встречается редко.

Наиболее частой причиной выхода АД из строя является повреждение обмотки статора (85–95% от общего числа отказов) [39, 107], которую в случае ремонта приходится полностью заменять. От того, как проведён расчёт и выбор конструкции обмотки статора будут зависеть энергетические характеристики двигателя.

В работах [72, 84] авторами рассматривается способ повышения коэффициента мощности за счёт замены одной трёхфазной обмотки статора на две трёхфазные обмотки с сохранением прежнего объёма активных материалов (массы меди и магнитной системы). Одна обмотка является рабочей и включается на трёхфазный источник питания. Вторая обмотка – компенсационная. К ней подключается трёхфазный конденсатор, соединённой по схеме «звезда», либо «треугольник». Для достижения коэффициента мощности равного единице параметры обмоток и конденсаторов подбираются с учётом состояния магнитной системы двигателя.

При модернизации такого двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности авторами отмечается необходимость введения новых технологических операций, в частности: инструментальный контроль реального состояния магнитопровода статора; новый электромагнитный расчет двигателя с учетом имеющихся геометрических размеров и состояния магнитопровода, при условиях повышения коэффициента мощности до единицы и сохранении или повышении КПД. До изготовления обмоток предлагается осуществлять моделирование ожидаемых рабочих, механических и энергетических характеристик получаемого двигателя.

Такой двигатель имеет меньшее потребление реактивной мощности, а следовательно, и меньший ток. В результате снижаются потери в обмотке статора двигателя и в системе электроснабжения (питающих линиях, трансформаторе). В своих работах [72] автор показывает эффективность применения двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Однако стоит отметить недостатки такой модернизации, которые могут ограничить её применение при ремонте электродвигателей – это значительное усложнение технологии ремонта, необходимость во вспомогательном оборудовании (конденсаторы) и сильная зависимость экономического эффекта от системы электроснабжения.

Для улучшения энергетических характеристик АД, перспективным направлением является применение совмещённой обмотки статора. Такая совмещённая обмотка состоит из двух трёхфазных обмоток, одна из которой соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник» (рисунок 1.6).

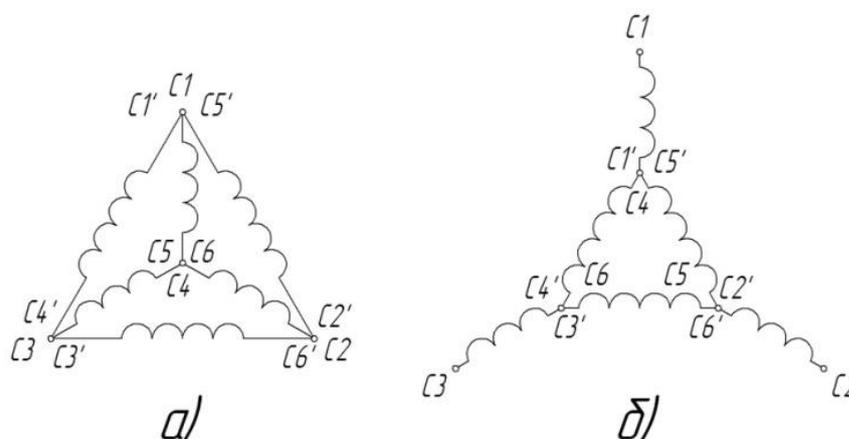


Рисунок 1.6 – Совмещённая обмотка статора, содержащая две трёхфазные обмотки соединённых: а) параллельно; б) последовательно

В результате увеличивается число фазных зон, так как фазные зоны «треугольника» смещены на 30 электрических градусов от соответствующих фазных зон «звезды», и ток, протекающий по фазам «треугольника» также смещён на 30 электрических градусов относительно тока в «звезде». Такая совмещённая обмотка будет 12-зонной, тогда как стандартная обмотка является 6-зонной. Электромагнитные свойства таких трёхфазных совмещённых обмоток приближаются к

свойствам шестифазных обмоток при пониженном дифференциальном рассеянии [92], что предполагает меньшее относительное содержание высших пространственных гармоник (ВПГ) в кривой распределения магнитодвижущей силы (МДС) обмотки.

Известно, что высшие гармоники оказывают негативное влияние на работу двигателя: вызывают шум и вибрации, создают добавочные (тормозящие) моменты, дифференциальное рассеяние и добавочные потери. Добавочные потери по различным данным могут составлять от 0,4 до 6% от потребляемой машиной мощности [12, 22, 23]. По этой причине снижение содержания высших гармоник в МДС обмотки может способствовать улучшению энергетических характеристик двигателя.

При проектировании совмещённой 12-зонной обмотки необходимо добиться того, чтобы при протекании по ней токов, в воздушном зазоре распределение магнитной индукции было близко по форме к синусоиде. Для этого число витков в фазах «звезды» и «треугольника» подбирают таким образом, чтобы амплитуды магнитодвижущих сил всех пазов двигателя были равны между собой. При равном распределении по пазам фаз «звезды» и «треугольника» данное условие будет соблюдаться при выполнении следующего соотношения чисел витков:

$$\frac{w_{\Delta}}{w_Y} = \sqrt{3}, \quad (1.5)$$

где w_{Δ} и w_Y – число витков фазы «треугольника» и «звезды» соответственно.

При этом соотношение суммарных сечений обмоток должно быть обратным:

$$\frac{s_Y}{s_{\Delta}} = \sqrt{3}, \quad (1.6)$$

где s_Y и s_{Δ} – сечение одного эффективного проводника фазы «звезды» и «треугольника» соответственно.

Выражение (1.5) вытекает из того, что к фазам «треугольника» подводится напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше, чем к фазам «звезды». И действительно, если бы их число витков было бы равное, то есть обмотки имели бы равное сопротивление, то по фазам «треугольника» протекал бы больший ток, что привело бы к

неравномерной загрузке обмоток и изменению формы распределения МДС и магнитной индукции в воздушном зазоре машины.

Применение совмещённой обмотки вместо стандартной не требует дополнительного оборудования, а технология её изготовления относительно не сложна. Это позволяет с минимальным увеличением затрат использовать их как при ремонте, так и при изготовлении АД, практических любых мощностей.

1.3 Исследования машин переменного тока с совмещённой обмоткой статора

Совмещённые обмотки представляют не малый интерес среди отечественных и зарубежных исследователей. Упоминания о машинах переменного тока с такой обмоткой на статоре встречаются в работах [1-5, 12, 53-55, 76, 83, 85, 92, 95, 102, 106]. Однако, область их применения может быть различной.

Maciej Gwozdziwicz и Stanisław Gawron в своём исследовании [4] описывают результаты применения совмещённой 12-зонной обмотки для синхронной машины с постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора. В данной работе машину изучали с помощью моделирования в программе Maxwell ver 14. Модель машины PMGg180L-8B была рассмотрена в качестве генератора (номинальной мощностью генератора $S_n = 15$ кВА, номинальным напряжением $U_n = 440$ В) и в качестве двигателя (номинальная мощность двигателя $P_n = 15$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 500$ В). Для обеих машин номинальная частота вращения $n_n = 750$ об/мин. Для возбуждения были выбраны неодимовые магниты N33SH с остаточной магнитной индукцией $B_r = 1,15$ Тл и коэрцитивной силой по намагниченности $H_{cb} = 836$ кА/м. Эффект от применения совмещённой обмотки для данной синхронной машины определялся в сравнение со стандартной обмоткой, фазы которой соединены по схеме «звезда» с числом витков в каждой катушке равным 15. Совмещённая обмотка имеет последовательное соединение фаз «звезды» и «треугольника» с одинаковым числом витков в каждой катушке равным 27. На рисунке 1.7 [4] изображены обе обмотки статора.

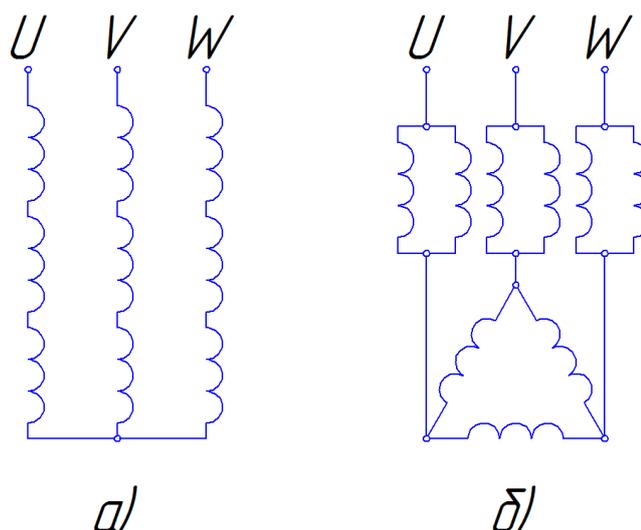


Рисунок 1.7 – Схемы обмоток статора синхронной машины из исследования [4]:

а) стандартная обмотка; б) совмещённая обмотка

В режиме работы генератора оценивался гармонический состав ЭДС без нагрузки и с активной нагрузкой, получены зависимости напряжения и КПД от мощности на выходе с генератора. Для режима двигателя исследован гармонический состав токов, получены зависимости потребляемого тока и КПД от мощности на валу двигателя. По результатам моделирования для синхронной машины с постоянными магнитами на поверхности ротора были сделаны следующие выводы: как и в случае двигателя, так и в случае генератора при применении совмещённой 12-зонной обмотки высшие гармоники были снижены, однако вместе с этим был снижен и КПД. Снижение КПД объясняется в работе действием третьих гармоник в замкнутом контуре треугольника.

По данному исследованию стоит отметить, что в рассматриваемом варианте совмещённой обмотки соотношение чисел витков (формула 1.5) соблюдалось не полностью, кроме того, не известно, учитывалось ли изменение активного сопротивления обмоток. Также не мало важным является факт, что синхронные машины обладают относительно большим воздушным зазором, а это снижает влияние высших гармоник на их характеристики [19]. Поэтому в синхронных машинах фактор уменьшения содержания ВПГ предположительно оказывает меньшее влияние на их характеристики, чем в асинхронных.

Ещё одно исследование использование совмещённой обмотки для синхронных машин с постоянными магнитами было проведено авторами Hendrik Vansompel, Peter Sergeant, Luc Dupre и Alex Van den Bossche [1]. Исследование проводилось для синхронной машины с осевым магнитным потоком, значение номинальной мощности которой составляет 4 кВт, а частота вращения 2500 об/мин. В работе используя метод конечных элементов и непосредственные измерения на прототипе машины. Обмотка, также, как и в предыдущем случае представляет собой последовательное соединение звезды и треугольника (рисунок 1.8 [1]). В таблице 1.3 [1] приведены сравнительные данные, полученные в ходе исследования.

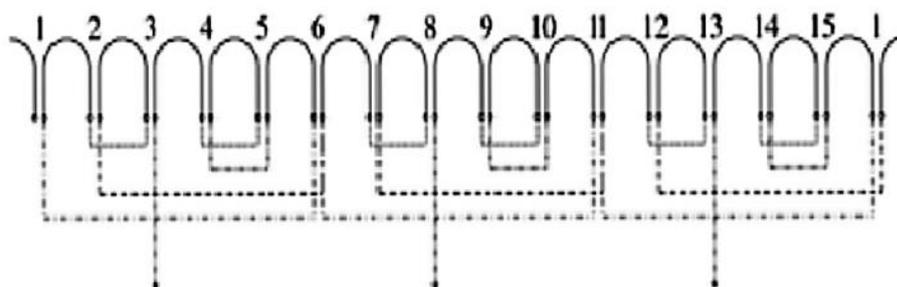


Рисунок 1.8 – Схема совмещённой обмотки для синхронной машины с осевым магнитным потоком [1]

Таблица 1.3 – Данные исследования синхронной машины [1]

| | «звезда» | «звезда-треугольник» | Результат, % |
|---|----------|----------------------|-------------------|
| Потери в меди без нагрузки, Вт | - | 1,1 | появились |
| Потери в железе без нагрузки, Вт | 42,8 | 40,4 | снизились на 5,6 |
| Потери в меди при полной нагрузке, Вт | 66,7 | 65,3 | снизились на 2,1 |
| Потери в железе при полной нагрузке, Вт | 48,9 | 47,1 | снизились на 3,7 |
| Крутящий момент, Н·м | 15,9 | 16,5 | повысился на 3,8 |
| Мощность на выходе, Вт | 4167 | 4307 | повысилась на 3,4 |
| Удельная мощность, кВт/кг | 0,49 | 0,51 | повысилась на 4,1 |
| КПД, % | 97,3 | 97,5 | повысился на 0,2 |

В данном исследовании в отличие от предыдущего синхронная машина с совмещённой обмоткой обладает большим КПД, чем со стандартной, хотя эта разница и составила всего 0,2%. Также стоит отметить, что в машине с совмещённой обмоткой появились потери в обмотке (меди) без нагрузки. Причиной тому, по всей видимости, является появление токов в замкнутом контуре фаз, соединённых по схеме «треугольник».

В исследовании [3] авторы Mihail V. Cistelecan, Fernando J. T. E. Ferreira и Mihail Popescu рассматривают возможность применения совмещённой обмотки с последовательным соединением для регулирования работы АД за счёт изменения величины магнитного потока в воздушном зазоре.

Известен способ запуска двигателя с переключением со «звезды» на «треугольник» (для нормального режима по схеме «треугольник»). Однако, данный способ может быть использован не только для уменьшения пусковых токов, но и для регулирования работы двигателя, а также улучшения его энергетических характеристик при работе с низкой нагрузкой [19, 97].

В работе [3] авторы рассматривают также и промежуточные значения между «звездой» и «треугольником», полученные с помощью различных вариантов соединения совмещённой обмотки. Предполагается, что в зависимости от отношения параллельно соединённых проводников в фазах «звезды» и «треугольника» возможно получить различные углы смещения магнитных осей обмоток в диапазоне $[-\pi/6, +\pi/3]$ (рисунок 1.9 [3]).

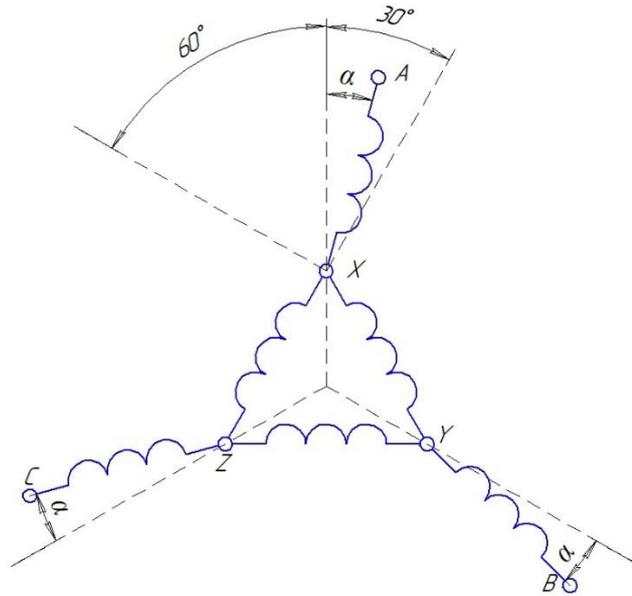


Рисунок 1.9 – Возможные варианты углов смещения магнитных осей обмоток [3]

Наиболее репрезентативными по мнению авторов являются три угла:

1. $\alpha=0$ является случаем, представленным в патенте Korthals [7] и в работе [2];
2. $\alpha=-\pi/6$ в случае, когда магнитные оси «звезды» и «треугольника» совпадают;
3. $\alpha=\pi/3$ получается из случая 1 путём обращения соединения «треугольника».

Исследование проводилось на $2p=4$ полюсном асинхронном двигателе с $z=36$ пазами, имеющим на статоре трёхфазную обмотку (рисунок 1.10 [3]), одна фаза которой разделена на три секции по две катушки, состоящих из 47 витков.

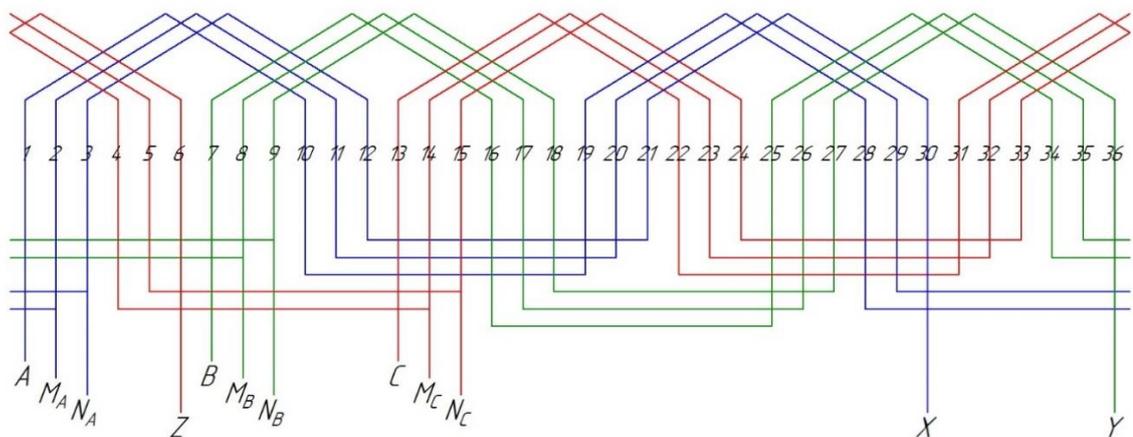


Рисунок 1.10 – Схема обмотки статора испытываемого $2p=4$ полюсного асинхронного двигателя с 36 пазами [3]

Для данного двигателя рассмотрены шесть режимов, полученных различным соединением концов секций и имеющих отличные друг от друга значения эквивалентного обмоточного коэффициента $k_{об.экв}$ (таблица 1.4 [3]). Данный коэффициент определяет амплитуду результирующего магнитного поля в воздушном зазоре.

Таблица 1.4 – Возможные варианты соединения обмоток и результаты расчётов [3]

| Соединение концов обмоток | Схема соединения | Теоретические значения | | | Экспериментальные значения | | |
|--|------------------|------------------------|--------------|----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | | $k_{об.экв}$ | k_{δ} | k_{δ}^2 | k_{δ} по напряжению | k_{δ}^2 по току | k_{δ}^2 по потерям в стали |
| X-C; Y-A; Z-B | Δ | 0,9598 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| X-M _B ; Y-M _C ; Z-M _A | $\Delta Y-I$ | 1,0693 | 0,8976 | 0,8057 | 0,8965 | 0,797 | 0,893 |
| X-M _C ; Y-M _A ; Z-M _B | $\Delta Y-II$ | 1,2339 | 0,7778 | 0,6050 | 0,7931 | 0,637 | 0,608 |
| X-N _B ; Y-N _C ; Z-N _A | $Y\Delta-I$ | 1,3354 | 0,7187 | 0,5165 | 0,6965 | 0,542 | 0,529 |
| X-N _C ; Y-N _A ; Z-N _B | $Y\Delta-II$ | 1,4705 | 0,6527 | 0,4260 | 0,6483 | 0,437 | 0,417 |
| X-Y-Z | Y | 1,6624 | 0,5773 | 0,3333 | 0,5793 | 0,322 | 0,333 |

Для сравнительной оценки изменения магнитного потока при переходе от схемы «треугольник» к другой схеме введён коэффициент k_{δ} , определяющийся по формуле:

$$k_{\delta} = \frac{k_{об.экв\Delta}}{k_{об.экв}}, \quad (1.7)$$

где $k_{об.экв\Delta}$ – эквивалентный обмоточный коэффициент при соединении обмотки по схеме «треугольник».

Теоретические значения сравнивались с экспериментальными, в которых k_{δ} определялся по наведённому напряжению в измерительной обмотке, уложенной в статоре, а значение k_{δ}^2 по величине тока холостого хода и потерям в стали. Теоретические результаты, как и отмечают сами авторы работы, хорошо согласуются с данными эксперимента.

Для исследуемого двигателя в различных схемах включения были получены зависимости КПД, коэффициента мощности, линейного тока и установившейся температуры обмотки статора от загрузки двигателя, зависимость момента от скольжения, а также зависимости линейного тока от напряжения в режиме холостого хода и короткого замыкания.

Как показывает данное исследование для повышения КПД при работе исследуемого двигателя с низкой нагрузкой, наиболее предпочтительными являются четыре режима: схема Y при нагрузке до 35% от номинальной, Y Δ -II от 35% до 40%, Δ Y-II от 40% до 67,5%, Δ при нагрузке выше 67,5%. Однако другие режимы могут быть то же полезны для регулирования работы двигателя.

Стоит отметить, что данное исследование не единственное, где применение совмещённой обмотки рассматривается для изменения магнитного потока в воздушном зазоре двигателя с целью регулирования его работы и улучшения энергетических характеристик при работе с низкими нагрузками. В книге Андрианова В.Н., Быстрицкого Д.Н. и др. [97] упоминается возможность применения последовательного соединения «звезды» и «треугольника» для уменьшения магнитного потока. В работе рассматривается пять вариантов схем соединения обмотки статора, где номинальной является схема «треугольник» с параллельными ветвями. На рисунке 1.11 [97] изображены схемы соединения обмотки статора.

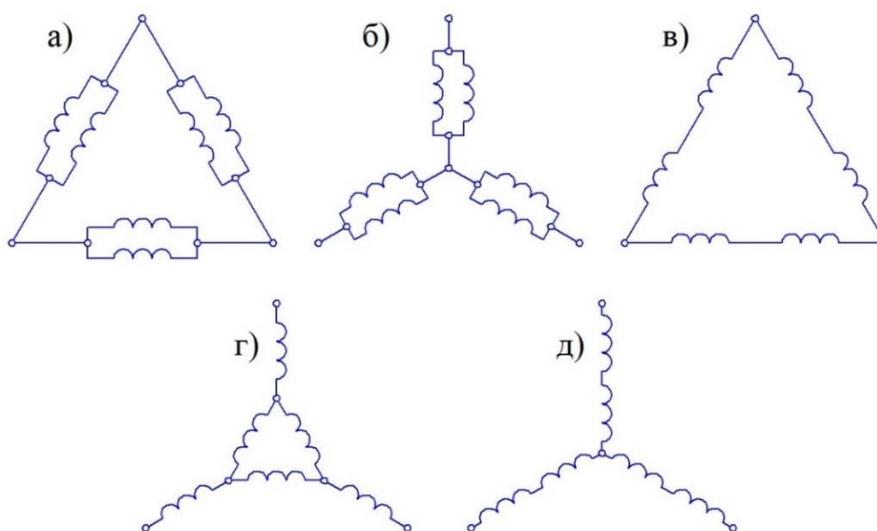


Рисунок 1.11 – Схемы соединения обмотки статора: а) треугольник с параллельным соединением; б) звезда с параллельным соединением; в) треугольник с последовательным соединением; г) звезда-треугольник; д) звезда с последовательным соединением [97]

Теоретически магнитный поток уменьшается при переключении с одной схемы на другую прямо пропорционально уменьшению напряжения, приложенного к фазе обмотке. Так при переключении со схемы 1.11 а на схему 1.11 б напряжение и магнитный поток уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз, на схему 1.11 в в 2 раза, на схему 1.11 г в $1 + \sqrt{3}$ раз и на схеме 1.11 д в $2 \cdot \sqrt{3}$ раз. Авторами приводятся зависимости относительного КПД от относительной загрузки двигателя для четырёх ступеней регулирования, где номинальной является схема 1.11 б. Схема 1.11 г, которая по своей конструкции напоминает совмещённую обмотку, имеет наибольший КПД по сравнению с другими схемами в диапазоне нагрузок 25–40 % от номинальной.

В рассмотренных выше работах в совмещённых обмотках все катушки имеют равное число витков и выполнены обмоточным проводом одного диаметра, что удобно при изготовлении, но не обеспечивает полного равенства амплитуды МДС всех пазов.

Совмещённая 12-зонная обмотка упоминается в книге Бойко Е.П. [12]. В ней автор выделяет преимущество применения такой обмотки – подавление высших гармоник и недостаток – усложнение производства двигателя.

Интерес совмещённая 12-зонная обмотка представляет и для исследователей из Украины. В их работах такую обмотку, часто называют шестифазной, однако известны шестифазные обмотки, которые питаются от шестифазной сети [40], в то время как совмещённая обмотка работает от трёхфазной сети, поэтому такое её название может привести к путанице.

В статье [55] сравниваются два варианта подсоединения фаз «треугольника» к фазам «звезды» совмещённой 12-зонной обмотки с параллельным соединением. На рисунке 1.12 изображены схемы подключения обмоток и получающиеся при этом векторные диаграммы токов.

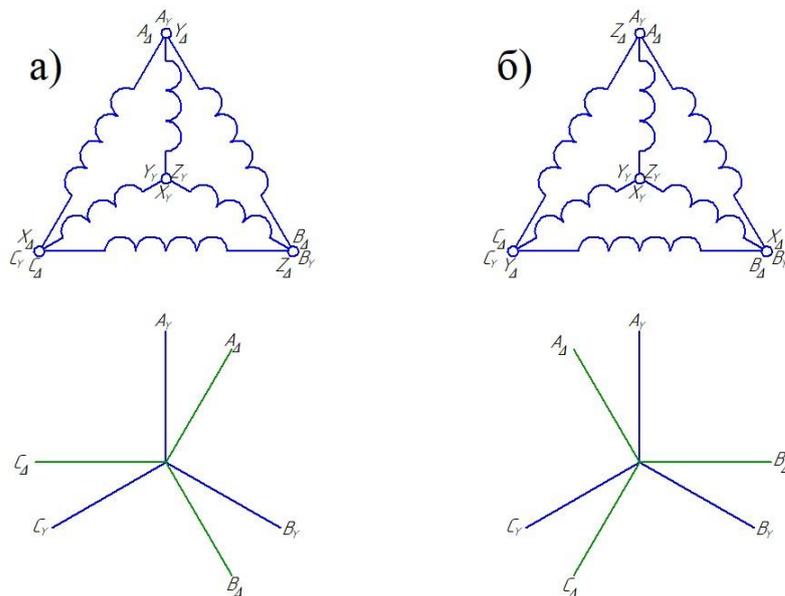


Рисунок 1.12 – Варианты соединения фаз «треугольника» с фазами «звезды» и их векторные диаграммы токов: а) при совпадении сдвига токов с пространственным сдвигом обмотки; б) при несовпадении сдвигов

На рисунке 1.12 а фазные токи в обмотке, соединённой «треугольником», сдвинуты по фазе в ту же сторону, в которую сдвинута обмотка «треугольника» в пространстве. Для варианта 1.12 б эти сдвиги противоположны. В работе показано, что наиболее предпочтительным является вариант соединения, представленный на рисунке 1.12 а.

В работе [54] авторами доказана возможность осуществить реверс АД с совмещённой обмоткой простым способом, как и для двигателя со стандартной

обмоткой, а именно изменением порядка чередования фаз источника питания, либо изменением подключения двух фаз.

В работе [53] авторами приводятся экспериментальные данные четырёх и двенадцати полюсных двигателей с совмещёнными обмотками в сравнении с серийными двигателями (таблица 1.5 [53]).

Таблица 1.5 – Экспериментальные данные [53]

| Двигатель | 2р | P_2 , кВт | M_n , Нм | l_δ , мм | B_δ , Тл | M_n , Нм |
|-----------|----|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|-------------------------|
| Базовый | 12 | 85 | 1667 | 445 | 0,86 | 3100 |
| | 4 | 250 | 1604 | 445 | 0,8 | 3171 |
| Новый | 12 | 100 | 1965 | 530 | 0,88 | 4520 |
| | 4 | 300 | 1929 | 530 | 0,7 | 2959 |
| Двигатель | 2р | $K_n = M_n/M_n$ | $M_{кр}$, Нм | $K_m = M_{кр}/M_n$ | $M_{мин}$, Нм | $K_{мин} = M_{мин}/M_n$ |
| Базовый | 12 | 1,86 | 1495 | 0,90 | 1060 | 0,64 |
| | 4 | 1,98 | 3154 | 1,97 | 1700 | 1,06 |
| Новый | 12 | 2,30 | 2159 | 1,10 | 1650 | 0,84 |
| | 4 | 1,53 | 3560 | 1,85 | 1985 | 1,03 |

Авторы делают вывод, что при почти одинаковых значениях магнитной индукции в 12-полюсном варианте при применении совмещённой обмотки, кратность пускового момента увеличилась на 24%, максимального на 22%, минимального на 31%. Однако, данные двигатели сложно сравнивать, так как между базовым и новым вариантами помимо различий в конструкции обмотки присутствуют и другие отличия: разная длина сердечников и разное значение магнитной индукции.

В исследовании [5] Henning Kasten предлагает применение в АД совмещённой обмотки в качестве альтернативы роторам с медной обмоткой. Предполагается, что благодаря большему обмоточному коэффициенту совмещённую обмотку статора можно выполнять с меньшим числом витков. В результате это может привести

к уменьшению активного сопротивления обмотки и снижению потерь в меди. Для подтверждения данной гипотезы были проведены экспериментальные исследования на АД мощностью 30 кВт. Один двигатель был стандартный, другой модифицированный с совмещённой обмоткой, соединённой последовательно. В таблице 1.6 [5] приведены значения потерь мощность для двух двигателей полученные по результатам опыта.

Таблица 1.6 – Результаты экспериментов [5]

| | Стандартный | Модифициро- ванный |
|---------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Потери на трение, Вт | 154 | 154 |
| Потери в железе, Вт | 792 | 792 |
| Дополнительные потери, Вт | 644 | 644 |
| Потери в меди, Вт | 981 | 853 |
| Потери в роторе, Вт | 847 | 749 |
| Общие потери, Вт | 3419 | 3195 |
| КПД, % | 89,64 | 90,38 |

Из результатов, приведённых в таблице 1.6 видно, что модифицированный двигатель имеет меньшие потери в меди на 13% и в роторе на 11,5%. Однако другие составляющие потерь не изменились.

Среди работ, посвящённых изучению применения совмещённых обмоток, можно встретить исследования и авторов из России [83, 95]. В них приведены результаты теоретических исследований, компьютерного моделирования, а также методика изготовления АД с совмещёнными обмотками. На рисунке 1.13 [83] представлены механические характеристики двигателей АДМ100S2У2, а именно: стандартного (1), с совмещённой обмоткой (2) и расчётной модели в программе RMxprt™ (3).

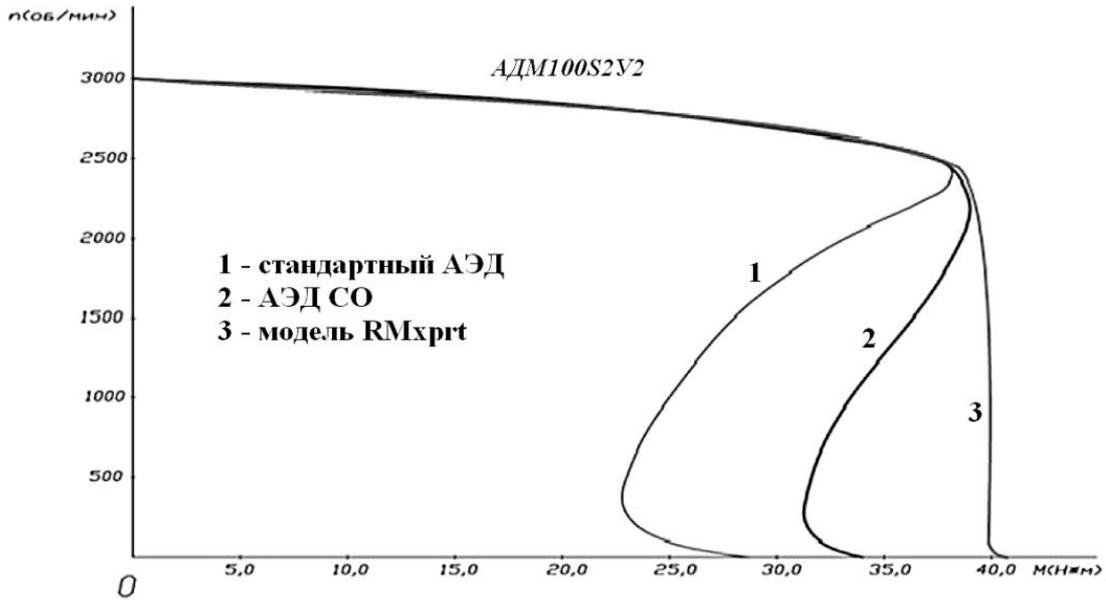


Рисунок 1.13 – Механические характеристики [83]

Стоит отметить, что характеристика (3) на рисунке 1.13 с точки зрения теории электрических машин мало достижима. На рисунке 1.14 [19] изображена кривая электромагнитного момента АД и её искажение асинхронными моментами, вызванными действием высших гармоник поля.

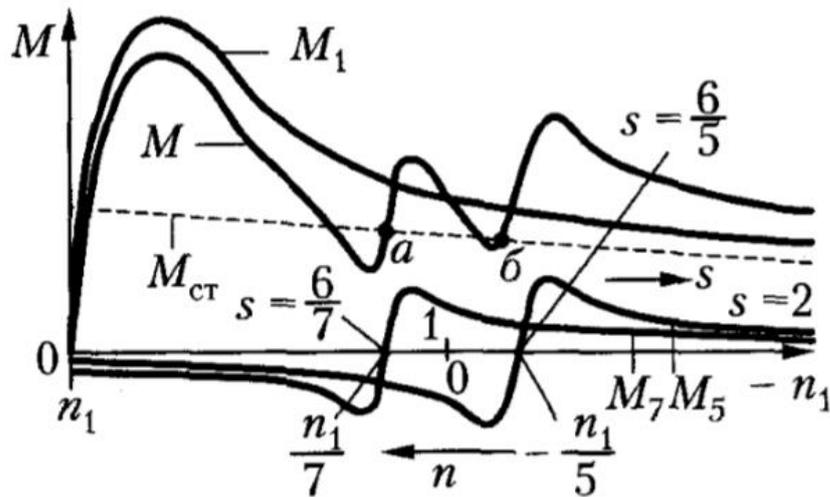


Рисунок 1.14 – Кривая электромагнитного момента АД [19]

Как видно из рисунка 1.14 (кривая M_1), даже при отсутствии действия высших гармоник магнитного поля, с уменьшением частоты вращения ниже критического значения, развиваемый двигателем момент начинает уменьшаться и при частоте вращения равной 0 (пусковая точка) становится ниже максимального. Такое

уменьшение связано не столько с действием высших гармоник, а в первую очередь с действием магнитных потоков рассеяния. Высшие же гармоники в первую очередь оказывают влияние на наличие и величину провала в кривой электромагнитного момента, что и продемонстрировано на рисунке 1.14.

1.4 Обзор существующих вариаций совмещённых обмоток

Первый патент на совмещённую обмотку [7] принадлежит Willem C. Korthals-Altes и был опубликован в 1918 году. В нём приводится совмещённая двухслойная обмотка с относительным шагом катушки $\beta=0,5$ (рисунок 1.15 [7]).

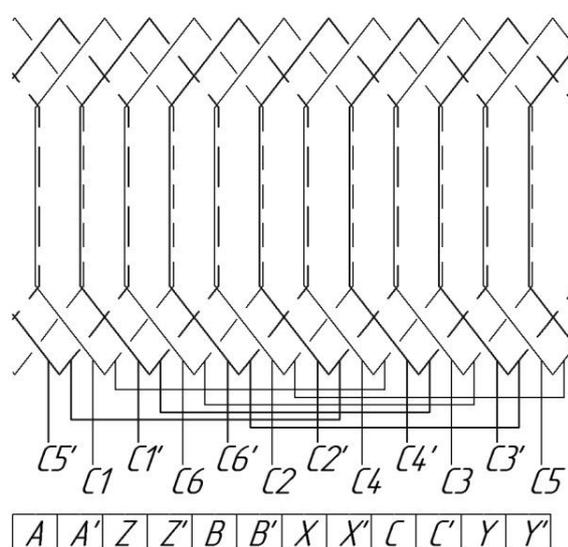


Рисунок 1.15 – Трёхфазная двухслойная совмещённая обмотка с относительным шагом $\beta=0,5$ [7]

Выбор данного шага в патенте обосновывается экономией обмоточного провода, так как это приводит к снижению длины лобовой части. Однако, стоит отметить, что укорочение шага приводит также и к снижению обмоточного коэффициента и как следствие при заданном напряжении к снижению магнитного потока. Для того, чтобы этого не происходило, на практике увеличивают число витков в фазах обмотки, что в свою очередь повышает расход обмоточного провода.

С одной стороны, укорочение шага способствует уменьшению длины лобовой части, но в тоже время приводит к необходимости увеличения числа витков в

фазе. Следовательно, рациональность выбора относительного шага $\beta=0,5$ с целью экономии обмоточного провода будет зависеть от габаритов машины и нуждается в дополнительной проверке. Однако, в некоторых случаях, например в мощных двухполюсных машинах с обмоткой из жёстких катушек, возникает необходимость применения относительного шага $\beta=0,5$ с целью упрощения укладки обмотки в пазы.

Укорочение шага в двухслойных обмотках чаще всего подбирается с целью снижения относительной величины ВПГ в МДС двигателя. Изменяя шаг обмотки, гармоники магнитного поля уменьшаются в разной степени. Так, подбирая шаг обмотки, можно значительно уменьшить определённую ВПГ. В теории уменьшение МДС ν -гармоники характеризуется коэффициентом укорочения:

$$k_{y\nu} = \sin \frac{\nu \cdot \beta \cdot \pi}{2}. \quad (1.7)$$

Проведём оценку снижения ВПГ для данной обмотки за счёт применения предложенного в патенте относительного шага $\beta=0,5$ в сравнение с другими шагами. Результаты расчётов коэффициентов укорочения при различных относительных шагах приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Коэффициенты укорочения для ν -гармоник при различных относительных шагах обмотки

| $\nu \backslash \beta$ | 1,0 | 11/12 | 5/6 | 3/4 | 2/3 | 7/12 | 0,5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1,000 | 0,991 | 0,966 | 0,924 | 0,866 | 0,793 | 0,707 |
| 5 | 1,000 | 0,793 | 0,259 | -0,383 | -0,866 | -0,991 | -0,707 |
| 7 | -1,000 | -0,609 | 0,259 | 0,924 | 0,866 | 0,131 | -0,707 |
| 11 | -1,000 | -0,131 | 0,966 | 0,383 | -0,866 | -0,609 | 0,707 |
| 13 | 1,000 | -0,131 | -0,966 | 0,383 | 0,866 | -0,609 | -0,707 |
| 17 | 1,000 | -0,609 | -0,259 | 0,924 | -0,866 | 0,131 | 0,707 |
| 19 | -1,000 | 0,793 | -0,259 | -0,383 | 0,866 | -0,991 | 0,707 |
| 23 | -1,000 | 0,991 | -0,966 | 0,924 | -0,866 | 0,793 | -0,707 |
| 25 | 1,000 | -0,991 | 0,966 | -0,924 | 0,866 | -0,793 | 0,707 |

Из таблицы 1.7 видно, что применение относительного шага $\beta=0,5$, приводит к снижению первой (основной) и высших гармоник в равной степени – в 0,707 раза.

Поэтому с точки зрения уменьшения относительного содержания ВПГ данный шаг не имеет преимуществ по сравнению с полным шагом обмотки.

Известна вариация совмещённой 12-зонной волновой обмотки. Такая обмотка (рисунок 1.16) приводится в патенте [8], принадлежащем компании Siemens. Среди её отличительных черт, кроме того, что она является волновой, можно выделить то, что фазы звезды состоят из двух параллельных ветвей.

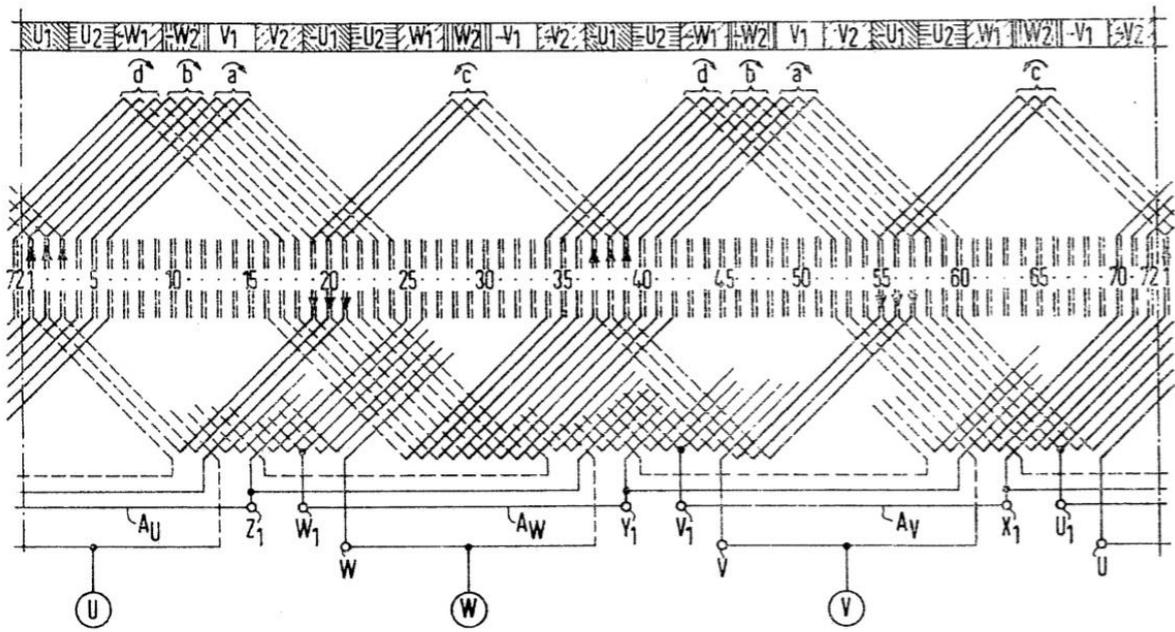


Рисунок 1.16 – Совмещённая 12-зонная волновая обмотка [8]

Схема соединения частей обмотки приведена на рисунке 1.17 [8].

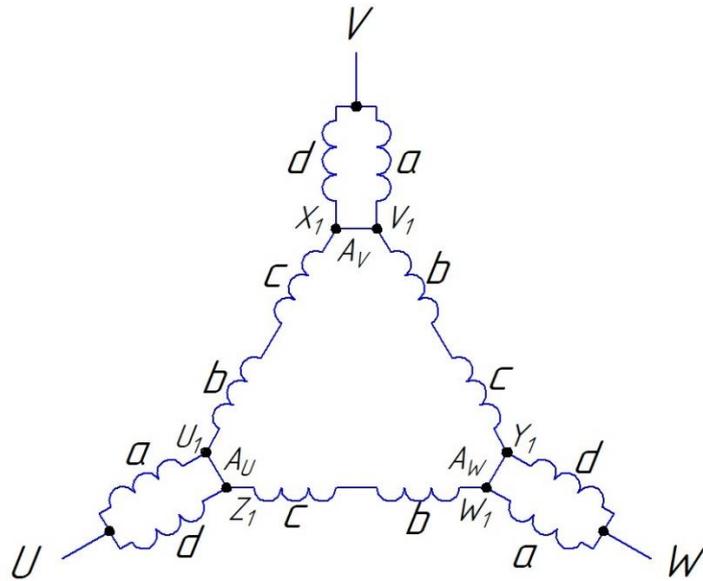


Рисунок 1.17 – Схема соединения частей совмещённой обмотки из патента [8]

Среди преимуществ совмещённой обмотки в сравнение со стандартной в патенте выделяется пониженное содержание ВПГ в кривой возбуждения поля и снижение потерь в меди. Однако, полагаясь на практический опыт, волновые обмотки не удобны для использования во внешнем статоре, которым и обладают большинство машин переменного тока, поэтому такие обмотки могут применяться, в основном для фазных роторов.

В патенте [6] ставится цель без уменьшения «использования машины» (*Maschinenausnutzung*) создание недорогой и простой многофазной совмещённой обмотки с пониженным содержанием ВПГ МДС и, как следствие, их вредных эффектов: «паразитных» моментов (*Pendelmomente*), акустических шумов, дополнительных потерь.

В отличие от других патентов здесь рассматривается совмещённая обмотка произвольного числа фаз. Часть обмотки, которая в случае трёх фаз соединялась «треугольником», при большем количестве фаз соединяется в «многоугольник», число углов которого равно числу фаз. Другая же часть обмотки соединяется последовательно с углами «многоугольника» образуя тем самым «звезду». Пример для случая четырёх и пяти фаз изображён на рисунке 1.18 [6].

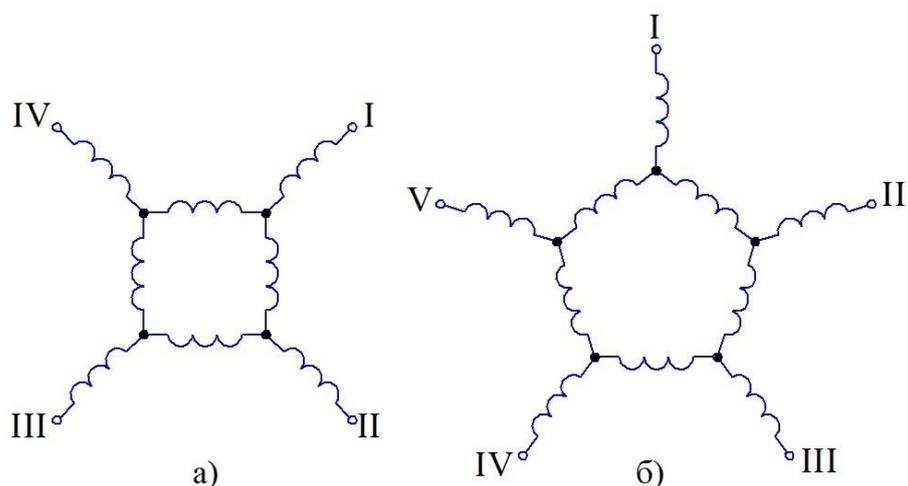


Рисунок 1.18 – Схемы соединения совмещённой обмотки:
а) четырёхфазной; б) пятифазной [6]

Катушки «звезды» и «многоугольника» смещены на электрический угол $\alpha=(\pi/2-\pi/m)$. Не сложно убедиться, что в случае трёх фаз этот угол составляет $\pi/6$. Отношение числа витков фазы «звезды» w_Y к числу витков «многоугольника» $w_{\text{многоуг}}$ определяется уравнением:

$$\frac{w_Y}{w_{\text{многоуг}}} = \frac{1}{2 \cdot \sin(\pi/m)}, \quad (1.8)$$

где m – число фаз обмотки.

При этом отношение сечений проводников обратно пропорционально приведённому выше уравнению. Соблюдение этих условий теоретически обеспечит одинаковую плотность тока, равенство потерь и магнитных потоков катушек.

В монографии Попова В.И. [92] рассматриваются совмещённые 12-зонные однослойные цепные обмотки, а также совмещённые двухслойные обмотки. Совмещённая 12-зонная однослойная цепная обмотка отличается тем, что её катушки выполнены с укороченным шагом и тем самым обмотка имеет несплошные фазные зоны. Предполагается, что такая цепная обмотка будет обладать меньшим относительным содержанием ВПГ, чем неукороченная обмотка со сплошными фазными зонами. Пример 12-зонной однослойной цепной обмотки на $z=24$ паза, $2p=2$ полюса и с укороченным шагом $y=9$ приведён на рисунке 1.19 [92].

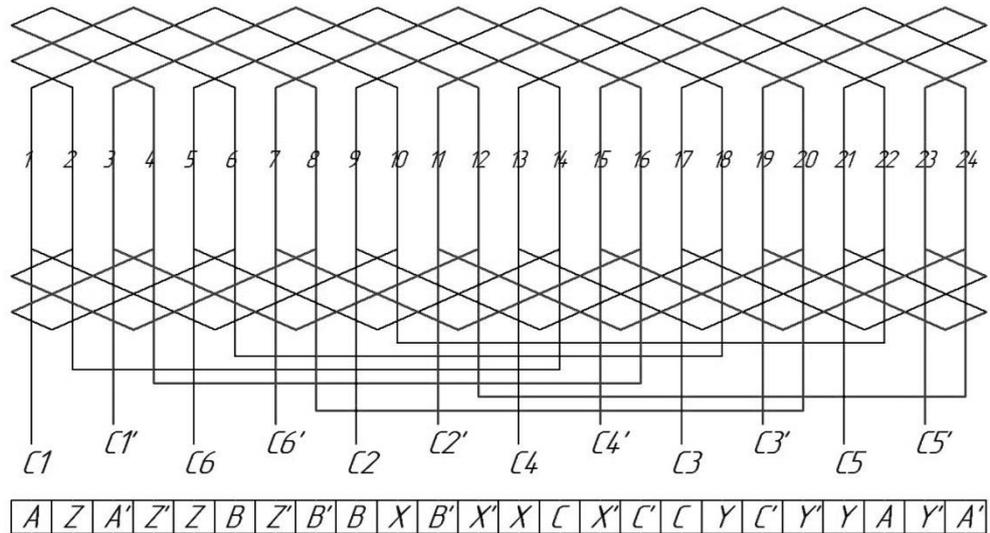


Рисунок 1.19 – Совмещённая 12-зонная однослойная цепная укороченная обмотка при $2p=2$, $z=24$, $y=9$ [92]

В работе [92] оценивается относительное содержание ВПГ расчётом коэффициентов дифференциального рассеяния с помощью диаграмм Гергёса. Совмещённая однослойная цепная обмотка сравнивается со стандартными однослойными обмотками: цепной и «вразвалку». Результаты исследования показывают, что совмещённая однослойная цепная обмотка имеет меньший коэффициент дифференциального рассеяния, а стало быть, и меньшее относительное содержание ВПГ, чем аналогичные ей рассматриваемые стандартные однослойные обмотки. Однако в работе не приведено сравнение рассматриваемой совмещённой укороченной обмотки с более традиционным вариантом 12-зонных обмоток со сплошными фазными зонами.

В монографии [92] также рассматривается возможность выполнения совмещённой обмотки при неодинаковом распределении фаз «звезды» и «треугольника» по пазам. В частности, приводится пример совмещённой однослойной цепной укороченной обмотки при $2p=2$, $z=36$ и $y=15$. В этом случае фазы «звезды» распределены в пределах одного полюса в $q_Y=2$ пазах, а фазы «треугольника» в $q_\Delta=4$ пазах. Схема такой обмотки представлена на рисунке 1.20 [92].

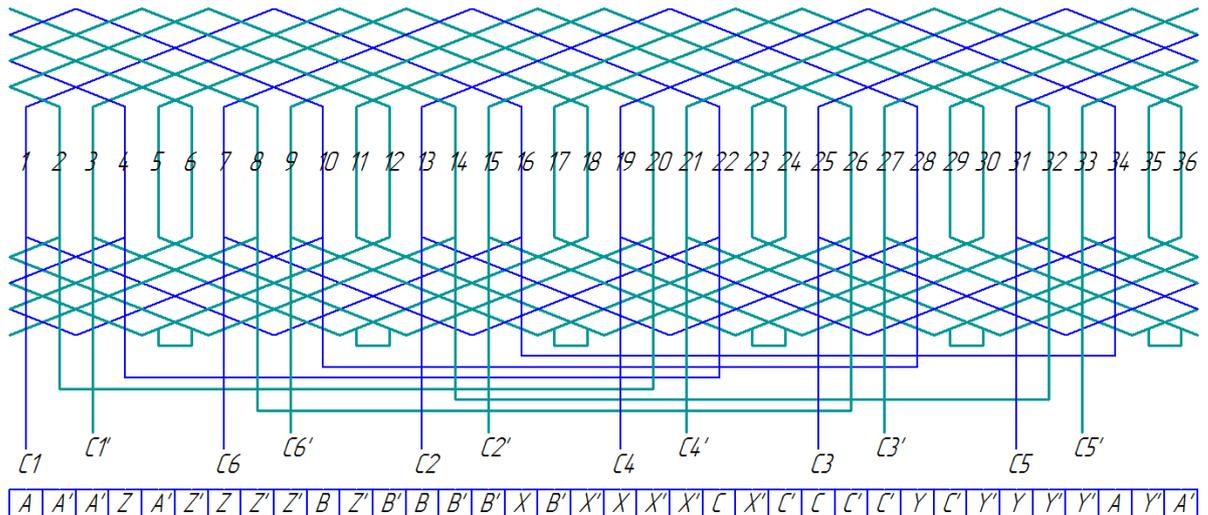


Рисунок 1.20 – Совмещённая однослойная цепная укороченная обмотка при $2p=2$,
 $z=36, y=15$ [92]

При такой вариации обмотки фазы «звезды» и «треугольника» распределены в разном количестве пазов из чего следует, что для теоретически верного соотношения числа витков между ними необходимо соблюдать равенство:

$$w_{\Delta} \cdot k_{об\Delta} = \sqrt{3} \cdot w_Y \cdot k_{обY}, \quad (1.9)$$

где $k_{об\Delta}$ и $k_{обY}$ – обмоточные коэффициенты фаз «звезды» и «треугольника».

$$k_{об\Delta} = k_{y\Delta} \cdot k_{p\Delta} = \sin \frac{\beta_{\Delta} \cdot \pi}{2} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi}{m_1} \right)}{q_{\Delta} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{m_1 \cdot q_{\Delta}} \right)}, \quad (1.10)$$

где $k_{y\Delta}$, $k_{p\Delta}$ – коэффициенты укорочения и распределения;

β_{Δ} – относительный шаг;

q_{Δ} – число пазов, приходящихся на полюс и фазу для обмотки, соединённой «треугольником»;

$m_1=12$ – число фазных зон.

Расчёт обмоточного коэффициента «звезды» $k_{обY}$ аналогичен расчёту $k_{об\Delta}$ для «треугольника».

Для обеспечения одинаковости заполнения всех пазов статора отношение сечений проводов катушек «треугольника» s_{Δ} и «звезды» s_Y должно удовлетворять равенству:

$$\frac{s_{\Delta}}{s_Y} = \frac{q_{\Delta} \cdot w_{\Delta} \cdot k_{об\Delta}}{q_Y \cdot \sqrt{3} \cdot w_Y \cdot k_{обY}}. \quad (1.11)$$

В монографии [92] рассматриваются и двухслойные варианты совмещённой обмотки. Они сравниваются с аналогичными им двухслойными стандартными обмотками с шагом катушек равным шагу совмещённой обмотки. Результаты исследования показывают, что рассматриваемые двухслойные совмещённые обмотки обладают меньшим коэффициентом дифференциального рассеяния, чем аналогичные им двухслойные стандартные обмотки. Что означает меньшее относительное содержание в их МДС ВПГ. В данном исследовании при сравнении был выбран равный шаг стандартной и совмещённой обмотки, однако, стоит учесть, что шаг, при котором достигается минимальное значение коэффициента дифференциального рассеяния для этих обмоток, может быть различным, что нуждается в дополнительной проверке.

Автор работы Попов В.И. отмечает преимущество совмещённых обмоток над стандартными в их большей эффективности снижения ВПГ. Но также и отмечает недостаток в усложнение схемы соединений.

В патенте [89] приводится одно-двухслойная 12-зонная совмещённая обмотка. Особенностью данной вариации является, то, что некоторые пазы статора заполняются витками только одной обмотки («звезды» или «треугольника»), в другие же пазы укладывают витки обеих обмоток, причём их число в два раза меньше, чем в однослойных пазах. Таким образом заполненность всех пазов «медью» становится примерно равной. Пример такой обмотки для статора с 36 пазами на 4 полюса изображён на рисунке 1.21 [89].

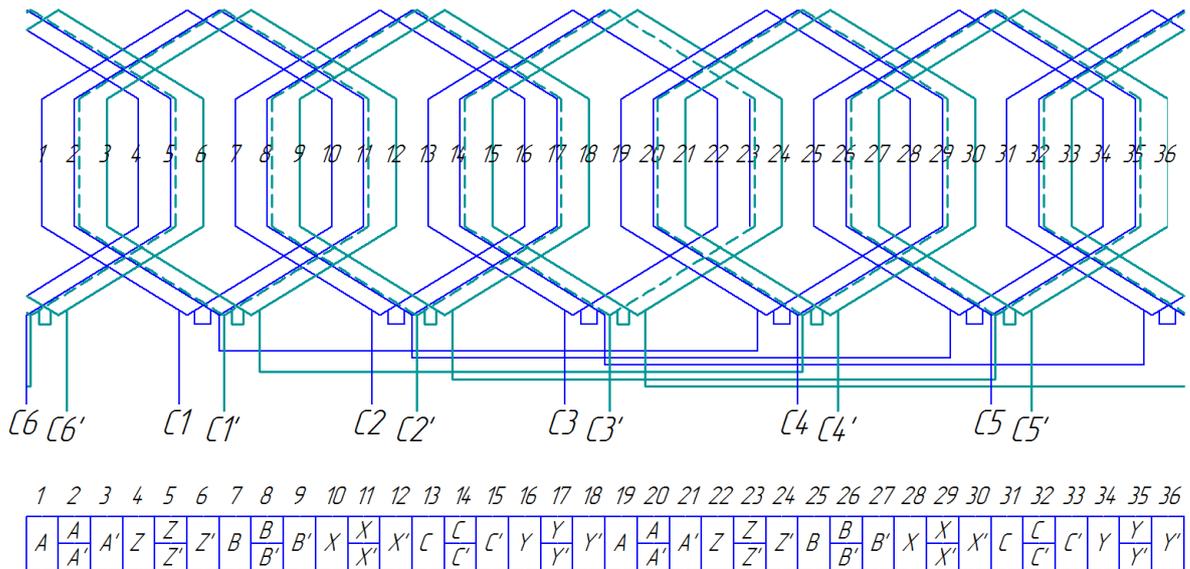


Рисунок 1.21 – Совмещённая одно-двухслойная обмотка при $2p=4$, $z=36$, $q=1,5$

[89]

В патенте [88] приводится вариант одно-двухслойный 12-зонной обмотки для статора с 18 пазами и 2 полюсами. Однако, сущность её конструкции та же, что и у обмотки, приведённой выше. В обоих вариантах число пазов, приходящихся на полюс и фазу $q_A = q_Y = 1,5$.

В патентах автор выделяет преимущества таких обмоток в увеличении удельной мощности асинхронных машин при одновременном обеспечении снижения их материалоемкости, уровня шумов и вибраций. Однако, в своих работах автор, при переходе от стандартной обмотки к совмещённой не учитывает изменение обмоточного коэффициента, что с теоретической точки зрения может привести к некоторому снижению магнитного потока. Кроме того, не учитывая данную особенность совмещённой обмотки, не получится добиться изменения материалоемкости и снижения электрических потерь в обмотке.

Схожую одно-двухслойную обмотку можно получить для статоров с 30 пазами, приходящимися на пару полюсов. Пример одно-двухслойной обмотки для статора с 30 пазами и 2 полюсами изображён на рисунке 1.22.

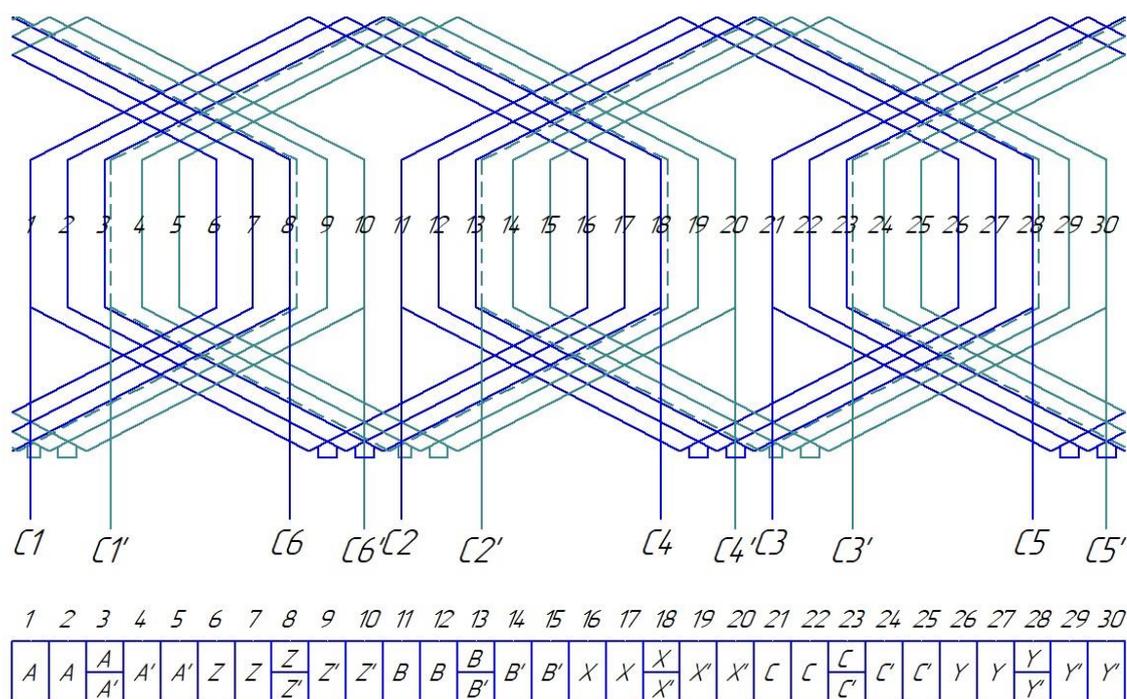


Рисунок 1.22 – Совмещённая одно-двухслойная обмотка при $2p=2$, $z=30$, $q=2,5$

Применение одно-двухслойной вариации 12-зонной совмещённой обмотки является вынужденным, так как для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов q равняется 1,5 и 2,5 соответственно. Альтернативой одно-двухслойной обмотки может служить приведённая ранее обмотка с неравным для «звезды» и «треугольника» числом пазов, приходящимся на полюс и фазу.

Большое разнообразие вариантов выполнения совмещённой обмотки встречается в справочнике обмотчика асинхронных двигателей [102]. Однако в рекомендациях к перерасчёту со стандартной на совмещённую обмотку, которые приводятся в нём, не учитывается изменение обмоточного коэффициента.

Выводы по главе:

1. Совершенствование конструкции обмотки статора за счёт применения в нём совмещённой 12-зонной обмотки является доступным и малозатратным способом улучшения энергетических характеристик АД. Её использование возможно как

при изготовлении новых, так и при ремонте старых двигателей практически любых мощностей.

2. Применение совмещённых обмоток в машинах переменного тока является перспективным направлением в совершенствовании их работы. Анализ исследований показывает, что такие обмотки могут применяться для регулирования частоты вращения, улучшения механической и энергетических характеристик двигателя.

3. К основным преимуществам совмещённой обмотки относят: снижение содержания ВПГ в МДС и больший обмоточный коэффициент по сравнению со стандартной обмоткой. Снижение содержания ВПГ предположительно приводит к уменьшению потерь, провалов в кривой электромагнитного момента, вибраций двигателя, потреблению реактивной энергии и др. Учёт изменения обмоточного коэффициента при перерасчёте обмотки может впоследствии привести к снижению электрических потерь в ней.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С 12-ЗОННОЙ ОБМОТКОЙ

2.1 Разработка схем, упрощающих укладку укороченных совмещённых обмоток

Известным и широко распространённым способом снижения содержания ВПГ в МДС обмотки является укорочение шага, при этом если сохранять сплошные фазные зоны, то обмотка получается двухслойной. Одним из недостатков таких равносекционных двухслойных обмоток является более сложная укладка катушек в пазы [40]. При этом особенно сильно данный недостаток сказывается при намотке статоров малого диаметра.

Выполнение двухслойных обмоток требует определённого опыта со стороны обмотчиков, которого не всегда может быть достаточно в небольших ремонтных предприятиях. Однако некоторые варианты 12-зонных совмещённых двухслойных обмоток с укороченным шагом возможно преобразовать в одно-двухслойные обмотки с теми же электромагнитными свойствами, то есть гармоническим составом в МДС. При этом их укладка по сложности не сильно будет отличаться от укладки однослойной обмотки.

На рисунке 2.1 изображена 12-зонная двухслойная обмотка с укороченным относительным шагом $\beta=11/12$ для статора с 48 пазами на 4 полюса.

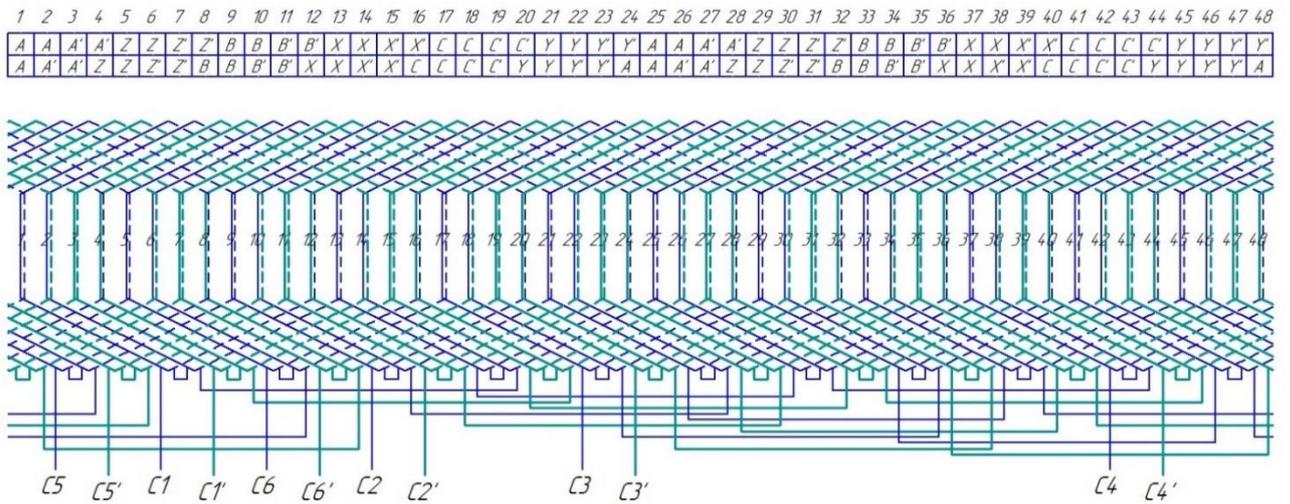


Рисунок 2.1 – Совмещённая 12-зонная двухслойная обмотка с относительным шагом $\beta = 11/12$ при $2p=4$, $z=48$

При укладке такой обмотки в начале укладывается в пазы только одна сторона нескольких секций, вторая же сторона должна оставаться отогнутой. Затем под отогнутые стороны подводятся стороны последних укладываемых секций, только после этого отогнутые стороны опускают в пазы [40].

Упростить укладку возможно преобразовав двухслойную обмотку в одно-двухслойную. Если обратить внимание на таблицу распределения фазных зон, изображённую на рисунке 2.9, то можно увидеть, что в некоторых пазах в верхнем и нижнем слое находятся проводники, принадлежащие одной фазе. Так, например в первом пазу находится только фазная зона А. Объединение таких проводники в одну катушку не повлияет на изменение МДС, но зато может упростить схему обмотки. Полученная таким образом одно-двухслойная обмотка изображена на рисунке 2.2.

зонной обмотки с относительным шагом $\beta=8/9$ для статора с 36 пазами и 4 полюсами.

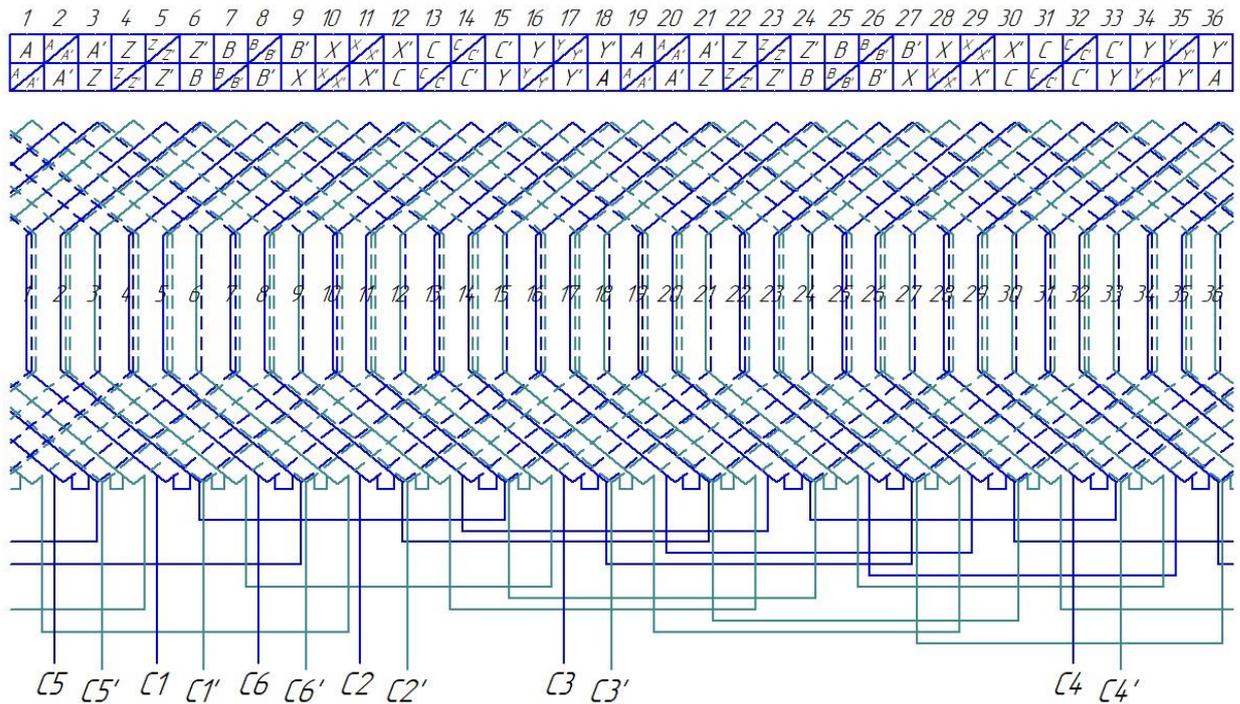


Рисунок 2.3 – Совмещённая 12-зонная двух-трёхслойная обмотка с относительным шагом $\beta=8/9$ при $2p=4$, $z=36$

Полученная схема сложна не только для восприятия, но и для укладки. Упростить выполнение обмотки можно, воспользовавшись тем же приёмом, что был применён выше. Для этого при формировании таблицы фазных зон объединим в одну катушку проводники, лежащие в одном пазу и принадлежащие к общей фазе. Тогда для статора с 36 пазами и 4 полюсами получится двухслойная обмотка, схема которой представлена на рисунке 2.4.

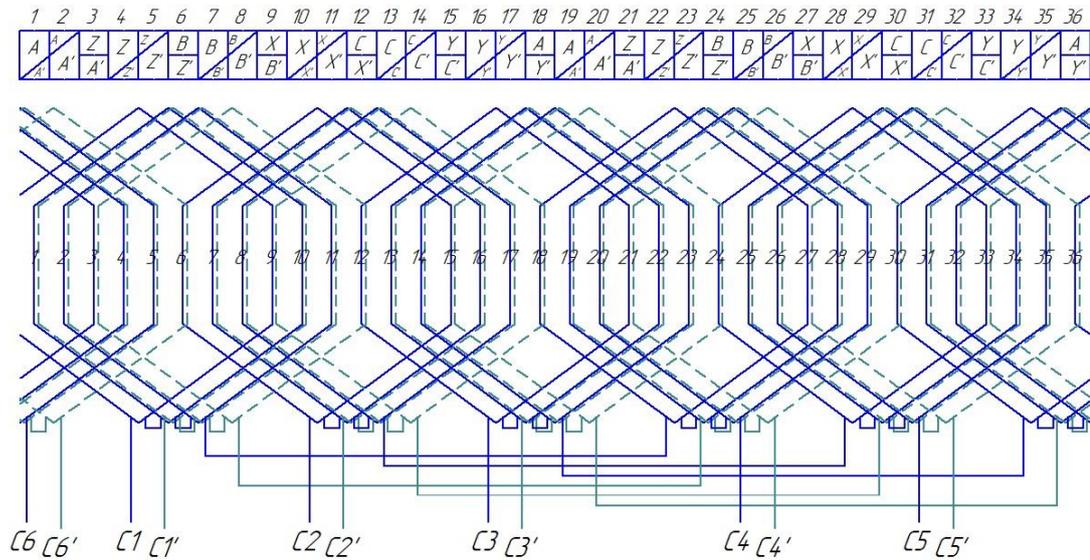


Рисунок 2.4 – Совмещённая 12-зонная двухслойная обмотка при $2p=4$, $z=36$

Несмотря на то, что обмотка получилась двухслойной её укладка не сложнее, чем для одно-двухслойной обмотки, изображённой на рисунке 2.2. Стоит отметить, что в такой обмотке одна фазная зона в пределах одного полюса, занимает 3 паза, но проводники в них распределены неравномерно. Так, для примера проводники фазной зоны А в тридцать шестом пазу заполняют 50%, в первом 75%, а во втором 25% общего объёма паза.

Второй пример рассмотрим для статора с 60 пазами и 4 полюсами. На рисунке 2.5 представлена двух-трёхслойная обмотка с укороченным относительным шагом $\beta=14/15$.

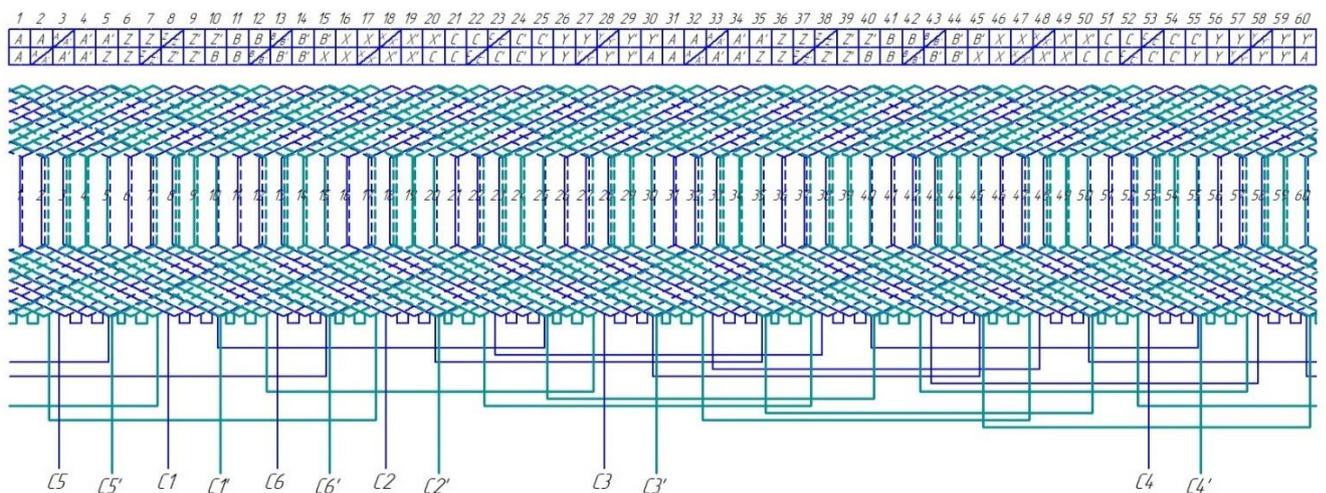


Рисунок 2.5 – Совмещённая 12-зонная двух-трёхслойная обмотка с укороченным шагом $\beta=14/15$ при $2p=4$, $z=60$

$$\sigma_d = \frac{x_\partial}{x_2} = \frac{x - x_2}{x_2} = \frac{x}{x_2} - 1, \quad (2.1)$$

где x_∂ – индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния, Ом;

x_2 – главное индуктивное сопротивление, Ом;

x – общее индуктивное сопротивление обмотки, Ом.

Так как вращающиеся гармоники магнитного поля обмотки статора, перемещаясь относительно её, индуцируют в ней ЭДС самоиндукции, частота которых равна частоте тока в данной обмотке [19], то для нахождения σ_d можно перейти от сопротивлений к индуктивностям.

$$\sigma_d = \frac{L}{L_2} - 1, \quad (2.2)$$

где L_2 – индуктивность, соответствующая основной гармонике поля, Гн;

L – общая индуктивность обмотки от всех гармоник поля, Гн.

Для нахождения σ_d , не прибегая к расчёту индуктивностей всех гармоник, воспользуемся известной методикой расчёта [16, 22, 23, 52, 92, 98] с помощью многоугольника магнитных напряжений или иначе диаграммы Гёргеса.

Форма МДС в воздушном зазоре и диаграмма Гёргеса не зависят от соединения лобовых частей обмотки. Поэтому для её построения достаточно знать таблицу распределения фазных зон. На рисунке 2.7 приведены таблицы распределения фазных зон однослойных обмоток для статора с 24 пазми и 2 полюсами.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| а) | A | A | A | A | Z | Z | Z | Z | B | B | B | B | X | X | X | X | C | C | C | C | Y | Y | Y | Y |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|----|----|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| б) | A | Z | A' | Z' | Z | B | Z' | B' | B | X | B' | X' | X | C | X' | C' | C | Y | C' | Y' | Y | A | Y' | A' |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|----|----|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| в) | A | A | A' | A' | Z | Z | Z' | Z' | B | B | B' | B' | X | X | X' | X' | C | C | C' | C' | Y | Y | Y' | Y' |

Рисунок 2.7 – Таблицы распределения фазных зон однослойных обмоток при $2p=2$, $z=24$: а) стандартной 6-зонной со сплошными фазными зонами; б) совмещённой 12-зонной с несплошными фазными зонами; в) совмещённой 12 зонной со сплошными фазными зонами

На рисунке 2.8 приведены диаграммы Гёргеса для этих обмоток.

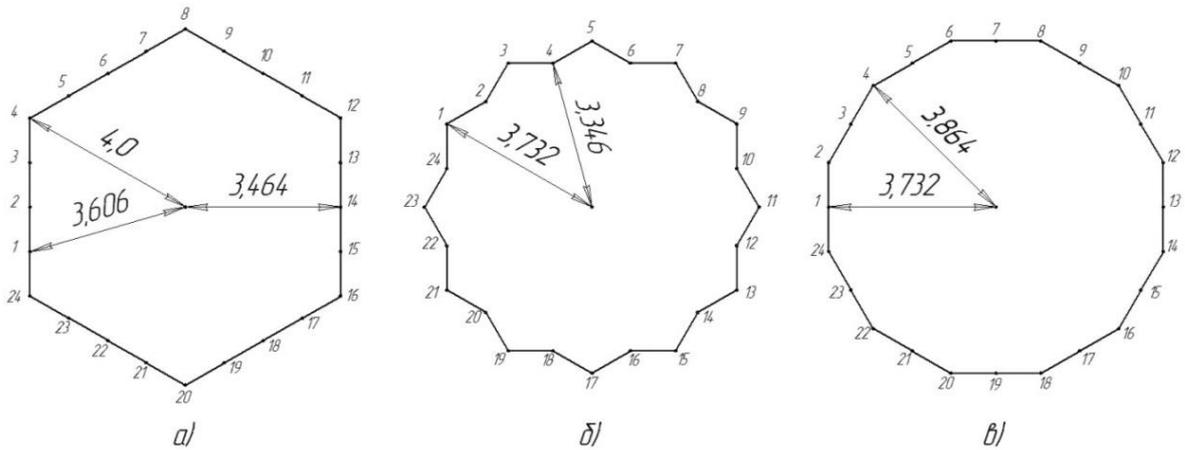


Рисунок 2.8 – Диаграммы Гёргеса для трёхфазных однослойных обмоток: а) стандартной 6-зонной со сплошными фазными зонами; б) совмещённой 12-зонной с несплошными фазными зонами; в) совмещённой 12 зонной со сплошными фазными зонами

Построение диаграммы для совмещённых обмоток проводилось с учётом звезды векторов токов (рисунок 2.9). При этом амплитудное значение полного тока паза принималось равным единице:

$$I_{mY} \cdot u_{nY} = I_{m\Delta} \cdot u_{n\Delta} = 1, \quad (2.3)$$

где I_{mY} и $I_{m\Delta}$ – амплитудное значение тока «звезды» и «треугольника» в относительных единицах;

u_{nY} и $u_{n\Delta}$ – число эффективных проводников в пазу «звезды» и «треугольника».

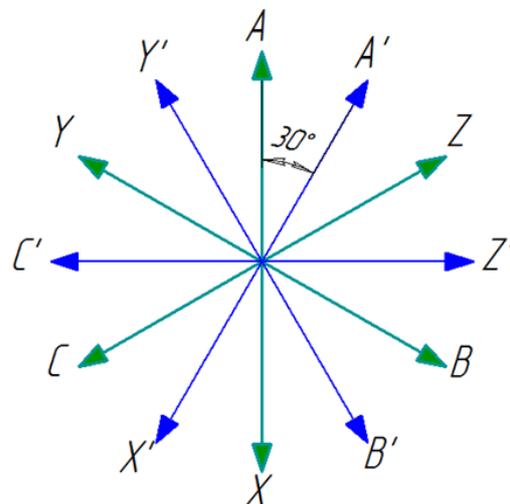


Рисунок 2.9 – Звезда чередования векторов токов совмещённой обмотки

Равенство (2.3) будет справедливым при соблюдении соотношения числа проводников в пазу с учётом количества параллельных ветвей «звезды» a_Y и «треугольника» a_Δ :

$$\frac{a_Y \cdot u_{n\Delta}}{a_\Delta \cdot u_{nY}} = \frac{a_\Delta \cdot I_{mY}}{a_Y \cdot I_{m\Delta}} = \sqrt{3}, \quad (2.4)$$

Индуктивность симметричной многофазной обмотки пропорциональна полярному моменту инерции междупазовых точек диаграммы Гёргеса и формула для расчёта σ_d принимает следующий вид [22]:

$$\sigma_d = \frac{R_d^2}{R^2} - 1, \quad (2.5)$$

где R_d^2 – полярный момент инерции междупазовых точек диаграммы Гёргеса в относительных единицах;

R – радиус окружности основной гармоники в относительных единицах:

$$R = \frac{z \cdot k_{об}}{2 \cdot \pi \cdot p}, \quad (2.6)$$

где z – число пазов;

p – число пар полюсов;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент основной гармоники.

$$R_d^2 = \frac{\sum_1^z R_i^2}{z}, \quad (2.7)$$

где R_i – радиус инерции i -ой пазовой точки в относительных единицах.

Величина σ_d в расчётах принимает малые значения, поэтому наглядней её выражать в процентах [92]:

$$\sigma_{d\%} = \left(\frac{R_d^2}{R^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (2.8)$$

Приведём пример расчёт для 12-зонной однослойной обмотки со сплошными фазными зонами при $z=24$, $2p=2$ (рисунки 2.15 в и 2.16 в). Для такой обмотки обмоточный коэффициент:

$$k_{об} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m_1}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m_1 \cdot q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12 \cdot 2}\right)} = 0,9914;$$

полярный момент инерции междупазовых точек диаграммы Гёргеса:

$$R_d^2 = \frac{\sum_1^z R_i^2}{z} = \frac{12 \cdot 3,732^2 + 12 \cdot 3,864^2}{24} = 14,4292;$$

радиус окружности основной гармоники:

$$R = \frac{z \cdot k_{об}}{2 \cdot \pi \cdot p} = \frac{24 \cdot 0,9914}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 3,7869;$$

коэффициент дифференциального рассеяния в процентах:

$$\sigma_{d\%} = \left(\frac{R_d^2}{R^2} - 1 \right) \cdot 100\% = \left(\frac{14,4292}{3,7869^2} - 1 \right) \cdot 100\% = 0,617.$$

Результаты расчёта $\sigma_{d\%}$ однослойных обмоток с 24, 36 и 48 пазами, приходящимися на пару полюсов, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициенты дифференциального рассеяния при различных исполнениях однослойной обмотки

| Количество пазов, приходящихся на пару полюсов | Вид обмотки | Чередование фазных зон | Обмоточный коэффициент $k_{об}$ | Коэффициент дифференциального рассеяния $\sigma_{d\%}$ |
|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------|--|
| 24 | Стандартная 6-зонная | сплошное | 0,9577 | 0,882 |
| | | несплошное | 0,8924 | 1,124 |
| | Совмещённая 12-зонная | сплошное | 0,9914 | 0,617 |
| | | несплошное | 0,9239 | 0,868 |
| 36 | Стандартная 6-зонная | сплошное | 0,9561 | 0,524 |
| | | несплошное | 0,9271 | 0,415 |
| | Совмещённая 12-зонная | сплошное | 0,9899 | 0,273 |
| | | несплошное | 0,9562 | 0,323 |
| 48 | Стандартная 6-зонная | сплошное | 0,9556 | 0,387 |
| | | несплошное | 0,9068 | 0,283 |
| | Совмещённая 12-зонная | сплошное | 0,9893 | 0,159 |
| | | несплошное | 0,9388 | 0,217 |

Из расчётов можно заметить, что $\sigma_{d\%}$ зависит от числа пазов, приходящихся на пару полюсов, и увеличение их числа приводит к снижению $\sigma_{d\%}$. Если увеличить число пазов, приходящихся на полюс и фазу, до бесконечности, то получим равномерно распределённую обмотку, которая будет иметь наименьшее возможное значение $\sigma_{d\%}$. Расчёт такого значения для стандартной 6-зонной обмотки приведён в книге Кучера и Гапла «Обмотки электрических вращательных машин» [52].

Определим наименьшее возможное значение $\sigma_{d\%}$ для совмещённой 12-зонной обмотки со сплошными фазными зонами.

Диаграмма Гёргеса такой обмотки имеет вид правильного двенадцатиугольника (рисунок 2.8 в), сторона которого есть амплитуда полного тока одной полюсно-фазной группы:

$$F_q = q \cdot u_{п\gamma} \cdot I_{m\gamma} = q \cdot u_{п\Delta} \cdot I_{m\Delta}. \quad (2.9)$$

Для удобства нахождения полярного момента междупазовых точек R_d^2 , приравняем сторону диаграммы к единице, а для нахождения квадратов радиусов инерции каждой междупазовой точки R_i^2 воспользуемся теоремой Пифагора. Тогда R_d^2 находим из интеграла:

$$R_d^2 = 2 \int_0^{0,5} (3,4821 + x^2) dx = 2 \left[3,4821x + \frac{1}{3} x^3 \right]_0^{0,5} = 3,5654, \quad (2.10)$$

где x – переменная интегрирования, в качестве которой является половина стороны двенадцатиугольника.

Радиус окружности основной гармоники:

$$R = \frac{m}{\pi} \cdot k_{об\infty} \cdot F_q = \frac{6}{\pi} \cdot 0,9886 \cdot 1 = 1,8881, \quad (2.11)$$

где $k_{об\infty}$ – обмоточный коэффициент равномерно распределённой обмотки:

$$k_{p\infty} = \frac{\sin \alpha}{\alpha} = \frac{\sin \left(\frac{\pi}{12} \right)}{\frac{\pi}{12}} = 0,9886, \quad (2.12)$$

где α – угол фазной зоны, рад.

Подставим полученные результаты в формулу 2.8 и получим коэффициент дифференциального рассеяния равномерно распределённой совмещённой обмотки:

$$\sigma_{d\%} = \left(\frac{R_d^2}{R^2} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{3,5654}{1,8881^2} - 1 \right) \cdot 100 = 0,013.$$

Полученный в расчётах, наименьший коэффициент дифференциального рассеяния для совмещённой обмотки приведён в таблице 2.3 в сравнении со стандартной 6-зонной обмоткой.

Таблица 2.2 – Коэффициенты дифференциального рассеяния в случае равномерно распределённой обмотки

| Вид обмотки | Наименьший коэффициент дифференциального рассеяния |
|-----------------------|--|
| Стандартная 6-зонная | 0,217 |
| Совмещённая 12-зонная | 0,013 |

Проводя промежуточный итог для однослойных обмоток, можно сделать вывод, что совмещённая обмотка со сплошными фазными зонами обладает меньшим относительным содержанием ВПГ, чем аналогичные ей стандартная и совмещённая с несплошными фазными зонами обмотки. Рисунок 2.10 показывает значения $\sigma_{d\%}$ при различных числах пазов, приходящихся на пару полюсов, для однослойных совмещённой и стандартной обмоток.

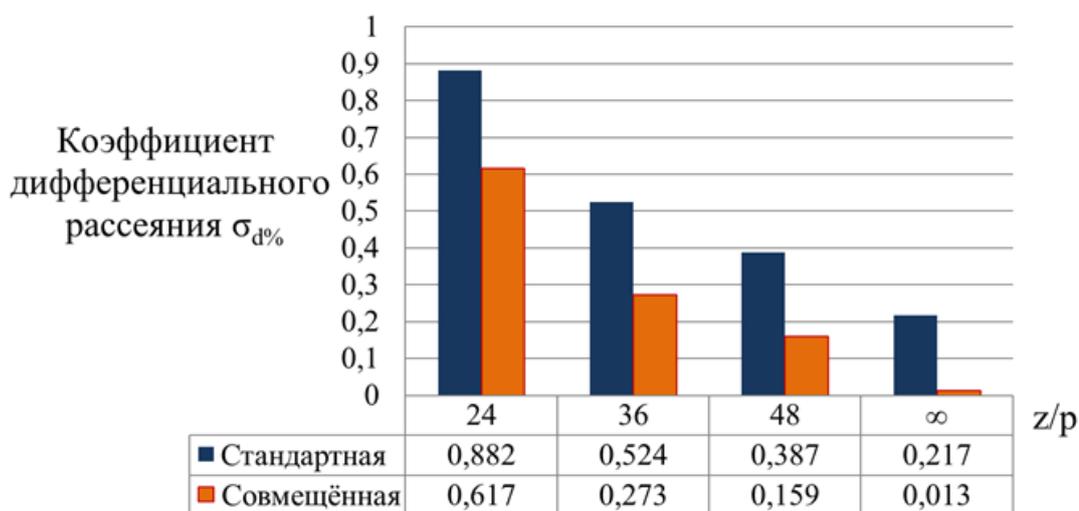


Рисунок 2.10 – Коэффициенты дифференциального рассеяния однослойных обмоток при различных числах пазов, приходящихся на пару полюсов

Из рисунка 2.10 видно, что с ростом числа пазов, приходящихся на пару полюсов, коэффициент дифференциального рассеяния совмещённой обмотки снижается быстрее, чем для стандартной. Это свидетельствует о возрастании эффективности замены стандартной обмотки на совмещённую с целью уменьшения ВПГ.

Приведённый выше результат соответствует случаям, когда при переходе от стандартной к совмещённой обмотке число пазов, приходящихся на полюс и фазу q остаётся целым. Однако, существует ряд двигателей, для которых переход к совмещённой обмотки приводит к тому, что число q становится дробным. Например, для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, для совмещённой обмотки q равняется 1,5 и 2,5 соответственно, в то время как для стандартной обмотки q составляет 3 и 5.

В этом случае возможны несколько вариантов исполнения совмещённой обмотки например:

1. Одно-двухслойный вариант совмещённой обмотки. При котором фаза в пределах одного полюса распределяется в двух пазах, но так чтобы один паз был заполнен катушками одной фазы полностью, а второй паз наполовину той же фазы и наполовину другой фазы. Пример таких обмоток был приведён на рисунках 1.21 при $q=1,5$ и 1.22 при $q=2,5$.

2. Однослойный вариант совмещённой обмотки с разным, но целым распределением пазов между «звездой» и «треугольником». Вариант неравного распределения пазов между «звездой» и «треугольником» приводится в монографии [92] для случая с $q=2$ в одной обмотки (например «звезды») и $q=4$ в другой (рисунок 2.6). Для статора с $z=36$ пазов и $2p=4$ полюсов такая обмотка может иметь вид, приведённый на рисунке 2.11.

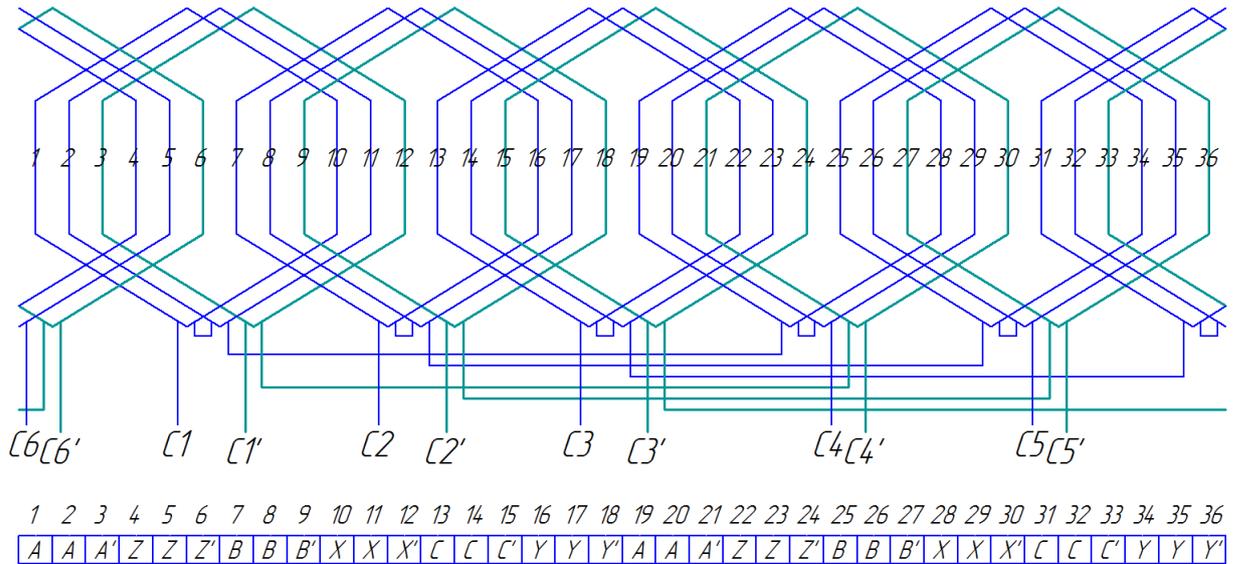


Рисунок 2.11 – Совмещённая 12-зонная однослойная обмотка при $2p=4$, $z=36$, $q=1$ для «треугольника» и $q=2$ для «звезды»

Проведём сравнительный анализ двух возможных вариантов исполнения совмещённых обмоток для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов. На рисунках 2.12 и 2.13 изображены диаграммы Гёргеса совмещённых 12-зонных обмоток для таких статоров.

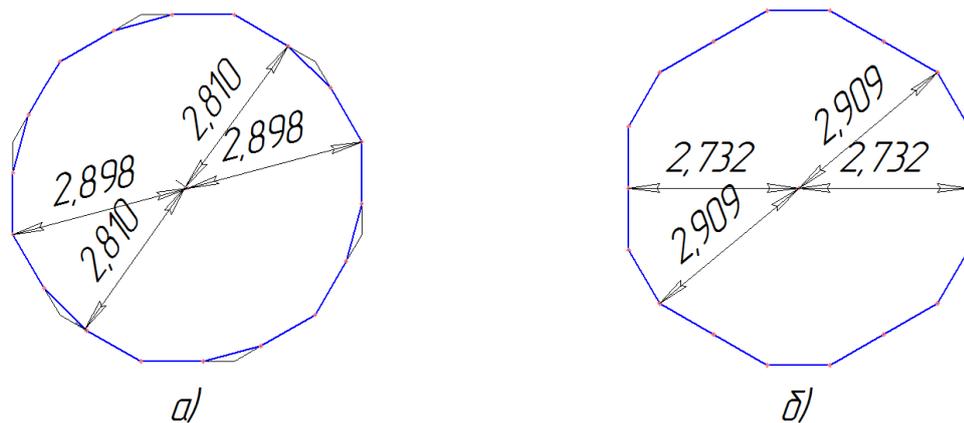


Рисунок 2.12 – Диаграммы Гёргеса совмещённых обмоток для статоров с 18 при одно-двухслойном варианте исполнения (а) и при однослойном с разным распределением пазов (б)

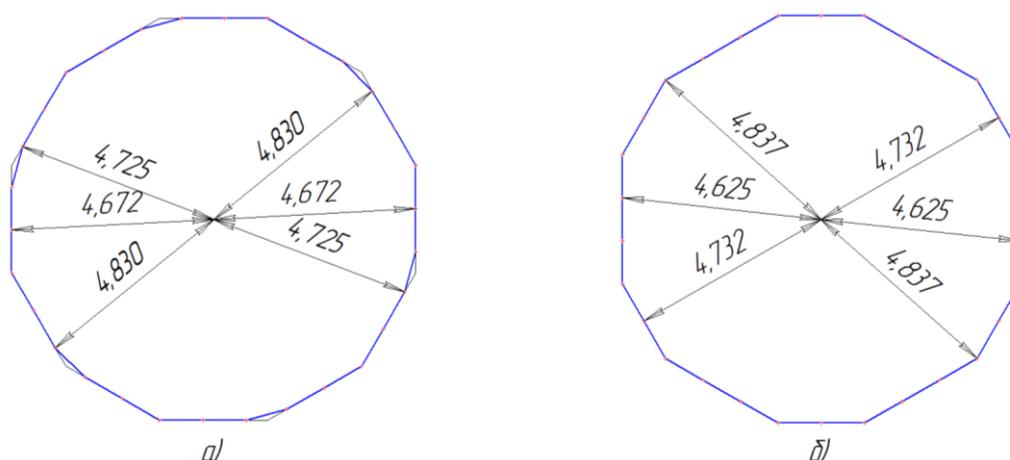


Рисунок 2.13 – Диаграммы Гёргеса совмещённых обмоток для статоров с 30 при одно-двухслойном варианте исполнения (а) и при однослойном с разным распределением пазов (б)

Диаграммы Гёргеса позволяют не только облегчить расчёт коэффициентов дифференциального рассеяния, но также и определить наличие или отсутствие в гармоническом составе МДС чётных ВПГ и низших пространственных гармоник. В случае, если в диаграмме отсутствует центральная симметрия, то в МДС обмотки содержатся помимо нечётных ВПГ ещё и чётные, кроме того, если многоугольник МДС замыкается после нескольких обходов, то это свидетельствует о появлении так же и низших пространственных гармоник [92].

Из рисунков 2.12 и 2.13 видно, что диаграммы имеют центральную симметрию и замыкаются за один обход. Это свидетельствует о том, что в МДС обоих рассмотренных вариантов совмещённых обмоток для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, отсутствуют низшие и чётные высшие пространственные гармоники.

В случае варианта обмотки с разным распределением «звезды» и «треугольника» по пазам, обмоточный коэффициент всей обмотки определяется как среднее значение обмоточных коэффициентов звезды и треугольника:

$$k_{об} = \frac{q_Y k_{обY} + q_{\Delta} k_{об\Delta}}{q_Y + q_{\Delta}}, \quad (2.13)$$

где $k_{обY}$ и $k_{об\Delta}$ – обмоточные коэффициенты «звезды» и «треугольника»;

q_Y и q_{Δ} – число пазов «звезды» и «треугольника» приходящиеся на полюс и фазу.

Для нахождения обмоточного коэффициента в одно-двухслойной обмотке были построены вектора ЭДС катушечной группы обмоток (Рисунок 2.14).

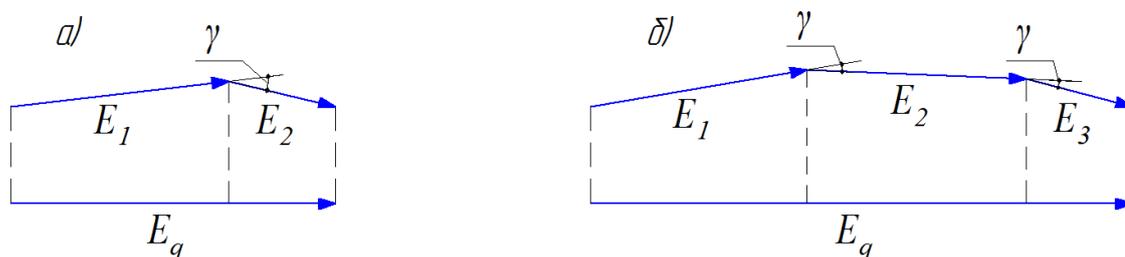


Рисунок 2.14 – ЭДС катушечной группы совмещённой одно-двухслойной обмотки для статоров с 18 (а) и 30 (б) пазами, приходящимися на пару полюсов

В рассматриваемых однослойных обмотках укорочение шага обмотки отсутствует, а это значит, что обмоточный коэффициент равен коэффициенту распределения, который представляет собой отношение ЭДС катушечной группы E_q к арифметической сумме ЭДС катушек входящих в эту группу [19]. Для статоров с 18 пазами, приходящимися на пару полюсов, обмоточный коэффициент определяется по нижеследующей формуле, где E_q определяется из теоремы косинусов.

$$k_{об} = \frac{E_q}{\sum_1^q E_i} = \frac{\sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cos(180^\circ - \gamma)}}{E_1 + E_2}, \quad (2.14)$$

где E_1 и E_2 – ЭДС в относительных единицах, наводимые в катушках, которые находятся в пазах, полностью заполненных только одной фазой и заполненных двумя фазами, соответственно;

γ – угол, характеризующий сдвиг ЭДС катушек по пазам, рад:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z}. \quad (2.15)$$

Для удобства расчёта примем за единицу ЭДС, наводимую в катушке с полным количеством витков E_1 , тогда в пазах с половиной витков ЭДС E_2 будет равна 0,5:

$$k_{об} = \frac{\sqrt{1^2 + 0,5^2 - 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot \cos 160^\circ}}{1 + 0,5} = 0,9865.$$

Для статоров с 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, обмоточный коэффициент:

$$k_{об} = \frac{\sqrt{\left(2 \cdot E_1 \sin\left(\frac{180^\circ - \gamma}{2}\right)\right)^2 + E_3^2 - 4 \cdot E_1 \sin\left(\frac{180^\circ - \gamma}{2}\right) \cdot E_3 \cos\left(180^\circ - \frac{3\gamma}{2}\right)}{E_1 + E_2 + E_3}, \quad (2,16)$$

где E_1 и E_2 – ЭДС в относительных единицах, наводимые в катушках, которые находятся в пазах, полностью заполненных только одной фазой;

E_3 – ЭДС в относительных единицах, наводимая в катушках, которые находятся в пазах заполненных двумя фазами.

В таблице 2.3 приведены результаты расчёта обмоточных коэффициентов и коэффициентов дифференциального рассеяния $\sigma_d\%$.

Таблица 2.3 – Коэффициенты дифференциального рассеяния обмоток для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов

| Количество пазов, приходящихся на пару полюсов | Вид обмотки | | Обмоточный коэффициент | Коэффициент дифференциального рассеяния |
|--|-----------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| | | | $k_{об}$ | $\sigma_d\%$ |
| 18 | Стандартная 6-зонная | | 0,9598 | 1,418 |
| | Совмещённая 12-зонная | одно-двухслойная | 0,9865 | 0,959 |
| | | с разным распределением пазов | 0,9899 | 1,093 |
| 30 | Стандартная 6-зонная | | 0,9567 | 0,657 |
| | Совмещённая 12-зонная | одно-двухслойная | 0,9878 | 0,372 |
| | | с разным распределением пазов | 0,9890 | 0,429 |

Полученные результаты показывают, что оба варианта совмещённой обмотки имеют лучшие характеристики, чем аналогичные им стандартные обмотки, а именно совмещённая обмотка обладает большим обмоточным коэффициентом

для основной гармоники магнитного поля и меньшим коэффициентом дифференциального рассеяния.

Одно-двухслойный вариант исполнения совмещённой обмотки обладает меньшим коэффициентом дифференциального рассеяния, чем вариант с разным распределением обмоток по пазам в $1,093/0,959=1,13$ и $0,429/0,372=1,15$ раз для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, соответственно. Однако, такая обмотка несколько сложнее в точном подборе числа витков и требует заложения дополнительной изоляции в пазы с двумя фазами. Кроме того катушки, которые укладываются снизу по отношению к магнитному потоку, имеют более выгодное положение, чем катушке находящиеся сверху.

Основные результаты данных исследования опубликованы в статьях [66-68, 78].

2.3 Гармонический анализ магнитодвижущей силы совмещённой обмотки

Рассмотренный в предыдущем разделе, метод оценки относительного содержания ВПГ показал преимущества совмещённой 12-зонной обмотки по сравнению с аналогичной ей стандартной 6-зонной обмоткой, однако данный метод не даёт информации о содержании и величине конкретной гармоники, а только о их доли по сравнению с основной гармоникой.

Для дальнейшего совершенствования конструкции обмотки и определения наиболее благоприятного шага обмотки был проведён гармонический анализ МДС совмещённой 12-зонной обмотки. МДС фаз обмотки представлялись в виде ступенчатых функций, которые раскладывались в ряд Фурье, где каждая гармоника изменяется во времени и в пространстве. При этом в рассматриваемых случаях вводится допущение, что к обмотке подводится синусоидальное напряжение. МДС ν -гармоники фазы определяется:

$$F_{\phi\nu} = F_{\phi m\nu} \cdot \cos(\omega \cdot t + \xi_{\phi}) \cdot \cos(\nu \cdot (\varphi' + \varphi_{\phi})), \quad (2.17)$$

где ϕ – индекс, определяющий фазу обмотки;

$F_{\phi m\nu}$ – амплитуда МДС ν -гармоники фазы, А;

ξ_{ϕ} – начальная фаза тока, рад;

ν – номер гармоники;

ϕ' – угловая координата, рад;

ϕ_{ϕ}' – угловая координата магнитной оси фазы обмотки, рад.

Значения ξ_{ϕ} и ϕ_{ϕ}' для фаз совмещённой 12-зонной обмотки приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Пространственные и временные сдвиги МДС фаз обмотки

| Фаза обмотки (ϕ) | Начальные фазы токов ξ_{ϕ} | Угловая координата магнитной оси фазы об- мотки ϕ_{ϕ}' |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| А «звезды» А (a_Y) | 0 | 0 |
| В «звезды» В (b_Y) | $-2\pi/3$ | $-2\pi/3$ |
| С «звезды» С (c_Y) | $2\pi/3$ | $2\pi/3$ |
| А «треугольника» А (a_{Δ}) | $-\pi/6$ | $-\pi/6$ |
| В «треугольника» В (b_{Δ}) | $-5\pi/6$ | $-5\pi/6$ |
| С «треугольника» С (c_{Δ}) | $\pi/2$ | $\pi/2$ |

Для упрощения анализа воспользуемся известной методикой [19], которая предполагает введение коэффициентов распределения $k_{p\nu}$ и укорочения $k_{y\nu}$ ν -гармоник для определения амплитуды МДС:

$$F_{\phi m \nu} = k_{p\nu} \cdot k_{y\nu} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w \cdot I}{\nu \cdot p} = \frac{\sin\left(\frac{q \cdot \nu \cdot \pi \cdot p}{z}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\nu \cdot \pi \cdot p}{z}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\nu \cdot y \cdot \pi}{2 \cdot \tau}\right) \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w \cdot I}{\nu \cdot p}, \quad (2.18)$$

где w – число витков фазы;

I – действующее значение силы тока в фазе, А;

p – число пар полюсов;

q – число катушек в катушечной группе;

z – число пазов;

y – шаг обмотки;

τ – полюсное деление в относительных единицах.

Сложение МДС различных фаз обмотки проведём согласно принципу суперпозиции с учётом, их пространственного и временного сдвига:

$$\dot{F}_v = \dot{F}_{aYv} + \dot{F}_{bYv} + \dot{F}_{cYv} + \dot{F}_{a\Delta v} + \dot{F}_{b\Delta v} + \dot{F}_{c\Delta v}. \quad (2.19)$$

На рисунке 2.15 изображены МДС в воздушном зазоре АД с совмещённой и стандартной обмоткой для момента времени, когда ток фазы А достигает амплитудного значения.

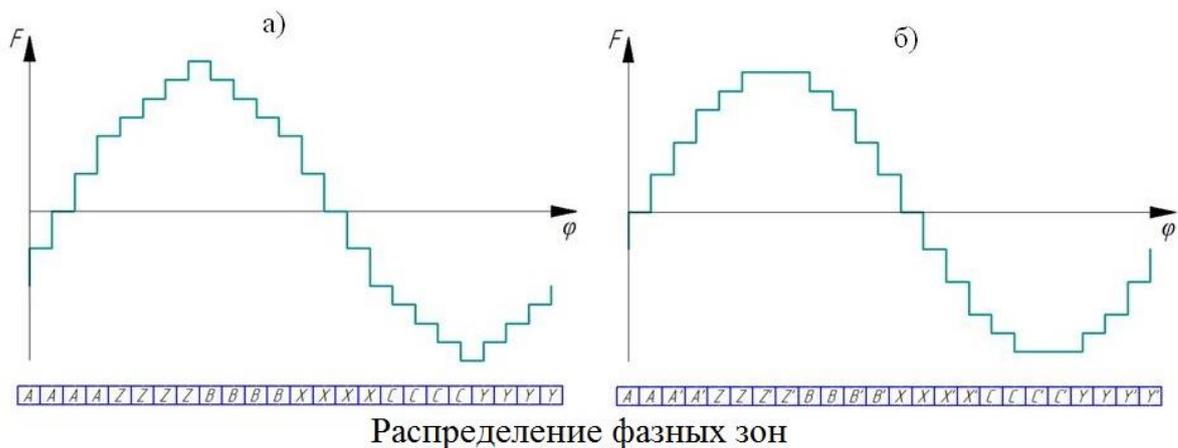


Рисунок 2.15 – Кривые МДС трёхфазных однослойных обмоток с $z=24$, $p=1$:

а) стандартной; б) совмещённой

Разложение в ряд Фурье проводилось с помощью программного пакета Maple, что позволяет представить гармоники в графическом виде при различных заданных конфигурациях обмотки, таких как число пазов, шаг обмотки и её распределение по пазам.

Для примера рассмотрим двигатель с 24 пазами и одной парой полюсов. Расчётные данные для построения МДС приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Расчётные параметры рассматриваемых обмоток

| Параметр обмотки | Стандартная | Совмещённая | |
|-----------------------|-------------|-------------|---------------|
| | | «звезда» | «треугольник» |
| q | 4 | 2 | 2 |
| y | 12 | 12 | 12 |
| $0,9 \cdot w \cdot I$ | 2 | 1 | 1 |

Для момента времени $t=0$, когда ток фазы А достигает амплитудного значения, МДС основной ($\nu=1$) и первых наиболее значимых ($\nu=5, 7, 11, 13$) гармоник, за исключением гармоник зубцового порядка ($\nu=23, 25$), для совмещённой и стандартной обмотки представлены на рисунке 2.16.

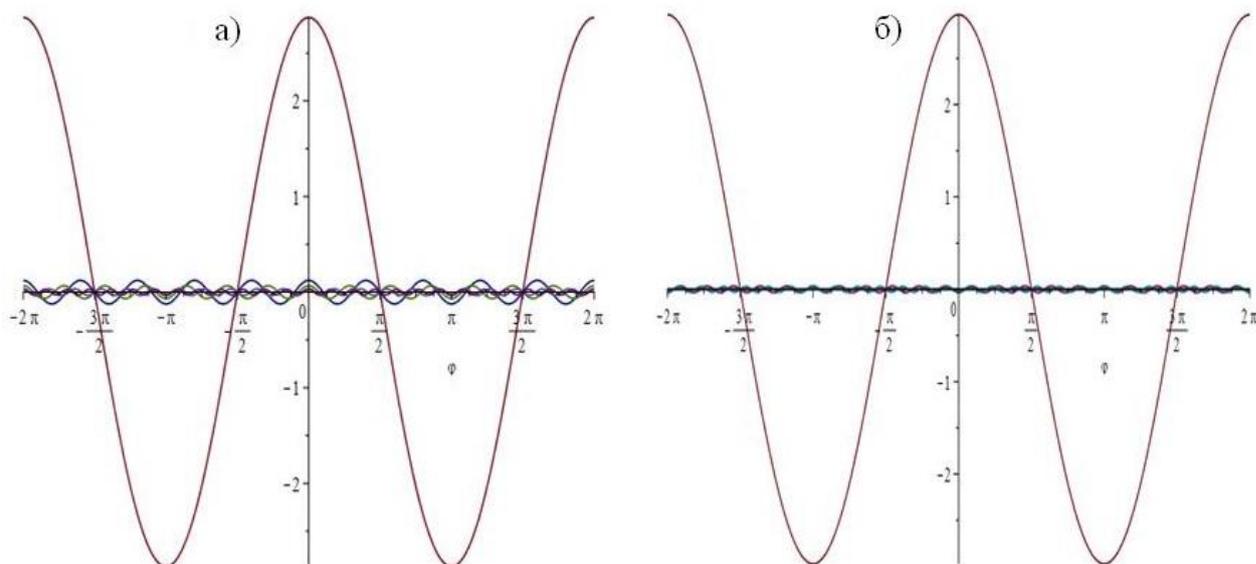


Рисунок 2.16 – Графики МДС основной и первых наиболее значимых гармоник, за исключением гармоник зубцового порядка:
а) стандартной обмотки; б) совмещённой обмотки

В таблице 2.6 представлены в % отношения амплитуды ВПГ по отношению к основной гармонике:

$$F_{mv\%} = \frac{F_{mv}}{F_{m1}} \cdot 100\%. \quad (2.20)$$

Таблица 2.6 – Сравнение амплитуд ВПГ по отношению к основной гармонике

| Номер гармоники ν | Амплитуда гармоники по отношению к основной, % | | |
|-----------------------|--|---------------------|----------|
| | Стандартная обмотка | Совмещённая обмотка | |
| | | $y=\tau$ | $y=\tau$ |
| 1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 5 | 4,29 | 0,00 | 0,00 |

Продолжение таблицы 2.6

| | | | |
|----|------|------|------|
| 7 | 2,35 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 1,20 | 1,20 | 0,16 |
| 13 | 1,01 | 1,01 | 0,13 |
| 17 | 0,97 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 1,13 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | 4,35 | 4,35 | 4,35 |
| 25 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |

Из полученных данных видно, что в МДС совмещённой 12-зонной обмотки количественно содержится меньше ВПГ, чем в МДС стандартной 6-зонной обмотки. При этом амплитуда оставшихся ВПГ по отношению к амплитуде основной гармоники не изменяется.

Кроме того, первыми наиболее значимым ВПГ (за исключением гармоник зубцового порядка) в МДС совмещённой 12-зонной обмотки, являются 11 и 13 гармоники, в то время как в МДС стандартной 6-зонной обмотки первыми наиболее значимыми являются 5 и 7. Поэтому выбор укороченного относительного шага $5/6$ с целью снижения влияния ВПГ, который получил распространение для двигателей со стандартной обмоткой [19], не является оптимальным. Для этой цели в совмещённой обмотке рекомендуется относительный шаг $11/12$.

Результаты данного исследования были опубликованы в статьях [58-59].

2.4 Разработка схемы совмещённой обмотки с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в магнитодвижущей силе

Уменьшить содержание ВПГ в МДС можно не только укорочением (или удлинением) шага, но также расширяя фазные зоны. Так для 6-зонных обмоток известны вариации, обладающие низким содержанием ВПГ и при этом обладающие полным шагом.

Для примера рассмотрим одну из таких вариаций стандартной обмотки. В данном патенте [87] представлена трёхфазная 6-зонная обмотка, для статора с 18 пазами, приходящимися на одну пару полюсов. Для такого статора с однослойной стандартной обмоткой каждая фаза в пределах полюсного деления распределялась бы в $q=z/2pm=18/6=3$ пазах. В предлагаемом же варианте фазы распределяются в 6 пазах, но с разным числом витков.

Катушки каждой фазы в пределах полюсного деления разделяются на две concentрические катушечные группы, которые выполняются «в развалку» (лобовые части отгибаются в разные стороны). Витки в катушечной группе распределены по следующему отношению:

$$w_{k1}/w_{k2}/w_{k3} = 1/2/3, \quad (2.21)$$

где w_{k1} , w_{k2} , w_{k3} – число витков во внутренней, средней и внешней катушках соответственно.

Схема такой обмотки изображена на рисунке 2.17 [87].

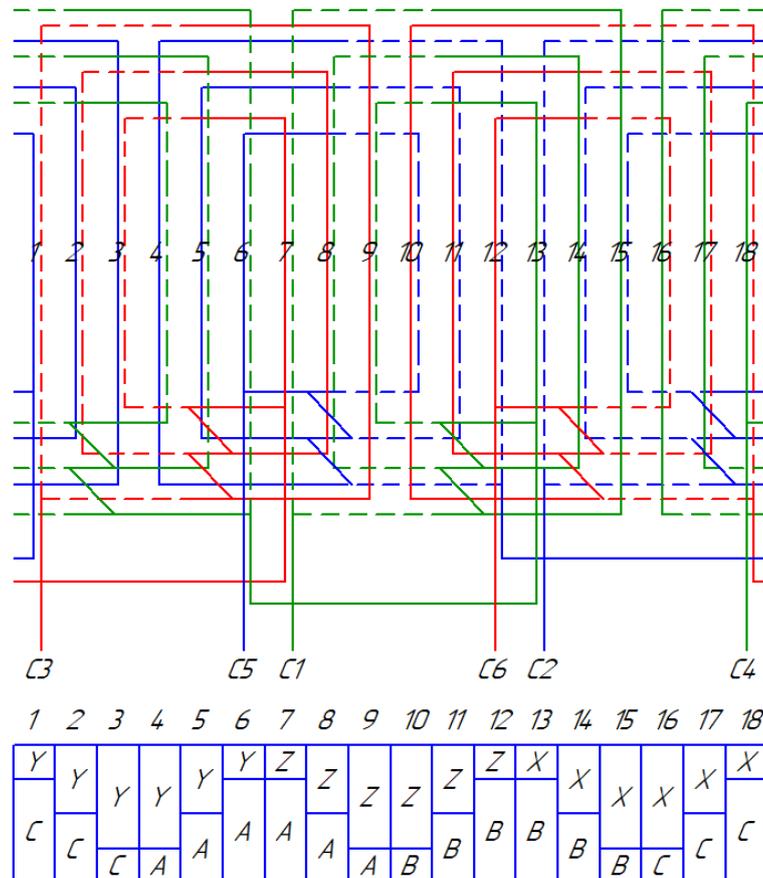


Рисунок 2.17 – Стандартная 6-зонная обмотка с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=18$ [87]

Достоинством обмотки, изображённой на рисунке 2.17, авторами указывается ослабление ВПГ магнитного поля. Причиной этому является в том, что благодаря большему распределению катушек по пазам, фазные зоны накладываются друг на друга. В каждом пазу создаётся суммарная МДС от двух катушек, токи которых обладают временным сдвигом. Такая суммарная МДС будет меньше, чем если бы в пазах находилась только катушка одной фазы, при условии, конечно же, равного числа витков в фазе. Однако ослабление МДС значительней для ВПГ, чем для основной гармоники.

Подобный приём, расширения фазных зон с целью ослабления ВПГ, можно применить для 12-зонных совмещённых обмоток. Рассмотрим, как можно составить двухслойную 12-зонную совмещённую обмотку для статоров с 24 пазами, приходящимися на пару полюсов ($z/p=24$). На данную обмотку был получен патент на изобретение (приложение Б) [84].

На рисунке 2.18 изображена 12-зонная однослойная концентрическая обмотка для статора с 24 пазами и 2 полюсами.

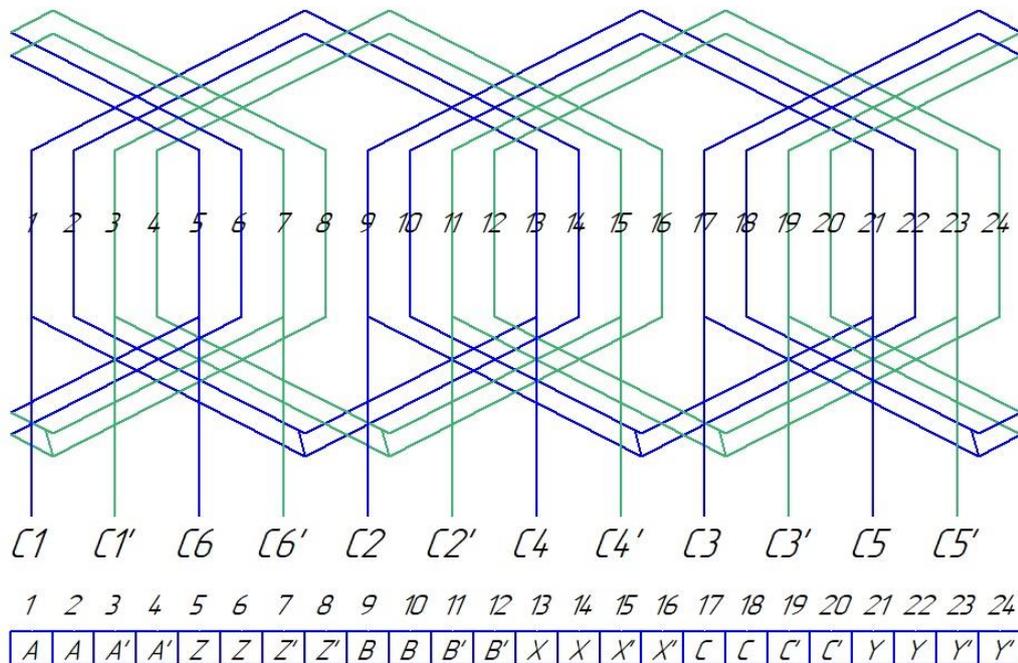


Рисунок 2.18 – Совмещённая 12-зонная однослойная обмотка при $2p=2$, $z=24$

Как видно из рисунка 2.18 для такой обмотки катушки каждой фазы распределены в пределах полюсного деления в $q=2$ пазах. Разделим эти катушки таким образом, чтобы они занимали уже 4 паза. На рисунке 2.19 изображена схема для одной фазы звезды (C1-C4) и треугольника (C1'-C4').

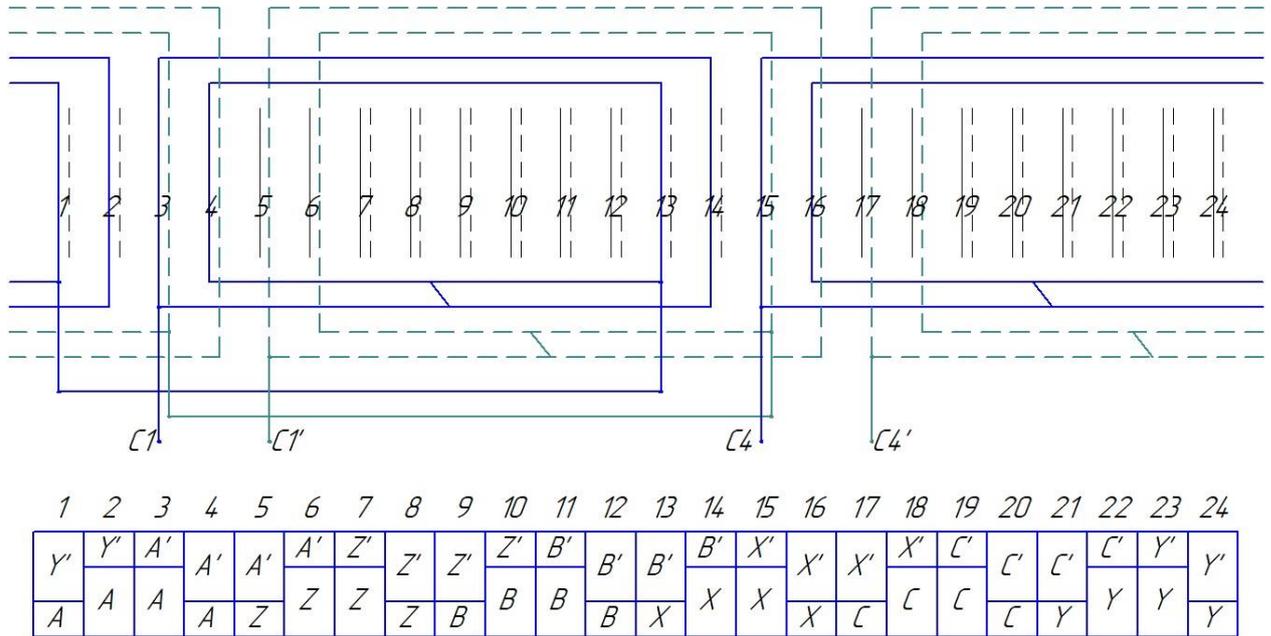


Рисунок 2.19 – Схема одной фазы звезды C1-C4 (сплошные линии) и треугольника C1'-C4' (пунктирные линии) совмещённой 12-зонной двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=24$

За счёт увеличения распределения обмотки, в пазу статора находятся проводники двух разных фаз, которые занимают неодинаковый объём паза. Причём доля содержания той или иной фазы в пазу подбиралась так, чтобы форма пространственной волны МДС была наиболее приближенной к синусоиде. Первые и четвёртые катушки будем считать внутренними, вторые и третьи внешними.

Для наиболее рационального выбора соотношения числа витков в пазу, принадлежащих той или иной фазе, решим оптимизационную задачу. Целью, которой является найти такое соотношение чисел витков, чтобы рассматриваемая модификация совмещённой обмотки имела наименьший коэффициент дифференциального рассеяния:

$$\sigma_{d\%} = \left(\frac{R_d^2}{R^2} - 1 \right) \cdot 100\% \rightarrow \min. \quad (2.22)$$

На рисунке 2.20 а изображена диаграмма Гёргеса для двухполюсной машины с 24 пазами с такой модифицированной совмещённой обмоткой. При её построении эффективное число проводников в пазу было выражено в относительных единицах $u_n=1$, тогда одна фаза в пазу занимает u проводников, а вторая $u_n-u=1-u$ проводников. При этом, при переходе от относительных к абсолютным величинам, соблюдалось соотношение чисел витков между «звездой» и «треугольником»:

$$\begin{cases} w_{\Delta} = w; \\ w_Y = \frac{w}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (2.23)$$

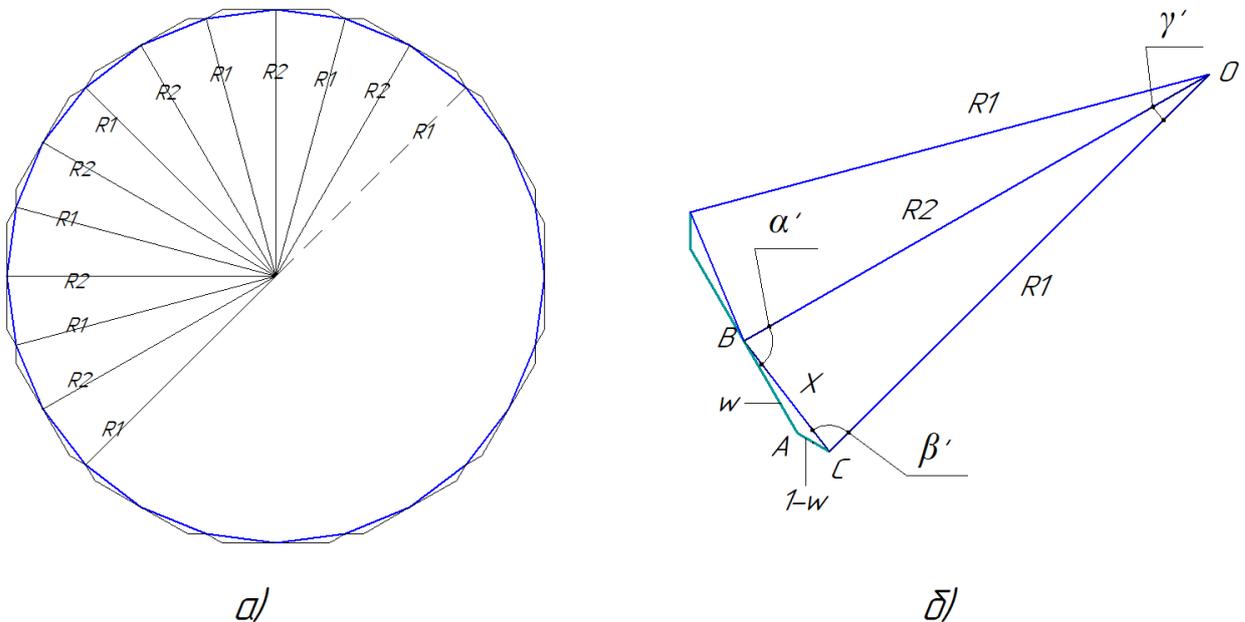


Рисунок 2.20 – Диаграмма Гёргеса совмещённой 12-зонной двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=24$ (а) и повторяющийся сегмент диаграммы (б)

Из диаграммы Гёргеса видно, что линейные нагрузки каждого паза (грань многоугольника – X) равны по величине, а радиусы инерции пазовых точек R_1 и R_2 сдвинуты между собой на один и тот же угол $\gamma' = 360/24 = 15^\circ$. Поэтому для простоты расчёта радиусов инерции можно рассматривать один повторяющийся сегмент диаграммы (рисунок 2.20 б).

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1^2 = R_2^2 + X^2 - 2 \cdot R_2 \cdot X \cdot \cos \alpha'; \\ R_2^2 = R_1^2 + X^2 - 2 \cdot R_1 \cdot X \cdot \cos \beta'; \\ X^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos \gamma', \end{cases} \quad (2.24)$$

где α' , β' и γ' – углы из диаграммы Гёргеса, изображённые на повторяющемся сегменте (рисунок 2.20 б).

Далее подставим в первое уравнение системы (2.24), выражение радиуса R_2 и получим иррациональное уравнение зависимости R_1 от X :

$$\sqrt{R_1^2 + X^2 - 2 \cdot R_1 \cdot X \cos \beta'} = \frac{X - R_1 \cos \beta'}{\cos \alpha'}. \quad (2.25)$$

Переменная X является функцией от количества эффективных проводников в пазу u и $1-u$. Так как число витков фазы w прямо пропорционально числу эффективных проводников в пазу u , то в дальнейшем перейдём от u к w .

Выражение для нахождения X можно получить из треугольника ABC по теореме косинусов. Известно, что X получается в результате векторного сложения двух векторов ампер-проводников различных фаз, сдвинутых на 30° , тогда угол между гранями AB и AC равен 150° :

$$X^2 = w^2 + (1 - w)^2 - 2 \cdot w \cdot (1 - w) \cos 150^\circ. \quad (2.26)$$

С помощью уравнений (2.24), (2.25) и (2.26) становится возможным найти радиусы инерции пазовых точек R_1 и R_2 , однако для нахождения коэффициента дифференциального рассеяния необходимо ещё определить обмоточный коэффициент для основной гармоники поля.

Известно, что обмоточный коэффициент характеризует уменьшение наводимого ЭДС в рассматриваемой фазе обмотки или же уменьшение МДС фазы, по сравнению с тем, если бы фаза обмотки была выполнена полным шагом и её катушки в пределах полюсного деления были бы уложены в один паз. В зависимости от конструкции обмотки ЭДС и МДС уменьшаются пропорционально, поэтому с целью нахождения обмоточного коэффициента можно рассмотреть наводимую ЭДС в фазах обмотки. Для этого воспользуемся способом, описанным в книге Жерве «Обмотки электрических машин» [40].

Так как обмотка выполнена полным шагом, то обмоточный коэффициент такой обмотки равен коэффициенту распределения. Чтобы найти коэффициент распределения представим ЭДС катушечной группы в виде геометрической суммы ЭДС пазов, изображённой на рисунке 2.21, где E_1 , E_2 , E_3 и E_4 соответственно ЭДС, наводимые в катушках первого, второго, третьего и четвертого паза одной фазы. Данный цикл повторяется для каждой фазы. E_q – суммарная ЭДС катушечной группы.

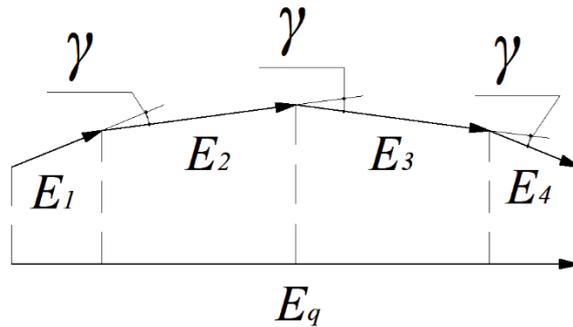


Рисунок 2.21 – ЭДС катушечной группы одной фазы совмещённой 12-зонной двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=24$

Для рассматриваемой обмотки обмоточный коэффициент в зависимости от соотношений чисел витков определяется по следующему уравнению:

$$k_{об} = k_p = \frac{2 \cdot (1 - w) \cdot \cos\left(\gamma \cdot \frac{q-1}{2}\right) + 2 \cdot w \cdot \cos\left(\gamma \cdot \frac{q-1}{2} - \gamma\right)}{2 \cdot (1 - w) + 2 \cdot w}, \quad (2.27)$$

где γ – угол, характеризующий сдвиг ЭДС катушек по пазам, рад:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z}. \quad (2.28)$$

Уравнение обмоточного коэффициента (2.27) подходит для первой, рабочей гармоники МДС. Для ВПГ обмоточный коэффициент будет определяться уравнением:

$$k_{об\nu} = \frac{2 \cdot (1 - w) \cdot \cos\left(\nu \cdot \gamma \cdot \frac{q-1}{2}\right) + 2 \cdot w \cdot \cos\left(\nu \cdot \gamma \cdot \frac{q-1}{2} - \nu \cdot \gamma\right)}{2 \cdot (1 - w) + 2 \cdot w}, \quad (2.29)$$

где ν – номер гармоники.

Теперь подставив найденные значения для радиусов инерции из уравнений (2.24) и (2.25) в уравнение (2.7) найдём полярный момент междупазовых точек диаграммы Гёргеса R_d^2 . Для нахождения радиуса окружности основной гармоники R подставим в уравнение (2.6), полученное из уравнения (2.27) значение обмоточного коэффициента. Из рассчитанных R_d^2 и R найдём коэффициент дифференциального рассеяния в процентах по уравнению (2.8). Полученные результаты расчётов при различном соотношении чисел витков приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Коэффициенты дифференциального рассеяния при различном соотношении витков для совмещённой 12-зонной двухслойной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=24$

| Число витков внешних катушек фазы $w_{к.внеш}=w$ | Число витков внутренних катушек фазы $w_{к.внутр}=I-w$ | Обмоточный коэффициент $k_{об}$ | Полярный момент инерции междупазовых точек диаграммы Гёргеса R_d^2 | Коэффициент дифференциального рассеяния $\sigma_d\%$ |
|---|---|---------------------------------|--|--|
| 0,95 | 0,05 | 0,9881 | 14,3285 | 0,5928 |
| 0,90 | 0,10 | 0,9847 | 14,2295 | 0,5844 |
| 0,85 | 0,15 | 0,9813 | 14,1312 | 0,5783 |
| 0,80 | 0,20 | 0,9779 | 14,0336 | 0,5745 |
| 0,75 | 0,25 | 0,9746 | 13,9366 | 0,5731 |
| 0,70 | 0,30 | 0,9712 | 13,8403 | 0,5741 |
| 0,65 | 0,35 | 0,9678 | 13,7446 | 0,5776 |
| 0,60 | 0,40 | 0,9644 | 13,6496 | 0,5836 |
| 0,55 | 0,45 | 0,9610 | 13,5553 | 0,5922 |
| 0,50 | 0,50 | 0,9577 | 13,4617 | 0,6033 |
| 0,45 | 0,55 | 0,9543 | 13,3687 | 0,6172 |
| 0,40 | 0,60 | 0,9509 | 13,2764 | 0,6338 |
| 0,35 | 0,65 | 0,9475 | 13,1848 | 0,6532 |
| 0,30 | 0,70 | 0,9441 | 13,0939 | 0,6754 |
| 0,25 | 0,75 | 0,9408 | 13,0036 | 0,7006 |
| 0,20 | 0,80 | 0,9374 | 12,9139 | 0,7287 |
| 0,15 | 0,85 | 0,9340 | 12,8250 | 0,7599 |
| 0,10 | 0,90 | 0,9306 | 12,7367 | 0,7941 |
| 0,05 | 0,95 | 0,9273 | 12,6491 | 0,8315 |

Из таблицы 2.8 видно, что наименьший коэффициент дифференциального рассеяния для совмещённой 12-зонной обмотки с расширенными фазными зонами при $2p=2$, $z=24$, будет если 75% паза занимают проводники внешних катушек $w_{к.внеш}=w$, а 25% внутренних $w_{к.внутр}=I-w$, то есть при соотношении витков внешних

катушек к внутренним равном 3. Для большей наглядности на рисунке 2.22 приведена зависимость коэффициента дифференциального рассеяния от относительного числа витков внешних катушек $w_{к.внеш}$ каждой фазы.

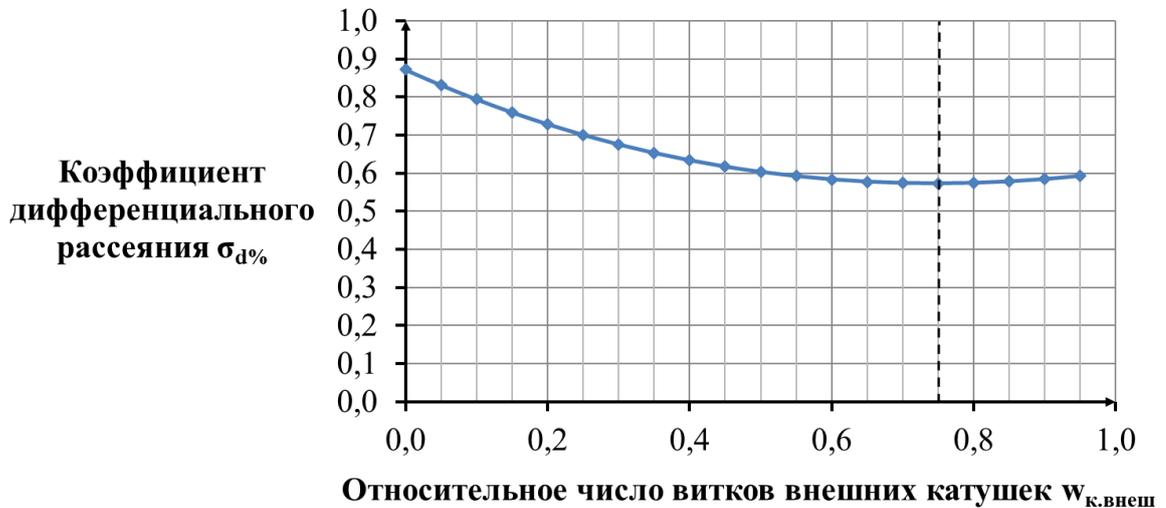


Рисунок 2.22 – Зависимость коэффициента дифференциального рассеяния от относительного числа витков внешних катушек

К недостатку данной обмотки можно отнести сложность точного подбора оптимального соотношения внешних и внутренних катушек. Однако, как видно из рисунка 2.22 и таблицы 2.7, небольшое отклонение от $w_{к.внеш}/w_{к.внутр}=3$ не сильно сказывается на увеличении коэффициента дифференциального рассеяния. Что упрощает применение такой совмещённой 12-зонной обмотки на практике. Так для примера, если подобрать отношение чисел витков $w_{к.внеш}/w_{к.внутр}=4$, то $\sigma_{д\%}$ увеличиться в $0,5745/0,5731=1,002$ раза.

Проведём гармонический анализ для рассматриваемого варианта совмещённой 12-зонной обмотки с расширенными фазными зонами по методике, описанной в разделе 2.2. И сравним её со стандартной 6-зонной однослойной обмоткой и совмещённой 12-зонной двухслойной обмоткой с шагом $y=(11/12)\cdot\tau$.

В таблице 2.8 представлены расчётные данные в процентах амплитуд ВПГ МДС по отношению к основной гармонике для сравниваемых обмоток.

Таблица 2.8 – Значения амплитуды ВПГ МДС по отношению к основной гармонике для 6-зонной однослойной, 12-зонной двухслойной укороченной и 12-зонной с расширенными фазными зонами обмоток при $z/p=24$

| Номер гармоники ν | Амплитуда гармоники по отношению к основной, % | | |
|-----------------------|--|--|-------------------------------|
| | 6-зонная однослойная обмотка | 12-зонные обмотки | |
| | | Двухслойная укороченная $y=(11/12)\cdot\tau$ | С расширенными фазными зонами |
| 1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 5 | 4,29 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 2,35 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 1,20 | 0,16 | 0,02 |
| 13 | 1,01 | 0,13 | 0,02 |
| 17 | 0,97 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 1,13 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | 4,35 | 4,35 | 4,35 |
| 25 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |

По результатам расчёта из таблицы 2.8 видно, что в МДС 12-зонной обмотки с расширенными фазными зонами амплитуды 11 и 13 гармоник соответственно в $0,16/0,02=8$ и $0,13/0,02=6,5$ раз меньше, чем в МДС 12-зонной укороченной обмоткой с шагом $y=(11/12)\cdot\tau$. Кроме того, стоит отметить, что двухслойная обмотка с расширенными фазными зонами имеет более простую технологию укладки, чем двухслойная укороченная, так как в ней обе стороны катушек находятся в одном слое, а значит не нужно поднимать одну из них при укладке. При изготовлении такой обмотки вначале в предварительно подготовленные пазы укладываются все катушки одной обмотки («звезды», либо «треугольника»), затем укладываются изоляция и катушки второй обмотки.

Исследования по данной обмотке были описаны в статьях [58, 78].

Выводы по главе:

1. Технология укладки однослойных совмещённых обмоток существенно не отличается от технологии укладки стандартных обмоток. Однако некоторую сложность в изготовлении представляют двухслойные и трёхслойные обмотки. Предложены новые схемы совмещённых обмоток, обладающие более простой технологией укладки, чем известные варианты двухслойных и трёхслойных обмоток, но при этом имеющие те же электромагнитные свойства.

2. Показано, что в МДС совмещённой обмотки содержится меньше ВПГ, чем в МДС стандартной. Причём с увеличением числа пазов, приходящихся на пару полюсов, относительное содержание ВПГ у совмещённой обмотки снижается быстрее. Первыми наиболее значимыми ВПГ в МДС таких обмоток являются 11 и 13 гармоники, а значит относительный шаг 11/12 является предпочтительным для двухслойных укороченных обмоток.

3. Результаты исследований относительного содержания ВПГ для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, показывают, что оба варианта совмещённой обмотки и одно-двухслойный и с разным распределением пазов между «звездой» и «треугольником» обладают меньшим коэффициентом дифференциального рассеяния, чем аналогичные им стандартные обмотки. Причём первый из них превосходит второй по данному критерию в $1,093/0,959=1,13$ и $0,429/0,372=1,15$ раз для статоров с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов, соответственно.

4. Разработана схема двухслойной совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами. Применение такой обмотки практически полностью устранить 11 и 13 гармоники МДС, уменьшая их амплитуды в 60 и 50,5 раз по сравнению со стандартной обмоткой, а по сравнению с двухслойной укороченной совмещённой обмоткой в 8 и 6,5 раз соответственно.

ГЛАВА 3. РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТАТОРЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКИ

Как было установлено ранее, вторым потенциальным преимуществом применения совмещённых 12-зонных обмоток в АД является снижение электрических потерь в обмотке статора. Предположительно из-за увеличения обмоточного коэффициента $k_{об}$, фазы таких обмоток можно выполнять из меньшего числа витков, чем фазы стандартных 6-зонных обмоток, что может привести как к экономии обмоточного провода, так и к снижению потерь активной мощности. Кроме того, увеличение обмоточного коэффициента позволяет при сохранении коэффициента заполнения паза k_z увеличить сечение провода, в этом случае стоит ожидать большего снижения потерь, но за счёт изменения расхода материала. Однако переход от одной конструкции обмотки к другой потенциально может приводить к увеличению, либо уменьшению ширины катушки. Поэтому при анализе изменения электрических потерь в обмотке статора необходимо учитывать три фактора:

1. Изменение числа витков фазы;
2. Изменение сечения обмоточного провода;
3. Изменение ширины катушки (шага катушки).

3.1 Разработка методики исследования изменения электрических потерь в статоре при изменении конструкции обмотки

Электрические потери в обмотке статора $P_{эл1}$ зависят от нагрузки двигателя и при номинальных условиях, в зависимости от типа двигателя, может вносить наибольший вклад в сумму всех потерь. Так, например, для двигателя АИР71В4 их доля составляет примерно 55% [16].

Электрические потери $P_{эл1}$, Вт зависят и от активного сопротивления обмотки:

$$P_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r, \quad (3.1)$$

где I_1 – сила тока, протекающего по фазе обмотки статора, А;

r – активное сопротивление фазы статора, Ом.

При использовании иной конструкции обмотки кроме её сопротивления, может изменяться и сила тока. К примеру, применение параллельного соединения катушек приводит к снижению силы тока в них, но при этом они обладают большим сопротивлением, чем при последовательном соединении, в результате суммарные потери в них не изменяются. Поэтому при разработке методики для сравнения изменения электрических потерь в статоре учитывались различия конструкции. Методика представленная ниже подходит для 12-зонной совмещённой обмотки с параллельным соединением «звезды» и «треугольника».

Фазы «треугольника» и «звезды» совмещённой обмотки имеют разное количество витков и выполняются обмоточными проводами разного сечения. В случае, если фазы «треугольника» и «звезды» одинаково распределены по пазам, то числа витков в них должны удовлетворять равенству (1.5), а сечение обмоточных проводов равенству (1.6). Такое различие обмоток усложняет анализ, так как сопротивления «треугольника» и «звезды» будут также отличаться между собой. Поэтому с целью упрощения анализа приведём совмещённую обмотку к эквивалентной ей стандартной.

Пользуясь известными формулами из электротехники [13] преобразуем «треугольник» в эквивалентную «звезду». Приняв условие, что сопротивления фаз «звезды» ($Z_{AY}=Z_{BY}=Z_{CY}=Z_Y$) равны между собой, также, как и сопротивления фаз «треугольника» ($Z_{AD}=Z_{BD}=Z_{CD}=Z_D$), получим промежуточную схему с параллельными ветвями (рисунок 3.1 б).

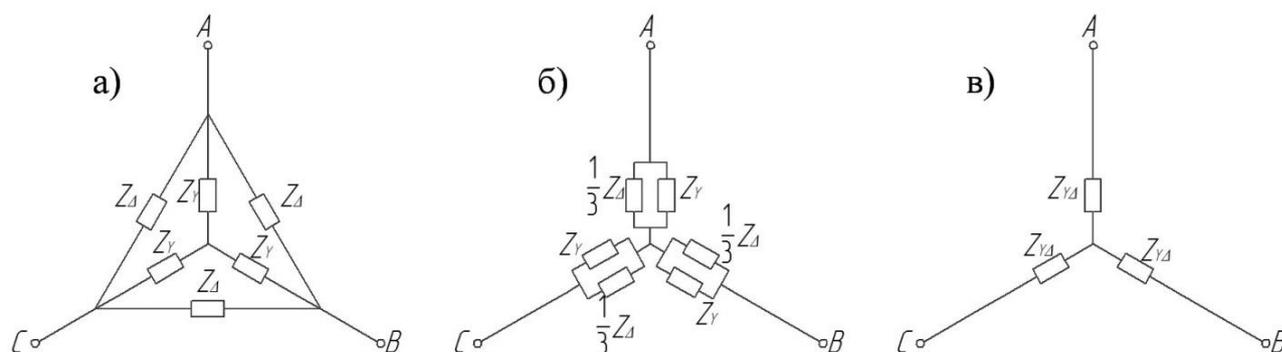


Рисунок 3.1 – Преобразование схемы соединения совмещённой обмотки:

а) исходная схема; б) промежуточная схема; в) преобразованная эквивалентная схема

Если при изготовлении совмещённой обмотки соблюдать равенство (1.5) и (1.6), то активные сопротивления «треугольника» будут в три раза больше активных сопротивлений «звезды». Известно, что при прочих равных условиях индуктивные сопротивления в асинхронном двигателе [16, 19] пропорциональны квадрату числа витков w^2 , а значит при соблюдении равенства (1.5) индуктивные сопротивления «треугольника» будут также в три раза больше сопротивлений «звезды». Из выше сказанного получим следующее соотношение между сопротивлениями:

$$z_Y = \frac{1}{3} \cdot z_{\Delta}, \quad (3.2)$$

где z_Y и z_{Δ} – полные сопротивления фазы «звезды» и «треугольника» соответственно, Ом.

Продолжив преобразование схемы, перейдём от реальных сопротивлений совмещённой обмотки к эквивалентным (рисунок 3.1 в):

$$z_{Y\Delta} = \frac{z_Y \cdot \frac{1}{3} \cdot z_{\Delta}}{z_Y + \frac{1}{3} \cdot z_{\Delta}} = \frac{z_Y}{2}, \quad (3.3)$$

$$r_{Y\Delta} = \frac{r_Y}{2} = \frac{r_{\Delta}}{6}, \quad (3.4)$$

где $z_{Y\Delta}$ и $r_{Y\Delta}$ – эквивалентные полное и активное сопротивления совмещённой обмотки, преобразованной в «звезду», Ом.

Получившуюся эквивалентную схему совмещённой обмотки удобно использовать для определения изменения электрических потерь при переходе от стандартной 6-зонной обмоткой, соединённой по схеме «звезда», к совмещённой 12-зонной обмотке с параллельным соединением «звезды» и «треугольника».

При одинаковом значении тока в обеих обмотках, электрические потери будут тем меньше, чем меньше их активное сопротивление. Поэтому далее, изменение электрических потерь в статоре, будем оценивать по разнице эквивалентных активных сопротивлений совмещённой и стандартной обмоток Δr в %:

$$\Delta r = \frac{r_0 - r_{Y\Delta}}{r_0} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

где r_0 – активное сопротивление стандартной обмотки, Ом.

При $\Delta r > 0$ – совмещённая обмотка предпочтительней стандартной ($r_0 > r_{Y\Delta}$);

$\Delta r = 0$ – совмещённая и стандартная обмотки имеют равные эквивалентные активные сопротивления;

$\Delta r < 0$ – совмещённая обмотка имеет эквивалентное активное сопротивление больше, чем стандартная.

Если все проводники каждой из фаз соединены последовательно и выполняются одним проводом, то активное сопротивление обмотки зависит от материала, из которого выполнен провод, то есть его удельного сопротивления ρ , Ом·мм²/м, числа витков фазы w , средней длины витка l_{cp} , м и площади поперечного сечения провода s , мм².

$$r = \rho \cdot \frac{l_{cp} \cdot w}{s} = \rho \cdot \frac{l_{cp} \cdot w_{\text{эф}}}{s \cdot k_{об}}, \quad (3.6)$$

где $w_{\text{эф}} = w \cdot k_{об}$ – число эффективных витков фазы обмотки.

Если же обмотка имеет, a параллельных ветвей, состоящих из $n_{эл}$ одного сечения параллельных проводников (элементарных проводников), то формула 3.6 примет вид:

$$r = \rho \cdot \frac{l_{cp} \cdot w_{\text{эф}}}{s \cdot k_{об} \cdot n_{эл} \cdot a}. \quad (3.7)$$

Однако, в дальнейшем для удобства будем считать, что обмотки выполнены без параллельных ветвей проводом одного сечения. При необходимости несложно учесть в расчётах и эти различия конструкции.

Средняя длина витка l_{cp} представляет собой удвоенную сумму длины проводника в пазу l_n , м и в лобовой части l_l , м:

$$l_{cp} = 2 \cdot (l_n + l_l). \quad (3.8)$$

Если в статоре пазы выполнены без скоса, то длина l_n будет равна длине сердечника статора l_l , м. Длина же лобовой части зависит от нескольких факторов в том числе и от конструкции обмотки, в приближённом виде для всыпной обмотки статора длина её лобовой части определяется по следующей эмпирической формуле [94]:

$$l_l = K_l \cdot b_{кт} + 2 \cdot B, \quad (3.9)$$

где K_l – коэффициент, зависящий от числа полюсов $2p$ и наличия изоляции лобовых частей (таблица 3.1 [94]);

B – длина влёта прямолинейной части катушек от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м;

$b_{кт}$ – средняя ширина катушки, м:

$$b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_n)}{2 \cdot p} \cdot \beta_{кт}, \quad (3.10)$$

где D – внутренний диаметр статора, м;

h_n – высота паза, м;

$\beta_{кт}$ – укорочение шага обмотки.

Таблица 3.1 – Значение эмпирических параметров, определяющих длину лобовой части обмотки [94]

| Число полюсов $2p$ | Коэффициент K_l | | Длина влёта катушки B , м | |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|---|--|
| | Лобовые части не изолированы | Лобовые части изолированы лентой | Обмотка укладывается до запрессовки сердечника в корпус | Обмотка укладывается после запрессовки сердечника в корпус |
| 2 | 1,2 | 1,45 | 0,010 | 0,015 |
| 4 | 1,3 | 1,55 | | |
| 6 | 1,4 | 1,75 | | |
| ≥ 8 | 1,5 | 1,9 | | |

На рисунке 3.2 изображены геометрические размеры катушки, определяющие её длину.

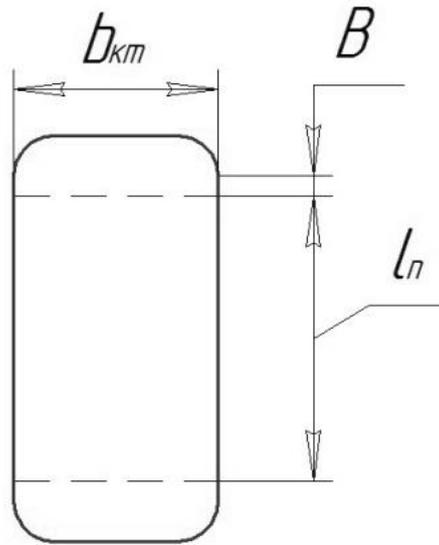


Рисунок 3.2 – Геометрические размеры катушки

Обмотка может быть равносекционной, тогда длины всех её катушек равны, либо она может быть концентрической, в этом случае катушки катушечной группы будут иметь разную длину. Для таких обмоток удобно брать длину катушек, предварительно преобразовав их к одному среднему значению. Также стоит отметить, что, если обмотка выполнена «в развалку», шаг её катушек может отличаться от диаметрального и иметь некоторое относительное укорочение $\beta_{км}$. Хотя расположение магнитных осей при этом будут оставаться таким же, как и при катушках с диаметральным шагом. Следовательно, обмотки «в развалку», сохраняя свои электромагнитные свойства потенциально будут обладать меньшим сопротивлением, чем обмотки лобовые части, которых отогнуты в одну сторону.

Если при перерасчёте сечения обмотки статора со стандартной на совмещённую придерживаться условия одинаковости коэффициента заполнения паза статора, то соотношение между сечениями стандартной s_0 и эквивалентной приведённой совмещённой обмотки $s_{Y\Delta}$ будет:

$$\frac{s_0}{s_{Y\Delta}} = \frac{k_{о\delta Y\Delta}}{k_{о\delta 0}}, \quad (3.11)$$

где $k_{о\delta Y\Delta}$ и $k_{о\delta 0}$ – обмоточные коэффициенты совмещённой и стандартной обмоток.

Введём величину $s_{эф}$, характеризующую сечение провода, при условии, что коэффициент заполнения паза остаётся прежним:

$$s_{\text{эф}} = \frac{s}{k_{\text{об}}}. \quad (3.12)$$

Учтя в формуле (3.6) вышеизложенные выводы получим приближённую формулу для определения активного сопротивления всыпной обмотки статора:

$$r = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_{\text{эф}}}{s_{\text{эф}}} \cdot \frac{l_1 + K_l \cdot \tau' \cdot \beta_{\text{км}} + 2 \cdot B}{k_{\text{об}}^2}, \quad (3.13)$$

где τ' – длина полюсного деления на уровне середины пазов статора, м:

$$\tau' = \frac{\pi \cdot (D + h_n)}{2 \cdot p}. \quad (3.14)$$

В выражение (3.13) $2 \cdot \rho \cdot w_{\text{эф}}/s_{\text{эф}}$ – первая составляющая активного сопротивления не зависит от вида обмотки и при переходе от стандартной 6-зонной обмотки к совмещённой 12-зонной остаётся неизменной, поэтому при сравнении различных обмоток рассмотрим вторую составляющую $(l_1 + K_l \cdot \tau' \cdot \beta + 2 \cdot B)/k_{\text{об}}^2$.

Из формул (3.13) и (3.14) можно заметить, что влияние длины лобовой части на сопротивление провода тем больше, чем больше диаметр статора D по отношению к его длине l_1 . По этой причине удобно сравнивать обмотки при различных значениях коэффициента λ , характеризующего отношение главных размеров машины:

$$\lambda = \frac{l_1}{\tau}, \quad (3.15)$$

где τ – длина полюсного деления определяется по формуле, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}. \quad (3.16)$$

Если пренебречь длиной вылета катушки B и размерами паза h_n , которые обычно малы по сравнению с l_1 и D , то получим приближительную зависимость сопротивления от λ :

$$r \propto \tau \cdot \frac{\lambda + K_l \cdot \beta_{\text{КТ}}}{k_{\text{об}}^2}. \quad (3.17)$$

Подставим в формулу (3.5) выражение из зависимости (3.17) и умножив на 100% получим формулу для упрощенного расчёта изменения эквивалентного активного сопротивления в %:

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2 \cdot (\lambda + K_L \cdot \beta_{КТY\Delta})}{k_{обY\Delta}^2 \cdot (\lambda + K_L \cdot \beta_{КТ0})} \right) \cdot 100\%, \quad (3.18)$$

где $\beta_{КТY\Delta}$ и $\beta_{КТ0}$ – относительный шаг катушки совмещённой 12-зонной и стандартной 6-зонной обмоток соответственно.

Полный расчёт с учётом B и h_n стоит проводить по нижеследующим зависимостям:

$$r \propto \tau' \cdot \frac{\lambda' + K_L \cdot \beta_{КТ}}{k_{об}^2}, \quad (3.19)$$

где $\lambda' = (l_1 + 2 \cdot B) / \tau'$.

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2 \cdot (\lambda' + K_L \cdot \beta_{КТY\Delta})}{k_{обY\Delta}^2 \cdot (\lambda' + K_L \cdot \beta_{КТ0})} \right) \cdot 100\%. \quad (3.20)$$

3.2 Оценка изменения электрических потерь в статоре при замене однослойной стандартной 6-зонной обмотки на совмещённую 12-зонную

Как было установлено в первой главе, а промышленности и сельском хозяйстве преимущественно применяются АД сравнительно небольшой мощности. Исследования проводилось по справочным данным [91] двигателей серии АИР основного исполнения мощностью от 0,55 до 11 кВт. Практически во всех двигателях данного ряда обмотка статора выполнена однослойной с целым числом пазов, приходящихся на полюс и фазу q . Исключением являются АИР160S6, который имеет двухслойную обмотку и двигатель АИР80В8, обмотка которого выполнена с дробным числом q . В данном исследовании они не рассматривались. Стоит также отметить, что в зависимости от производителя обмоточные данные двигателей могут отличаться.

В рассматриваемых двигателях катушки обмотки статора в основном имеют концентрическое исполнение, при этом лобовые части каждой из катушечных групп фазы могут быть отогнуты либо в одну сторону, либо в разные – «в развалку», от чего будет зависеть длина обмотки. На рисунке 3.3 приведён пример направлений отгиба лобовых частей таких обмоток для $q=2$ и $q=3$.

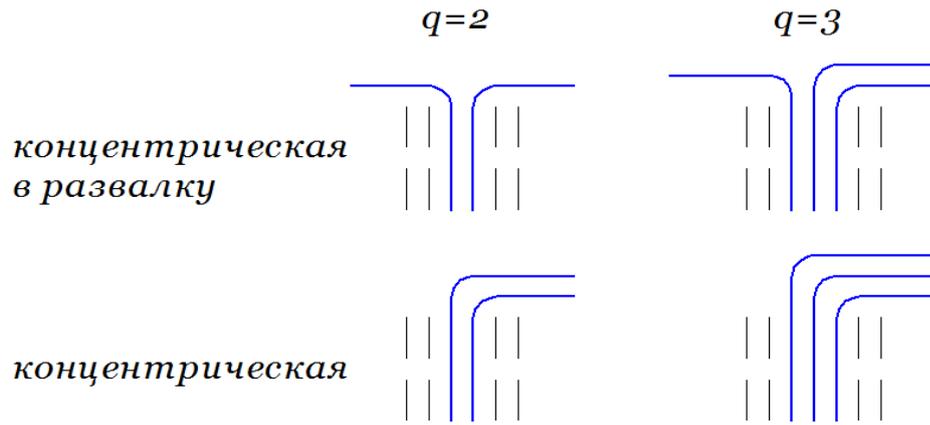


Рисунок 3.3 – Направления отгибов лобовых частей обмоток при $q=2$ и $q=3$

В качестве сравнения со стандартной обмоткой предлагается совмещённая обмотка с параллельным соединением фаз «звезды» и «треугольника». Если стандартная обмотка с чётным q выполнена «в развалку», то при сравнении рассматривалась совмещённая обмотка, выполненная также «в развалку». На рисунке 3.4 приведён пример такой обмотки для статора с 24 пазами и 2 полюсами.

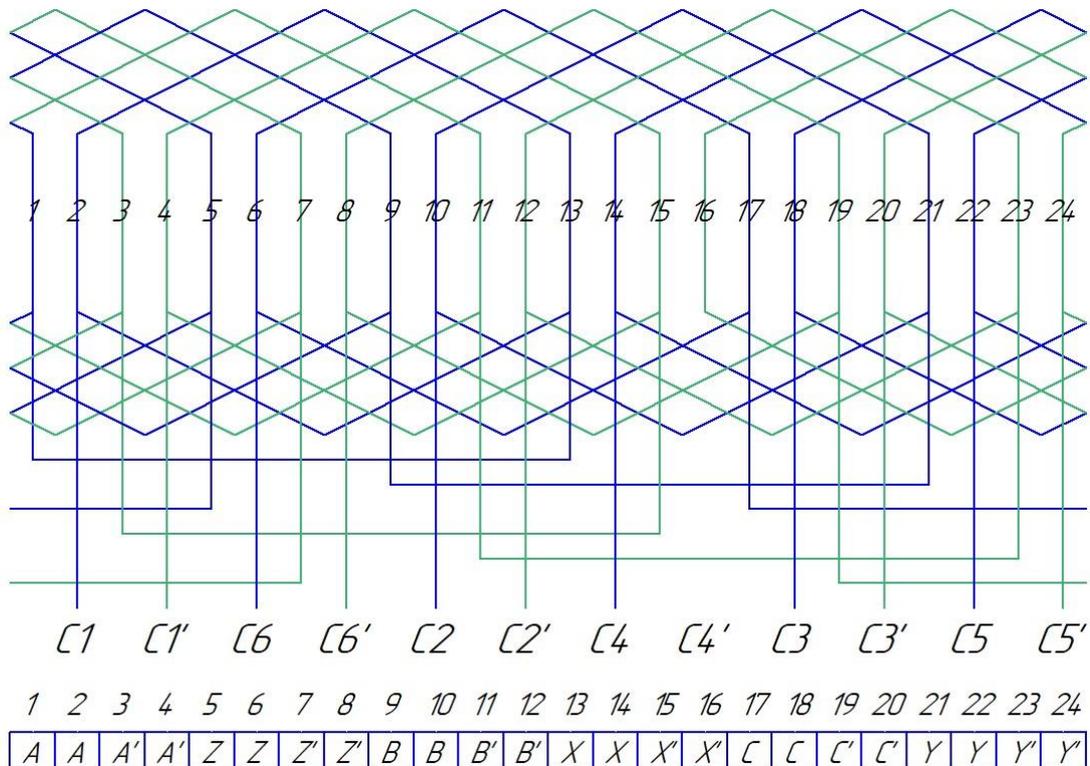


Рисунок 3.4 – Совмещённая 12-зонная однослойная обмотка «в развалку» при

$$2p=2, z=24$$

Стандартные 6-зонные обмотки с $q=3$ сравнивались с одно-двухслойной совмещённой 12-зонной обмоткой. Пример такой обмотки для статора с 36 пазами и 4 полюсами был изображён на рисунке 2.7.

Для анализа разобьём исследуемые двигатели с однослойной обмоткой на две группы. **К первой группе** относятся 27 двигателей с обмоткой «в развалку», для которых при переходе от стандартной обмотки к совмещённой изменяется длина катушки. При этом получающаяся разница эквивалентных сопротивлений обмоток Δr зависит от значения коэффициента λ . В двигателях из данной группы выделим шесть подгрупп, в которых стандартные 6-зонные обмотки имеют одинаковую конструкцию, равное число полюсов $2p$ и число пазов, приходящихся на полюс и фазу q :

1) $2p=6, q=2$; 2) $2p=8, q=2$; 3) $2p=4, q=3$; 4) $2p=6, q=3$; 5) $2p=2, q=4$; 6) $2p=2, q=6$.

Чаще всего обмотка двигателей укладывается в пазы уже запрессованного сердечника статора, тогда согласно [91] значение величины B возьмём равным 0,015 м. Значение же коэффициента K_l может быть различным, поэтому рассмотрим два крайних случая из таблицы 3.1.

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены разницы эквивалентных активных сопротивлений стандартной 6-зонной и совмещённой 12-зонной обмотки в зависимости от значений λ .

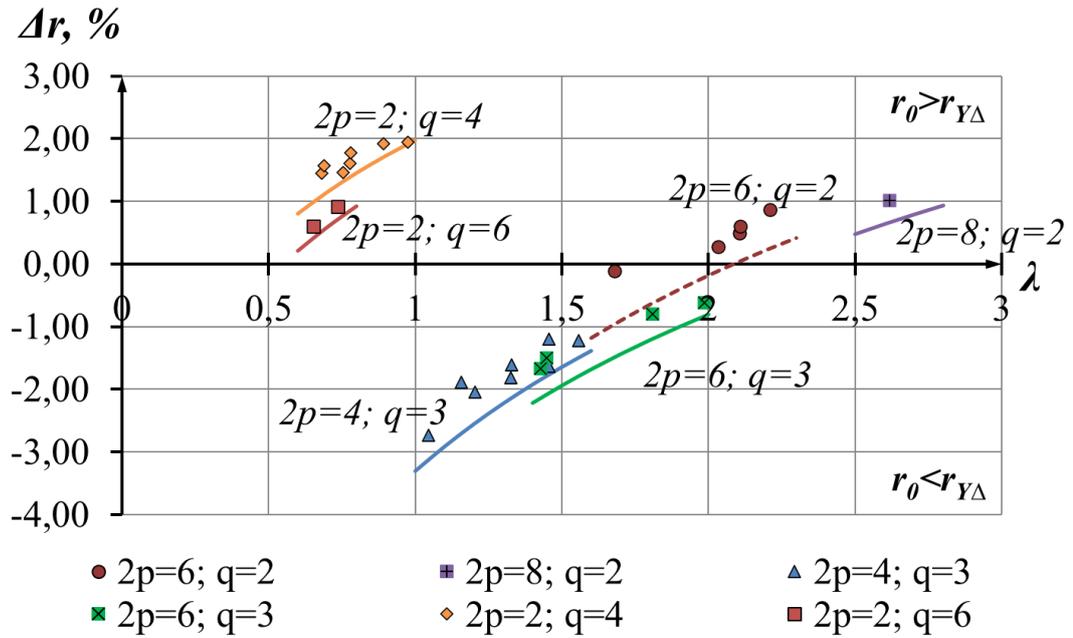


Рисунок 3.5 – Сравнение эквивалентных активных сопротивлений обмоток в зависимости от λ при минимальной изоляции лобовых частей

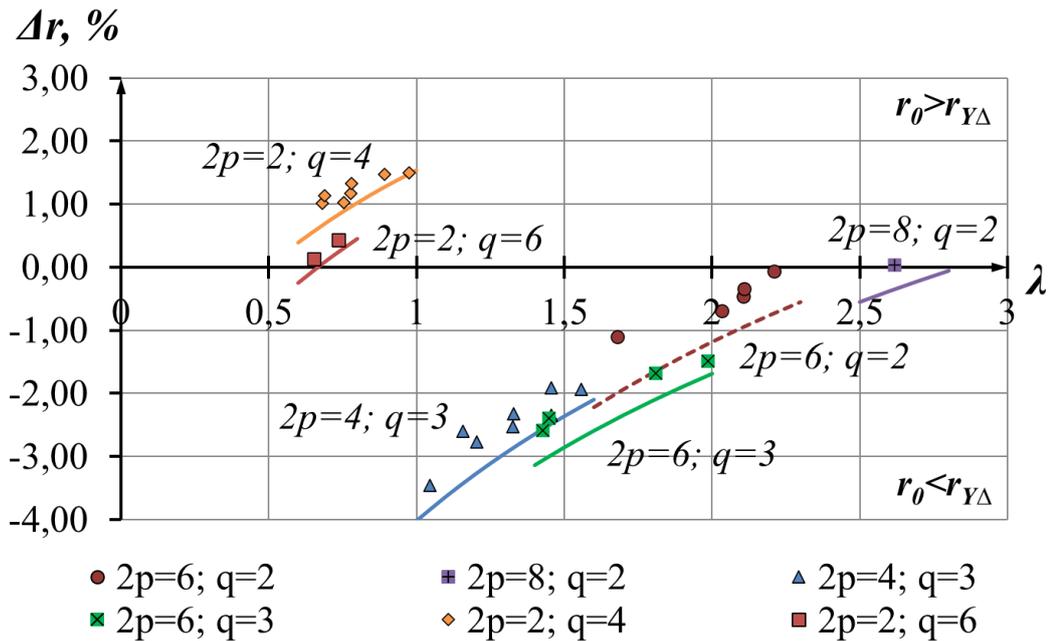


Рисунок 3.6 – Сравнение эквивалентных активных сопротивлений обмоток в зависимости от λ с изолированными лобовыми частями

Линиями на графике изображены зависимости, полученные с помощью оценки сопротивлений по упрощенной формуле (3.18), маркерами рядом с зависимостями даются значения Δr при сравнении с помощью полного расчёта (3.20).

В таблице 3.2 приведены двигатели из первой группы с обмоткой «в развалку», для которых применение совмещённой обмотки теоретически приведёт к снижению электрических потерь в обмотке статора.

Таблица 3.2 – Асинхронные двигатели серии АИР с обмоткой «в развалку»

| Тип | Мощность P_1 , кВт | Число полюсов $2p$ | q | Δr , % | |
|----------|-------------------------|--------------------------|-----|--|--|
| | | | | Лобовые ча- сти не изоли- рованы | Лобовые ча- сти изолиро- ваны лентой |
| АИР71В6 | 0,55 | 6 | 2 | 0,87 | -0,06 |
| АИР71А2 | 0,75 | 2 | 4 | 1,57 | 1,13 |
| АИР71В2 | 1,1 | 2 | 4 | 1,77 | 1,33 |
| АИР80В6 | 1,1 | 6 | 2 | 0,61 | -0,34 |
| АИР80А2 | 1,5 | 2 | 4 | 1,45 | 1,02 |
| АИР90L6 | 1,5 | 6 | 2 | 0,50 | -0,46 |
| АИР100L8 | 1,5 | 8 | 2 | 1,01 | 0,03 |
| АИР80В2 | 2,2 | 2 | 4 | 1,92 | 1,48 |
| АИР100L6 | 2,2 | 6 | 2 | 0,28 | -0,69 |
| АИР90L2 | 3 | 2 | 4 | 1,61 | 1,17 |
| АИР100S2 | 4 | 2 | 4 | 1,46 | 1,03 |
| АИР100L2 | 5,5 | 2 | 4 | 1,94 | 1,50 |
| АИР112М2 | 7,5 | 2 | 6 | 0,91 | 0,43 |
| АИР132М2 | 11 | 2 | 6 | 0,60 | 0,13 |

Во вторую группу были включены двигатели с обмотками, у которых стороны лобовых частей направлены в одну сторону и укорочение шага катушки не происходит $\beta_{km}=1$. Применении в таких двигателях совмещённой 12-зонной обмотки может привести к снижению эквивалентного активного сопротивления

независимо от λ , за счёт намотки из катушек с меньшим числом витков, но с прежним заполнением паза медью:

$$\Delta r = \left(1 - \frac{k_{об0}^2}{k_{обY\Delta}^2} \right) \cdot 100\%. \quad (3.21)$$

Такие двигатели из рассматриваемого ряда представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Асинхронные двигатели серии АИР с однослойными концентрическими обмотками

| Тип | Мощность P_1 , кВт | Число полюсов $2p$ | q | Δr , % |
|-------------|-------------------------|-----------------------|-----|----------------|
| АИР 160 М8 | 11 | 8 | 2 | 6,7 |
| АИР 90 LB8 | 1,1 | 8 | | |
| АИР 160 S8 | 7,5 | 8 | | |
| АИР 112 MB8 | 3 | 8 | | |
| АИР 90 LA8 | 0,75 | 8 | | |
| АИР 112 MA8 | 2,2 | 8 | | |
| АИР 132 М8 | 5,5 | 8 | | |
| АИР 132 S8 | 4 | 8 | | |
| АИР 71 А4 | 0,55 | 4 | 3 | 5,3 |
| АИР 71 В4 | 0,75 | 4 | | |

Стоит отметить, что таблицы 3.2 и 3.3 были составлены по справочным данным [91], которые на практике в зависимости от производителя могут отличаться. Кроме того, при ремонте может быть выбрана иная конструкция обмотки.

По результатам исследования однослойных обмоток получены промежуточные выводы:

1. Примените однослойных совмещённых обмоток с целью уменьшения электрических потерь в обмотке статора наиболее выгодно, если при замене не

увеличивается относительный шаг катушки $\beta_{кт}$. Такое возможно, например, когда лобовые части всех катушек катушечной группы стандартной обмотки отогнуты в одну сторону. В этом случае уменьшение эквивалентного сопротивления при замене на совмещённую обмотку не зависит от размера машины и равно 6,7% для двигателей с чётным q и 5,3% для двигателей с $q=3$.

2. В случае, если стандартная обмотка (выполнена «в развалку») имеет меньшее значение $\beta_{кт}$, чем совмещённая, изменение эквивалентного активного сопротивления зависит от отношения главных размеров машины. Причём с ростом длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение совмещённой обмотки становится более выгодным.

Данные исследования опубликованы в статьях [63, 69].

3.3 Оценка изменения электрических потерь в статоре при замене двухслойной всыпной стандартной обмотки на совмещённую

В АД мощностью от 11 кВт и выше преимущественно применяются двухслойные обмотки статора с укороченным шагом. Укорочение шага преследует три цели:

1. Укорочение шага для борьбы с ВПГ;
2. Укорочение шага с целью снижения активного сопротивления и экономии обмоточного провода;
3. Укорочение шаг по технологическим причинам.

В трёхфазных машинах переменного тока с 6-зонной обмоткой для снижения влияния ВПГ наиболее целесообразным является относительный шаг $\beta=5/6$ [19]. Однако из-за дискретности числа пазов не всегда получается добиться такого соотношения и поэтому часто встречаются обмотки статора с относительным шагом $\beta=4/5$, $\beta=7/9$.

В обмоточных данных [91] двухполюсных АД серии АИР с двухслойными обмотками статора можно заметить, что для таких обмоток используется большее укорочение шага: $\beta=13/18$; $\beta=11/18$ и $\beta=7/12$. Это можно объяснить облегчением

укладки обмотки с таким шагом, а также более сильным влиянием в таких двигателях длины лобовой части на его сопротивление и расход обмоточного провода. По этой причине при исследовании двухслойных совмещённых 12-зонных обмоток в двухполюсных двигателях мощностью более 11 кВт принимался тот же шаг, что и для стандартных 6-зонных обмоток.

Ожидаемое изменение активного сопротивления при переходе от стандартной двухслойной обмотки к совмещённой двухслойной обмотке определяется по той же методике, что применялась и для однослойных обмоток. В большинстве случаев катушки двухслойных обмоток при ручной намотке выполняются равносекционными и имеют шаг катушки равный шагу обмотки, поэтому укорочение шага сказывается не только на изменение ширины катушки, но также и на обмоточном коэффициенте (2.4). Если при переходе от стандартной к совмещённой обмотке изменение шага не происходит, то ожидаемое уменьшение активного сопротивления обмотки будет определяться по формуле (3.21), как и для однослойной обмотки.

Однако, как было показано во второй главе, для совмещённой обмотки наиболее благоприятным относительным шагом для снижения влияния ВПГ является $\beta=11/12$. Поэтому определим изменение активного сопротивления обмотки статора для реальных вариантов двигателей из серии АИР при применении совмещённой 12-зоной обмотки вместо стандартной 6-зоной, при относительных шагах обмотки:

1. $\beta=11/12$ для четырёх и шести полюсных машин с $q=4$;
2. $\beta=13/15$ и $\beta=14/15$ для четырёх полюсных машин с $q=5$;
3. $\beta=8/9$ для восьми и десяти полюсных машин с $q=3$.

Расчёт проводился по упрощённой формуле (3.18), результаты приведены на рисунках 3.7, 3.8 и 3.9.

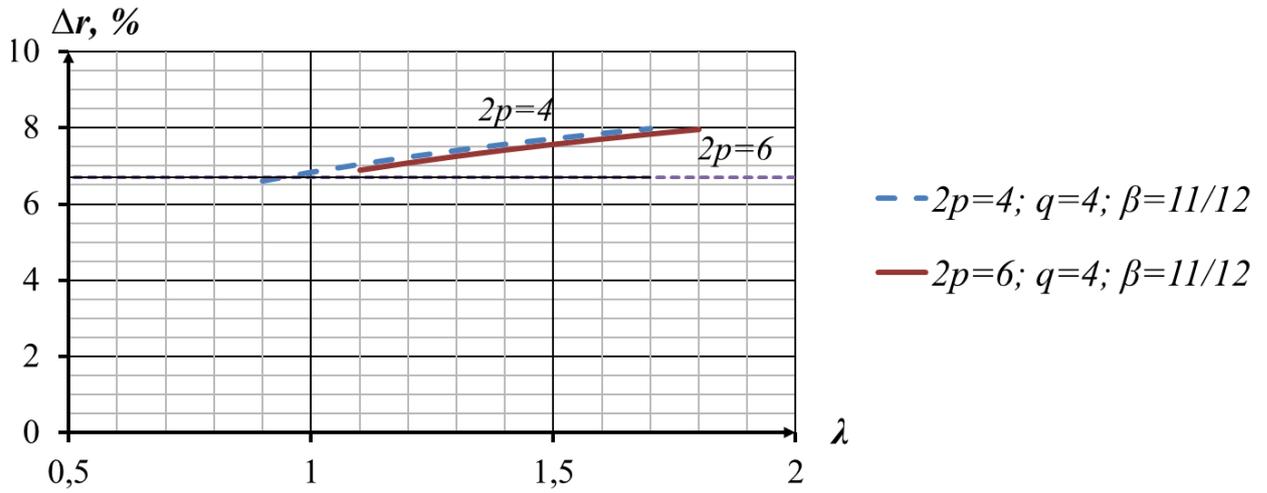


Рисунок 3.7 – Сравнение эквивалентных активных сопротивлений для АД с двух-
слойной обмоткой и $q=4$ в зависимости от λ при минимальной изоляции лобовых
частей

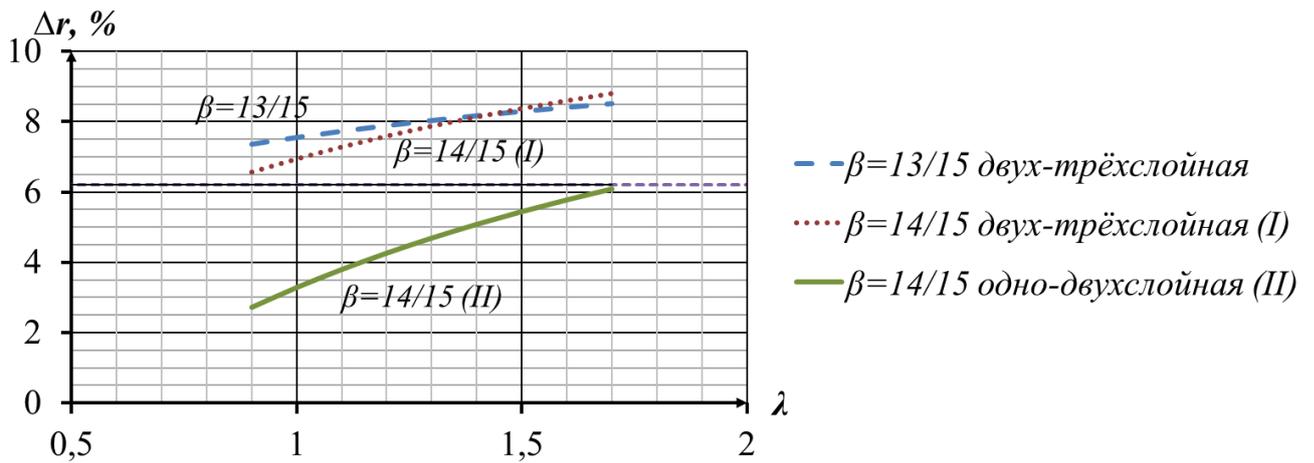


Рисунок 3.8 – Сравнение активных сопротивлений для четырёх полюсных АД с
двухслойной обмоткой и $q=5$ в зависимости от λ при минимальной изоляции ло-
бовых частей

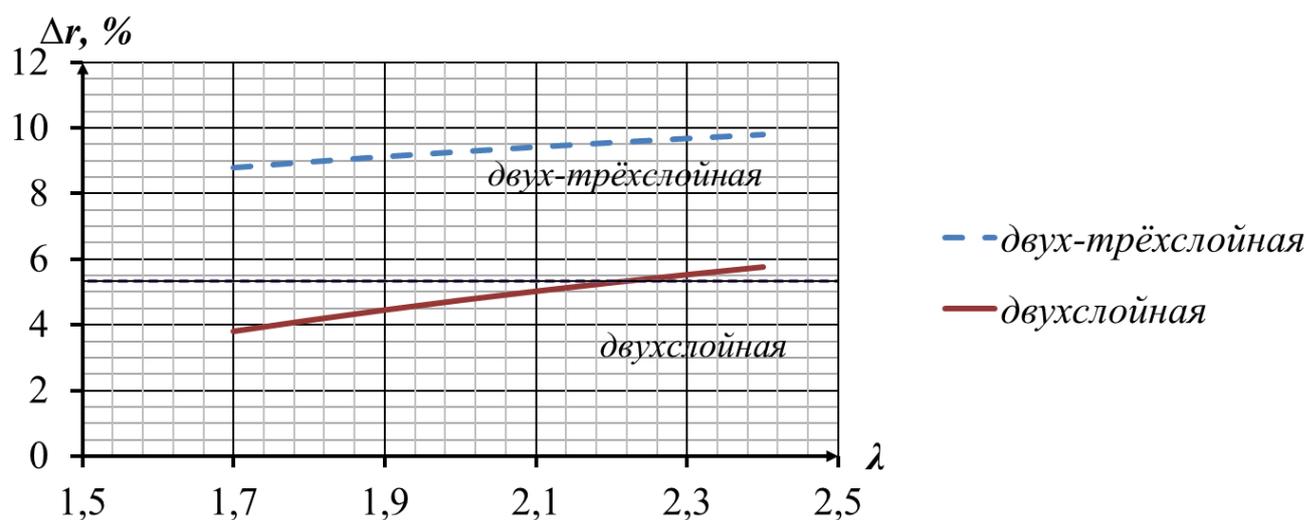


Рисунок 3.9 – Сравнение активных сопротивлений для восьми полюсных АД с двухслойной обмоткой и $q=3$ в зависимости от λ при минимальной изоляции лобовых частей

Полученные зависимости построены для значений λ , которые встречаются в двигателях серии АИР. Фиолетовой пунктирной линией указано значение уменьшения активного сопротивления обмотки статора для случая, если при переходе на совмещённую обмотку не изменять шаг. Оно равно 6,71% для обмоток с $q=4$ (рисунок 3.7), 6,20% если $q=5$ (рисунок 3.8) и 5,34% если $q=3$ (рисунок 3.9).

Из рисунка 3.7 следует, что для двигателей с $q=4$ увеличение относительного шага совмещённой обмотки до $\beta=11/12$ вместо $\beta=10/12$ положительно сказывается не только на гармоническом составе МДС, но также и для большинства из рассматриваемых значений λ способствует более сильному уменьшению эквивалентного активного сопротивления обмотки. Это связано с увеличением обмоточного коэффициента.

На рисунке 3.8 построены зависимости для трёх вариантов совмещённой обмотки:

1. Двух-трёхслойная совмещённая обмотка с относительным шагом $\beta=13/15$;
2. Двух-трёхслойная совмещённая обмотка с относительным шагом $\beta=14/15$ (рисунок 2.13);
3. Одно-двухслойная совмещённая обмотка (рисунок 2.14).

Стандартная обмотка двигателях с $q=5$ имеет относительный шаг $\beta=4/5$. Из результатов исследования видно, что также, как и в предыдущем случае увеличение относительного шага совмещённой обмотки до $\beta=13/15$ или $\beta=14/15$ способствует более сильному уменьшению эквивалентного активного сопротивления по сравнению с относительным шагом $\beta=4/5$. Одно-двухслойная обмотка обладает меньшим потенциалом снижения электрических потерь в статоре по сравнению с её двух-трёхслойными аналогами, так как не имеет укорочения шага катушек. Однако является более простой в изготовлении.

На рисунке 3.9 изображены зависимости изменения эквивалентного активного сопротивления от λ при применении совмещённой двух-трёхслойной обмотки с $\beta=8/9$ (рисунок 2.11) и совмещённой двухслойной обмотки (рисунок 2.12) вместо стандартной двухслойной с $\beta=7/9$ для двигателей с $q=3$.

Выводы по главе:

1. Разработана методика определения теоретического изменения электрических потерь в статоре при использовании в нём совмещённой обмотки вместо стандартной, которая основана на определении разницы эквивалентах активных сопротивлений. Наибольшее потенциальное снижение электрических потерь в статоре с однослойной обмоткой стоит ожидать, если при переходе на совмещённую обмотку не увеличивается относительный шаг катушки $\beta_{км}$.

2. Если при переходе от стандартной обмотки к совмещённой не происходит изменение относительного шага катушек, то снижение эквивалентного активного сопротивления составляет: 6,71% для двигателей с чётным q ; 5,34% для двигателей с $q=3$; 6,20% для двигателей с $q=5$.

3. Если при переходе от стандартной обмотки к совмещённой изменяется относительный шаг катушек, то снижение эквивалентного активного сопротивления зависит от отношения главных размеров машины. Причём с ростом длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение

совмещённой обмотки становится более выгодным. Это связано с большим влиянием в этих случаях фактора увеличения обмоточного коэффициента.

4. Для большинства реально используемых габаритов двигателей серии АИР с двухслойными обмотками рекомендуется увеличивать относительный шаг при переходе к совмещённой обмотке, так как это способствует не только более сильному снижению ВПГ, но и снижению эквивалентного активного сопротивления.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКОЙ

4.1 Разработка методики перерасчёта обмотки статора со стандартной на совмещённую

Важным этапом исследований АД с совмещённой обмоткой является подготовка опытного образца такого двигателя. Как было установлено ранее, совмещённая обмотка имеет более сложную конструкцию, что сказывается в первую очередь на усложнение её расчёта. При традиционном ремонте АД со стандартной обмоткой достаточно только снять исходные обмоточные данные и впоследствии использовать их при изготовлении новой обмотки. При использовании в ремонтируемом двигателе совмещённой обмотки, помимо снятия исходных данных, необходимо провести их перерасчёт, в ходе которого определяются сечения проводников, число витков в фазах «звезды» и «треугольника», число параллельных ветвей и параллельных проводников в витке.

В методике перерасчёта предлагается соблюдать следующие требования:

1. Расчётная величина магнитного потока основной гармоники Φ АД с совмещённой обмоткой должна оставаться или быть близкой к значению потока исходного двигателя.

Данное требование достигается выбором числа витков фазы w [19]:

$$w = \frac{k_E \cdot U}{4,44 \cdot f \cdot k_{об} \cdot \Phi'} \quad (4.1)$$

где k_E – коэффициент пропорциональности между наводимой ЭДС в фазе обмотки и приложенным к ней напряжением;

U – напряжение на фазе двигателя, В;

f – частота тока, Гц;

Φ – основной магнитный поток, Вб.

Если в формуле (4.1), считать, что при переходе от стандартной к совмещённой обмотке не происходит изменение k_E , то значение магнитного потока будет

завесить от выбора числа эффективных витков w и обмоточного коэффициента $k_{об}$, изменение которого необходимо учитывать при перерасчёте.

Для перерасчёта числа витков, необходимо определить значение напряжения, приложенного к фазам обмотки. На рисунке 4.1 даны суммы длин векторов приложенных напряжений.

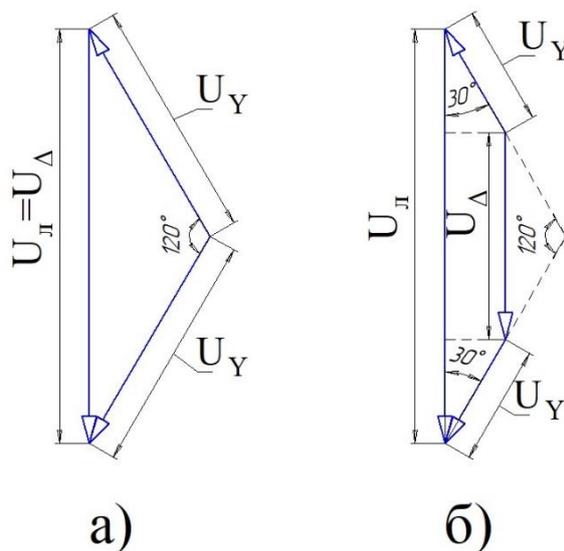


Рисунок 4.1 – Суммы длин векторов приложенных напряжений к фазам совмещённой обмотки: а) при параллельном соединении; б) при последовательном соединении

При параллельном соединении совмещённой обмотки напряжение фазы «треугольника» U_{Δ} равно линейному напряжению сети $U_{л}$, а величина напряжения «звезды» при этом в $\sqrt{3}$ раз меньше. Соблюдая условие равенства магнитных потоков в случае, если стандартная обмотка была соединена по схеме «звезда», число витков фаз совмещённой обмотки:

$$\begin{cases} w_Y = \frac{k_{об} \cdot w}{k_{обY}}; \\ w_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{k_{об} \cdot w}{k_{об\Delta}}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где w и $k_{об}$ – число витков и обмоточный коэффициент стандартной обмотки.

При последовательном соединении совмещённой обмотки линейное напряжение сети уравнивается геометрической суммой напряжений «треугольника» и двух напряжений «звезды». В этом случае числа витков обмотки определяются:

$$\begin{cases} w_Y = \frac{k_{об} \cdot w}{2 \cdot k_{обY}}; \\ w_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{k_{об} \cdot w}{2 \cdot k_{об\Delta}}. \end{cases} \quad (4.3)$$

2. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре должно быть близко к синусоидальному. Для этого в общем случае необходимо соблюдать равенство (2.3).

3. Равенство коэффициентов заполнения пазов статора медью:

$$k_3 = \frac{d^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S'_n}, \quad (4.4)$$

где d – диаметр обмоточного провода, мм;

u_n – число эффективных проводников в пазу;

$n_{эл}$ – число элементарных проводников в одном эффективном проводнике;

S'_n – площадь паза с изоляцией в свету, мм².

Соблюдение третьего условия должно обеспечить значение плотности тока в совмещённой обмотке не больше, чем в стандартной.

Стоит отметить, что ввиду дискретности числа витков и ограниченности стандартных сечений обмоточных проводов, точное соблюдения предложенных выше условий сложно достижимо.

При перерасчёте стандартной обмотки на совмещённую можно пойти двумя путями. Первый путь пересчитать число витков фаз по формуле (4.2), либо (4.3), а после рассчитать число проводников в пазу. Однако, в это случае число проводников в пазу может получиться не целым и появляется дополнительная операция перерасчёта после округления (хотя, стоит отметить, что на практике такую задачу иногда решают укладывая в пазы разное число витков). Поэтому более удобным является второй путь, когда вначале определяется число эффективных проводников в пазу, а затем число витков фазы.

На рисунке 4.2 изображён алгоритм методики перерасчёта обмотки статора на совмещённую с параллельным соединением. По данному алгоритму была разработана программа [100] (свидетельство приведено в приложении Б) на языке программирования Python и опубликована статья [65].

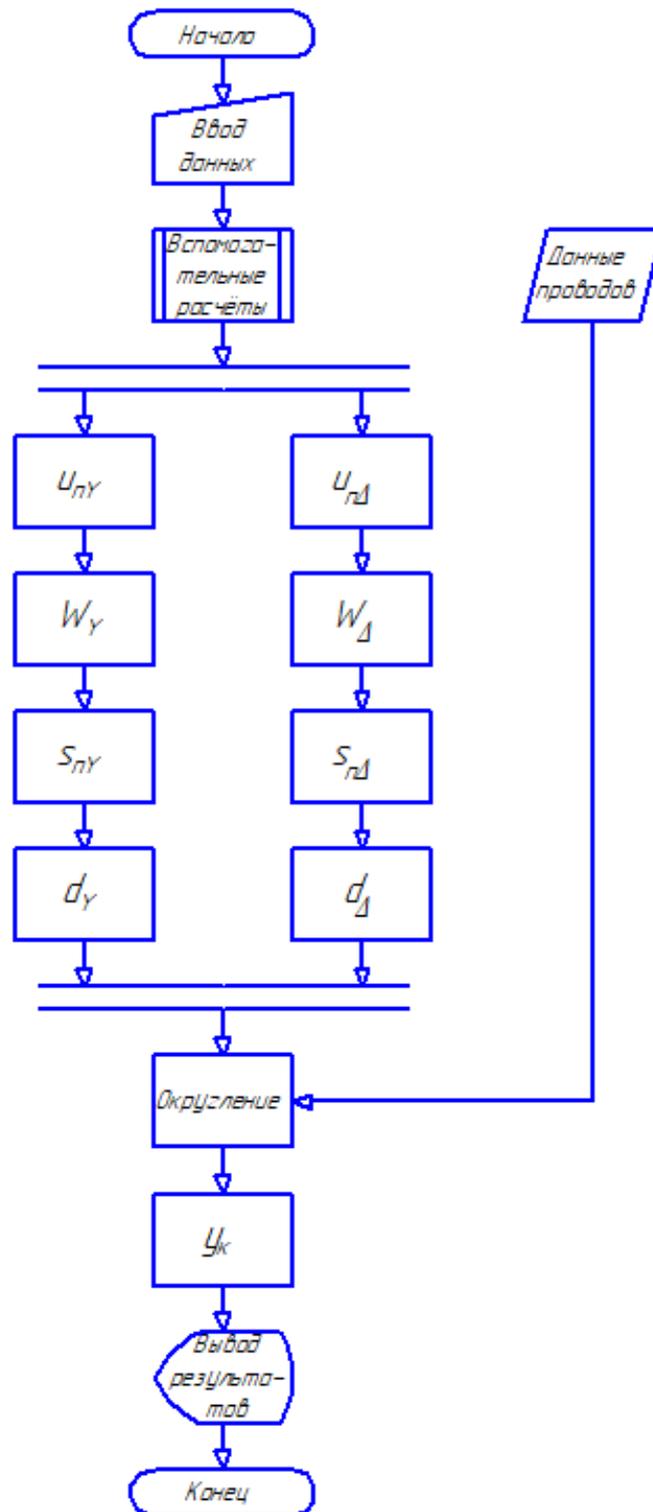


Рисунок 4.2 – Алгоритм перерасчёта обмотки статора на совмещённую

Рассмотрим данный алгоритм по блокам.

1. Ввод данных

Для перерасчёта необходимы исходные данные стандартной обмотки:

- число пазов z ;
- число полюсов $2p$;
- число эффективных проводников в пазу u_n , либо число витков фазы w ;
- число параллельных ветвей a ;
- диаметр обмоточного провода без изоляции d , мм;
- число параллельных проводов в витке $n_{эл}$;
- шаг обмотки y ;
- вид стандартной обмотки: однослойная / двухслойная;
- сопряжение фаз стандартной обмотки: «звезда» / «треугольник».

Кроме того, необходимо задаться следующими требованиями к совмещённой обмотке:

- вид совмещённой обмотки: однослойная / двухслойная;
- отгиб лобовых частей: в одну сторону / «в развалку»;
- вид катушечной группы: равносекционная / концентрическая;
- округление числа витков: по умолчанию (в ближайшую сторону) / в большую сторону / в меньшую сторону.

В большинстве случаев при ремонте двигателя, особенно если применялась операция обжига обмотки, рекомендуется округлять число витков в большую сторону. Конечно, лучшим вариантом была бы предварительная оценка состояния магнитной цепи, как предлагается в работе [73]. Но так как она значительно усложняет процесс ремонта, то можно ограничиться округлением витков в большую сторону. Это позволит снизить ток и потери холостого хода, однако стоит опасаться возможного снижения перегрузочной способности двигателя. Поэтому в устройствах, где двигатель подвергается большим нагрузкам возможно целесообразней округлять либо в ближайшую, либо в меньшую сторону. При большом количестве витков фазы, которое встречается в двигателях небольшой мощности, округление не должно сильно повлиять на их характеристики.

2. Вспомогательные расчёты

В блоке вспомогательных расчётов определяются величины стандартной обмотки, которые не были представлены в исходных данных, но будут необходимы для перерасчёта обмотки:

- число пазов, приходящихся на полюс и фазу стандартной обмотки q

$$q = \frac{z}{3 \cdot 2p}; \quad (4.5)$$

- число эффективных проводников в пазу u_n , если дано только число витков фазы w

- для однослойной обмотки

$$u_n = \frac{2 \cdot w \cdot a}{2 \cdot p \cdot q}; \quad (4.6)$$

- для двухслойной обмотки

$$u_n = \frac{w \cdot a}{2 \cdot p \cdot q}; \quad (4.7)$$

если число проводников в пазу разное (например 16 и 17), то берётся среднее значение (в примере это 16,5), но число витков фазы всегда должно быть целым.

- суммарное сечение параллельных проводников в одном витке s_n , мм²

$$s_n = n_{эл} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \quad (4.8)$$

- обмоточный коэффициент $k_{об}$

$$k_{об} = k_p \cdot k_y = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot q}} \cdot \sin \frac{y \cdot \pi \cdot 2 \cdot p}{2 \cdot z}. \quad (4.9)$$

Кроме данных стандартной обмотки определяются некоторые величины и для будущей совмещённой обмотки:

- число пазов, приходящихся на полюс и фазу для совмещённой обмотки (для фаз «звезды» q_Y и «треугольника» q_Δ)

- если q целое чётное, то

$$q_Y = q_\Delta = \frac{q}{2}; \quad (4.10)$$

- если q целое нечётное, то возможны по меньшей мере два варианта совмещённой обмотки. Первый – с дробным числом пазов, приходящихся на полюс и фазу. Примеры таких обмоток изображены на рисунках 1.21, 1.22. Для них расчёт должен производиться по формуле (4.10). Второй – вариант с разным, но целым распределением пазов между «звездой» и «треугольником». Пример такой обмотки изображён на рисунке 2.11. Для таких обмоток расчёт числа пазов, приходящихся на полюс и фазу, ведётся по формуле:

$$\begin{cases} q_Y = \frac{q}{2} + 0,5 \\ q_\Delta = \frac{q}{2} - 0,5 \end{cases}; \quad (4.11)$$

либо

$$\begin{cases} q_\Delta = \frac{q}{2} + 0,5 \\ q_Y = \frac{q}{2} - 0,5 \end{cases}; \quad (4.12)$$

➤ шаг совмещённой обмотки $y_{Y\Delta}$

- для однослойной обмотки

$$y_{Y\Delta} = \tau = \frac{z}{2 \cdot p}; \quad (4.13)$$

- для двухслойной обмотки

$$y_{Y\Delta}=11, \text{ если } \tau=12;$$

$$y_{Y\Delta}=14, \text{ если } \tau=15;$$

$$y_{Y\Delta}=8, \text{ если } \tau=9;$$

$$y_{Y\Delta}=y, \text{ если } 2 \cdot p=2 \text{ и } y \leq \tau - 4;$$

$$y_{Y\Delta}=17, \text{ если } \tau=18;$$

$$y_{Y\Delta}=19, \text{ если } \tau=21;$$

➤ обмоточные коэффициенты «звезды» $k_{обY}$ и «треугольника» $k_{об\Delta}$

- если q_Y и q_Δ целые числа, то

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{обY} = k_{pY} \cdot k_{yY} = \frac{\sin \frac{\pi}{12}}{q_Y \cdot \sin \frac{\pi}{12 \cdot q_Y}} \cdot \sin \frac{y_{Y\Delta} \cdot \pi \cdot 2 \cdot p}{2 \cdot z} \\ k_{об\Delta} = k_{p\Delta} \cdot k_{y\Delta} = \frac{\sin \frac{\pi}{12}}{q_{\Delta} \cdot \sin \frac{\pi}{12 \cdot q_{\Delta}}} \cdot \sin \frac{y_{Y\Delta} \cdot \pi \cdot 2 \cdot p}{2 \cdot z} \end{array} \right., \quad (4.14)$$

где $y_{Y\Delta}$ – шаг совмещённой обмотки, который является общим для «звезды» и «треугольника»;

- если $q_Y=q_{\Delta}=q_{Y\Delta}=1,5$, то

$$k_{pY} = k_{p\Delta} = 0,9865;$$

- если $q_Y=q_{\Delta}=q_{Y\Delta}=2,5$, то

$$k_{pY} = k_{p\Delta} = 0,9878.$$

Далее следует расчёт обмоточных данных совмещённой обмотки. Параметры «звезды» и «треугольника» можно рассчитывать параллельно.

3. Определение числа эффективных проводников в пазу u_{nY} , $u_{n\Delta}$ и витков в фазах w_Y , w_{Δ} «звезды» и «треугольника»

Для удобства рассмотрим сразу четыре блока алгоритма. Формулы расчёта зависят от того, по какой схеме были сопряжены фазы стандартной обмотки.

Если исходные данные заданы для сопряжения фаз «звезда»:

➤ число эффективных проводников в пазу «звезды» u_{nY} и «треугольника» $u_{n\Delta}$ определяется:

- при переходе от однослойной (двухслойной) стандартной обмотки к однослойной (двухслойной) совмещённой обмотке:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{пY} = \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_Y}{a} \\ u_{п\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_{\Delta}}{a} \end{array} \right.; \quad (4.15)$$

- при переходе от однослойной стандартной обмотки к двухслойной совмещённой обмотке:

$$\begin{cases} u_{пY} = \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_Y}{2 \cdot a} \\ u_{п\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_{\Delta}}{2 \cdot a} \end{cases}; \quad (4.16)$$

- при переходе от двухслойной стандартной обмотки к однослойной совмещённой обмотке:

$$\begin{cases} u_{пY} = \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{2 \cdot u_{п} \cdot a_Y}{a} \\ u_{п\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{2 \cdot u_{п} \cdot a_{\Delta}}{a} \end{cases}; \quad (4.17)$$

➤ округление числа эффективных проводников в пазу $u_{пY}$, $u_{п\Delta}$ до целого проводится для различных a_Y , a_{Δ} . Ниже приведены возможные значения количества параллельных ветвей a_Y для «звезды», но тоже справедливо и для «треугольника»:

- для однослойной совмещённой обмотки

$$\{a_Y \in \mathbb{N} \mid a_Y \leq p \cdot q_Y\}; \quad (4.18)$$

- для двухслойной совмещённой обмотки

$$\{a_Y \in \mathbb{N} \mid a_Y \leq 2p \cdot q_Y\}; \quad (4.19)$$

- для совмещённой обмотки с дробным $q_{Y\Delta}$

$$\{a_Y \in \mathbb{N} \mid a_Y \leq p\}. \quad (4.20)$$

При варианте с дробным $q_Y=q_{\Delta}=q_{Y\Delta}$ число витков в пазу рекомендуется округлить до чётного;

➤ определяем число витков в фазах «звезды» w_Y и «треугольника» w_{Δ}

- для однослойной совмещённой обмотки

$$\begin{cases} w_Y = \frac{u_{пY} \cdot 2 \cdot p \cdot q_Y}{2 \cdot a_Y} \\ w_{\Delta} = \frac{u_{п\Delta} \cdot 2 \cdot p \cdot q_{\Delta}}{2 \cdot a_{\Delta}} \end{cases}; \quad (4.21)$$

- для двухслойной совмещённой обмотки

$$\begin{cases} w_Y = \frac{u_{пY} \cdot 2 \cdot p \cdot q_Y}{a_Y} \\ w_{\Delta} = \frac{u_{п\Delta} \cdot 2 \cdot p \cdot q_{\Delta}}{a_{\Delta}} \end{cases}. \quad (4.22)$$

Если исходные данные заданы для сопряжения фаз «треугольник»:

➤ число эффективных проводников катушки в пазу «звезды» u_{nY} и «треугольника» $u_{n\Delta}$ определяется:

- при переходе от однослойной (двухслойной) стандартной обмотки к однослойной (двухслойной) совмещённой обмотке:

$$\begin{cases} u_{nY} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_Y}{a} ; \\ u_{n\Delta} = \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_{\Delta}}{a} \end{cases} \quad (4.23)$$

- при переходе от однослойной стандартной обмотки к двухслойной совмещённой обмотке:

$$\begin{cases} u_{nY} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_Y}{2 \cdot a} ; \\ u_{n\Delta} = \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{u_{п} \cdot a_{\Delta}}{2 \cdot a} \end{cases} \quad (4.24)$$

- при переходе от двухслойной стандартной обмотки к однослойной совмещённой обмотке:

$$\begin{cases} u_{nY} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_{об}}{k_{обY}} \cdot \frac{q}{q_Y} \cdot \frac{2 \cdot u_{п} \cdot a_Y}{a} ; \\ u_{n\Delta} = \frac{k_{об}}{k_{об\Delta}} \cdot \frac{q}{q_{\Delta}} \cdot \frac{2 \cdot u_{п} \cdot a_{\Delta}}{a} \end{cases} \quad (4.25)$$

➤ округление числа эффективных проводников в пазу u_{nY} , $u_{n\Delta}$ до целого при различных a_Y , a_{Δ} , где число параллельных ветвей в зависимости от вида обмотки принадлежат к множествам (4.18), (4.19) или (4.20).

➤ число витков в фазах «звезды» w_Y и «треугольника» w_{Δ} определяются также, как и при сопряжении фаз исходной обмотки «звездой» по формулам (4.21) либо (4.22).

4. Определение диаметров обмоточных проводов

Рассмотрим сразу несколько блоков, позволяющих выбрать обмоточные провода:

➤ суммарное сечение параллельных проводников в одном витке «звезды» s_{nY} и «треугольника» $s_{n\Delta}$, мм² определяется:

$$\begin{cases} s_{nY} = \frac{u_{\Pi} \cdot S_{\Pi}}{u_{\Pi Y}}; \\ s_{n\Delta} = \frac{u_{\Pi} \cdot S_{\Pi}}{u_{\Pi \Delta}}; \end{cases} \quad (4.26)$$

➤ диаметры обмоточных проводов «звезды» d_Y и «треугольника» d_{Δ} в мм рассчитываются:

$$\begin{cases} d_Y = \sqrt{\frac{4 \cdot s_{nY}}{n_{\text{эл}Y} \cdot \pi}}; \\ d_{\Delta} = \sqrt{\frac{4 \cdot s_{n\Delta}}{n_{\text{эл}\Delta} \cdot \pi}}; \end{cases} \quad (4.27)$$

где $n_{\text{эл}Y}$, $n_{\text{эл}\Delta}$ – число параллельных проводников в витке, в программе рассматриваются четыре варианта с числами проводников от одного до четырёх;

➤ округляем d_Y и d_{Δ} до стандартных значений обмоточных проводов. Если размеры паза позволяют, то округлять рекомендуется в большую сторону. Программа выдаёт два ближайших значения и позволяет определить отклонение в получающемся сечении эффективного проводника от рассчитанного ранее по формуле (4.26). Предполагается, что это позволит оператору оценить заполненность паза медью.

➤ шаг катушек совмещённой обмотки $y_{kY\Delta}$ определяется:

- для однослойной и двухслойных обмоток с равносекционными катушками:

$$y_{kY\Delta} = y_{Y\Delta}. \quad (4.28)$$

При расчёте в программе шаг катушек по пазам выводится на экран в виде: для «звезды» $1 - (1 + y_{kY\Delta})$; для «треугольника» $(1 + q_Y) - ((1 + q_Y) + y_{kY\Delta})$

Для варианта с дробным $q_{Y\Delta}$ на экран выводится: для «звезды» $x - (x + y_{kY\Delta})$; для «треугольника» $(x - 0,5 + q_{Y\Delta}) - ((x - 0,5 + q_{Y\Delta}) + y_{kY\Delta})$ где $\{x \in \mathbb{N} \mid x \leq (q_{Y\Delta} + 0,5)\}$;

- для однослойной обмотки, имеющей отгиб лобовых частей в одну сторону и концентрические катушки (только для целого $q_Y = q_{\Delta} = q_{Y\Delta} \geq 2$):

$$y_{кY\Delta x} = \tau + q_{Y\Delta} - 2 \cdot x - 1, \quad (4.29)$$

где $\{x \in \mathbb{N} | x \leq q_{Y\Delta}\}$.

При расчёте в программе на экран выводится: для «звезды» $x - (x + y_{кY\Delta x})$; для «треугольника» $(x + q_{Y\Delta}) - ((x + q_{Y\Delta}) + y_{кY\Delta x})$;

- для однослойной обмотки с отгибом лобовых частей «в развалку» и концентрическими катушками (только для целого чётного $q_Y = q_\Delta = q_{Y\Delta} \geq 2$) расчёт ведётся по формуле (4.29), но при этом $\{x \in \mathbb{N} | x \leq q_{Y\Delta}/2\}$. При расчёте в программе форма вывода результатов на экран такая же, как и в предыдущем случае.

5. Вывод результатов

Выполняя перерасчёт «вручную», по предложенному выше алгоритму, или в программе, можно получить все необходимые данные для выполнения совмещённой обмотки. В таблице 4.1 приведена структура вывода обмоточных данных программой. В данной таблице отсутствуют диаметры обмоточных проводов, так как их запись получается громоздкой, то было принято решение выводить их не таблицей, а строкой.

Таблица 4.1 – Структура вывода обмоточных данных совмещённой обмотки

| | «звезда» | | | «треугольник» | | |
|---|---------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|
| число пазов, приходящихся на полюс и фазу $q_{Y\Delta}$ | q_Y | | | q_Δ | | |
| шаг катушек по пазам $y_{кY\Delta}$ | * | | | * | | |
| шаг обмотки $y_{Y\Delta}$ | $y_{Y\Delta}$ | | | $y_{Y\Delta}$ | | |
| число параллельных ветвей $a_{Y\Delta}$ | 1 | ... | q_Y | 1 | ... | q_Δ |
| число витков фазы $w_{Y\Delta}$ | w_Y | w_Y | w_Y | w_Δ | w_Δ | w_Δ |
| число эффективных проводников в пазу $u_{nY\Delta}$ | u_{nY} | u_{nY} | u_{nY} | $u_{n\Delta}$ | $u_{n\Delta}$ | $u_{n\Delta}$ |

В таблице 4.1 шаг катушек по пазам представлен общим знаком «*», так как точная форма записи для разных видов совмещённых обмоток отличается и была описана в четвёртом пункте.

Диаметры обмоточных проводов выводятся в строчку для различных чисел параллельных ветвей и при $\{n_{\text{эл}Y} = 1, 2, 3, 4\}; \{n_{\text{эл}\Delta} = 1, 2, 3, 4\}$. Форма записи диаметров имеет вид:

$$\frac{d_{\text{в}}(+\Delta s_{\text{в}})}{d_{\text{н}}(-\Delta s_{\text{н}})'}$$

где $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ – стандартные диаметры обмоточного провода без изоляции округлённые от расчётного вверх и вниз соответственно, мм;

$\Delta s_{\text{в}}$ и $\Delta s_{\text{н}}$ – разница сечений, получившегося эффективного проводника и расчётного $s_{\text{н}Y}$ ($s_{\text{н}\Delta}$), при округлении диаметра провода вверх и вниз соответственно, мм².

Если в перематываемом двигателе число пазов, приходящихся на полюс и фазу, нечётное, то программа рассчитывает три возможных варианта обмотки. При этом в варианте с дробным $q_{Y\Delta}$ число эффективных проводников в пазу указывается через дробь. Пример формы записи числа проводников в пазу «звезды» имеет вид:

$$\frac{u_{\text{п}Y}}{u_{\text{п}Y}/2}$$

Примеры расчёта обмоточных данных программой представлены в приложении А.

4.2 Описание оборудования, используемого в экспериментальных исследованиях

4.2.1 Подготовка экспериментальных двигателей

Для проведения экспериментов были закуплены два двигателя типа АИР71В4У2 компании ENERAL, рассчитанные на продолжительный режим работы S1 и имеющие степень защиты IP55. Технические характеристики двигателей приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики двигателя АИР71В4

| Схема соединения | Номинальное напряжение U_n , В | Номинальная мощность P_n , Вт | Номинальная сила тока I_n , А | Номинальная частота вращения n_n , об/мин | Номинальный $\cos \varphi_n$ |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|------------------------------|
| Y/Δ | 380/220 | 750 | 2,14/3,70 | 1350 | 0,75 |

Оба двигателя были отправлены на перемотку в Удмуртский электроремонтный завод. В результате их вскрытия были получены обмоточные данные, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные обмоточные данные двигателя АИР71В4

| Число пазов z | Число витков фазы w | Диаметр проводника без изоляции d , мм | Число параллельных проводов в витке $n_{эл}$ | Число параллельных ветвей a | Число слоёв |
|-----------------|-----------------------|--|--|-------------------------------|-------------|
| 24 | 396 | 0,56 | 1 | 1 | 1 |

Один двигатель был перемотан с сохранением обмоточных данных из таблицы 4.3 на стандартную 6-зонную обмотку (рисунок 4.3). В экспериментах он является контрольным двигателем.

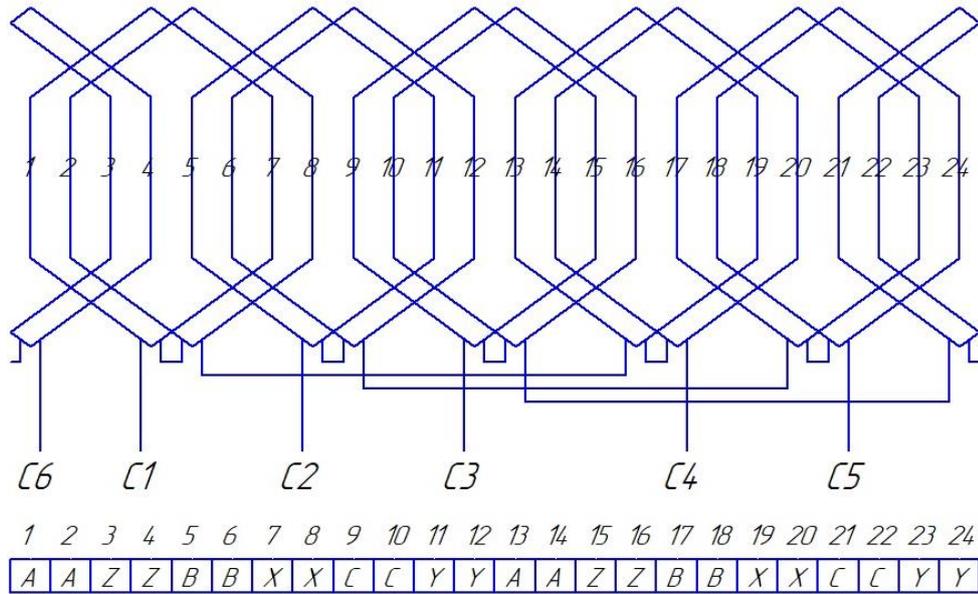


Рисунок 4.3 – Схема однослойной равnoseкционной стандартной 6-зонной обмотки контрольного двигателя

Второй двигатель является экспериментальным, и он был перемотан на совмещённую 12-зонную обмотку (Рисунок 4.4).

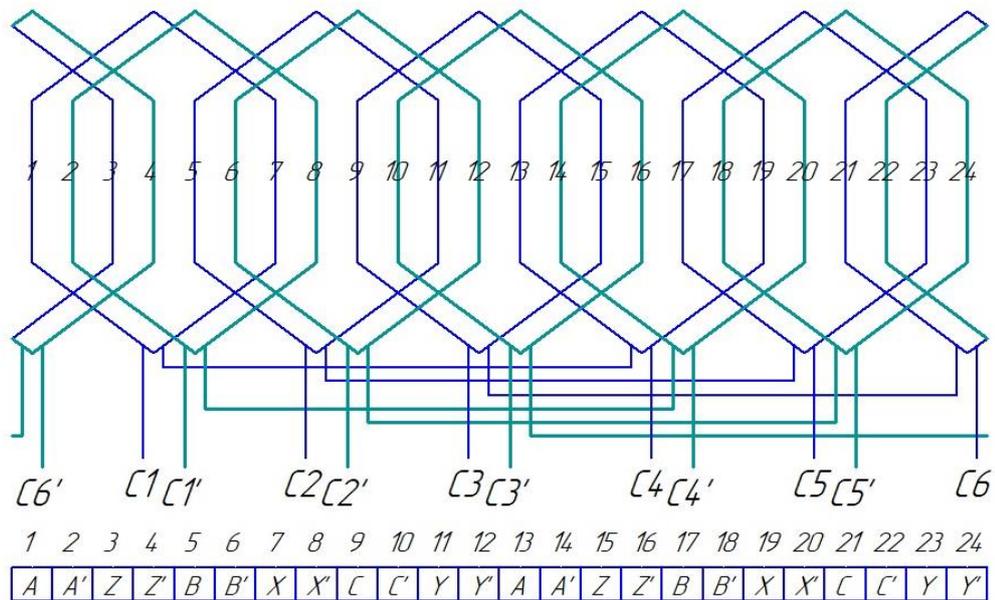


Рисунок 4.4 – Схема однослойной совмещённой 12-зонной обмотки экспериментального двигателя

Совмещённая обмотка в экспериментальном двигателе выполнена с параллельным соединением «звезды» и «треугольника». Обмоточные данные, полученные в ходе расчёта по методике, предложенной в предыдущем разделе, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Обмоточные данные АД с совмещённой обмоткой

| | Фазы «звезды» Y | Фазы «треугольника» Δ |
|---|------------------------|------------------------------|
| Число витков фазы w | 384 | 664 |
| Число пазов, приходящихся на полюс и фазу q | 1 | 1 |
| Число эффективных проводников в пазу u_n | 192 | 332 |
| Диаметр проводника без изоляции d , мм | 0,4 | 0,315 |
| Число параллельных проводов в витке $n_{эл}$ | 1 | 1 |
| Число параллельных ветвей a | 1 | 1 |
| Шаг обмотки y | 6 | 6 |
| Обмоточный коэффициент $k_{об}$ | 1 | 1 |

Для фаз «треугольника» был выбран провод с диаметром 0,315 мм, хотя ближайший стандартный диаметр 0,3 мм. Такой выбор был обусловлен отсутствием необходимого провода на предприятии. В остальном же, данные, полученные в ходе ручного расчёта и с помощью программы (Приложение А), совпадают.

4.2.2 Описание лабораторной установки и измерительного оборудования

При проведении экспериментальных исследований важно соблюсти постоянство факторов, которые могли бы повлиять на результаты опытов. Одним из таких факторов является значение подводимого напряжения. Увеличение напряжения выше номинального приводит к возрастанию величины магнитного потока в двигателе, что приводит к увеличению тока и потерь холостого хода. Поэтому во время проведения экспериментов необходимо поддерживать напряжение на заданном значении. Для решения этой задачи было решено включить в схему испытаний фазорегулятор, который выполнял функцию индукционного потенциал регулятора (рисунок 4.5) во время проведения опыта холостого хода и испытаний под нагрузкой.



Рисунок 4.5 – Фазорегулятор

Согласно ГОСТ 11828-86 все электрические измерения рекомендуется проводить электроизмерительными приборами класса точности не хуже 0,5 [27]. Во время проведения исследований необходимо определять значения силы тока I_1 , потребляемой активной мощности P_1 и величины питающего напряжения U , с этой целью был выбран комплект измерительный К505 (рисунок 4.6).

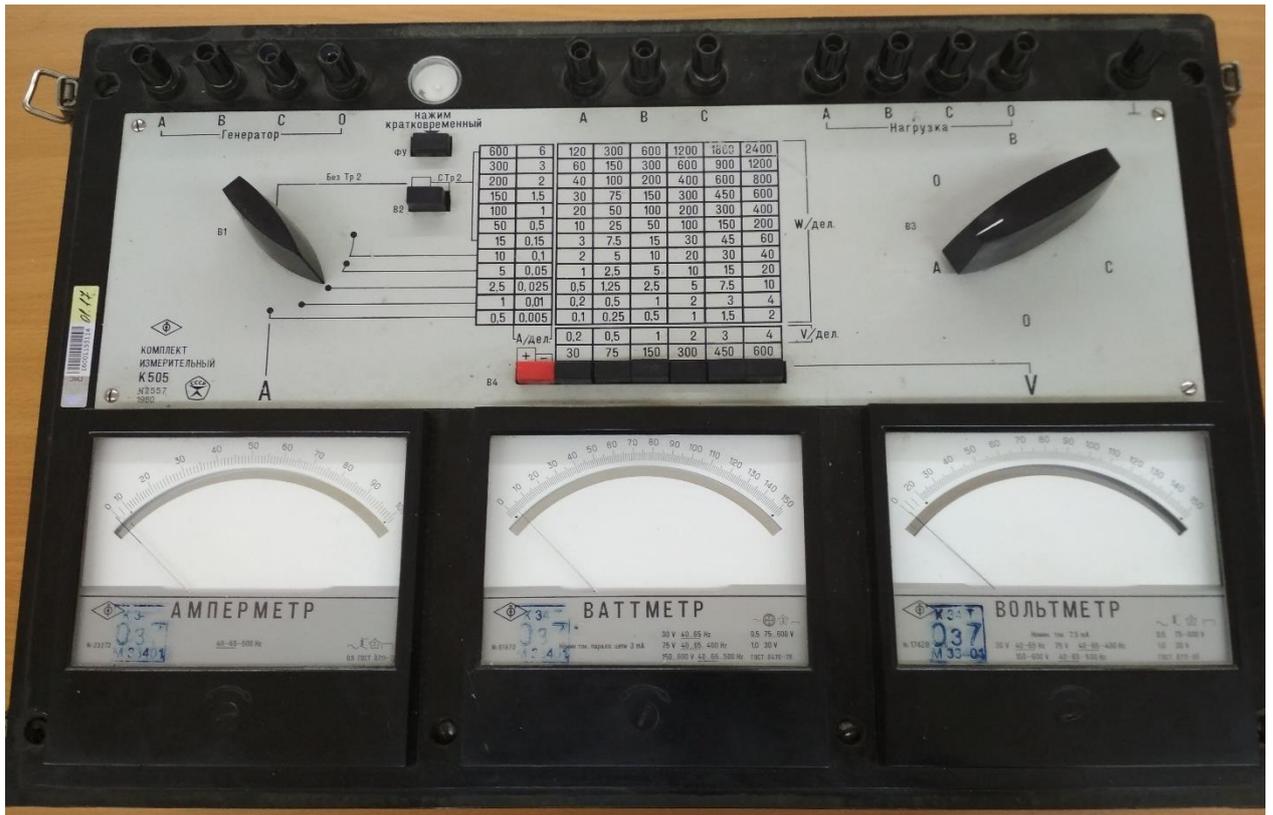


Рисунок 4.6 – Комплект измерительный К505

В состав комплекта входят: амперметр и вольтметр электромагнитной системы, а также ваттметр ферродинамической системы, которые соответствуют классу точности 0,5. За счёт наличия искусственного нуля в схеме комплекта, его приборы позволяют определять фазные значения измеряемых величин в питающей линии [48].

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 4.7.

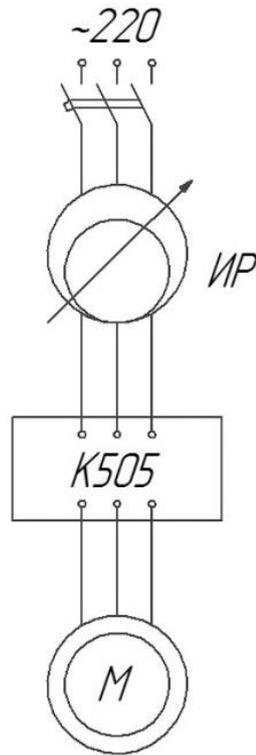


Рисунок 4.7 – Электрическая схема экспериментальной установки

Для проведения испытаний под нагрузкой необходимо тормозное (нагрузочное устройство). Существуют несколько возможных вариантов таких устройств [48, 79].

Во время проведения испытаний, для создания нагрузки на валу двигателя, использовалось электромагнитное нагрузочное устройство. Принцип работы таких устройств основан на явление электромагнитной индукции и на силовом действии магнитного поля на проводники с током. Эскиз нагрузочного устройства изображён на рисунке 4.8., а фото на рисунке 4.9. Нагрузка в устройстве регулируется посредством изменения магнитного потока, создаваемого катушками электромагнита. Особенностью данного устройства является также, то, что оно не только нагружает двигатель, но и позволяет определить величину, действующего на двигатель, момента.

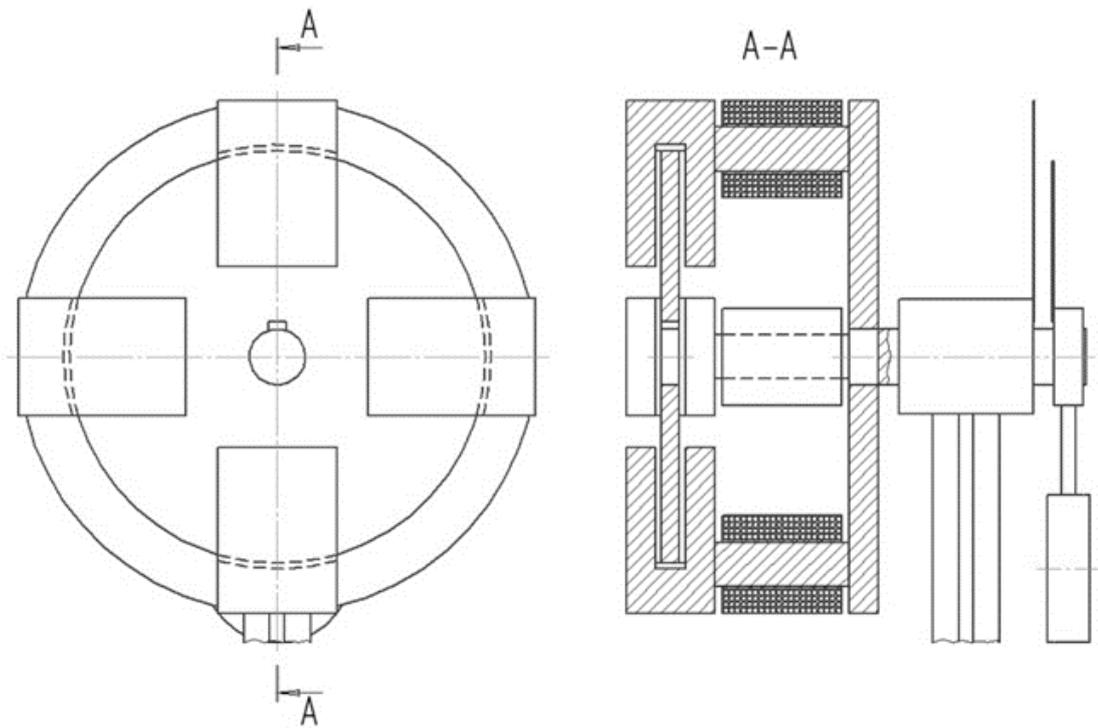


Рисунок 4.8 – Эскиз электромагнитного нагрузочного устройства



Рисунок 4.9 – Внешний вид нагрузочного устройства

По углу отклонения устройства определяется момент M , действующий на диск:

$$M = m_r \cdot l' \cdot g \cdot \sin\theta, \quad (4.30)$$

где $m_r=5$ кг – масса груза;

$l'=0,11$ м – длина плача груза;

$g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

θ – угол отклонения груза нагрузочного устройства от положения равновесия.

Определение частоты вращения проводилось с помощью стрелочного тахометра часового типа ТЧ 10-Р, внешний вид которого представлен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Внешний вид тахометра ТЧ 10-Р

Данный тахометр имеет класс точности 1,0 и пределы измерения частоты вращения в об/мин от 50 до 1000 и от 1000 до 10000. Для измерения частоты вращения вал тахометра подносился к центровочному элементу вала двигателя со стороны вентилятора. Следуя рекомендациям, приведённым в паспорте тахометра, между двумя его последовательными включениями, делалась выдержка времени не менее 30 с.

Для определения пускового момента в опыте короткого замыкания на вал двигателя крепилась балка, на которую вешался груз. Схематичное изображение такого устройства представлено на рисунке 4.11.

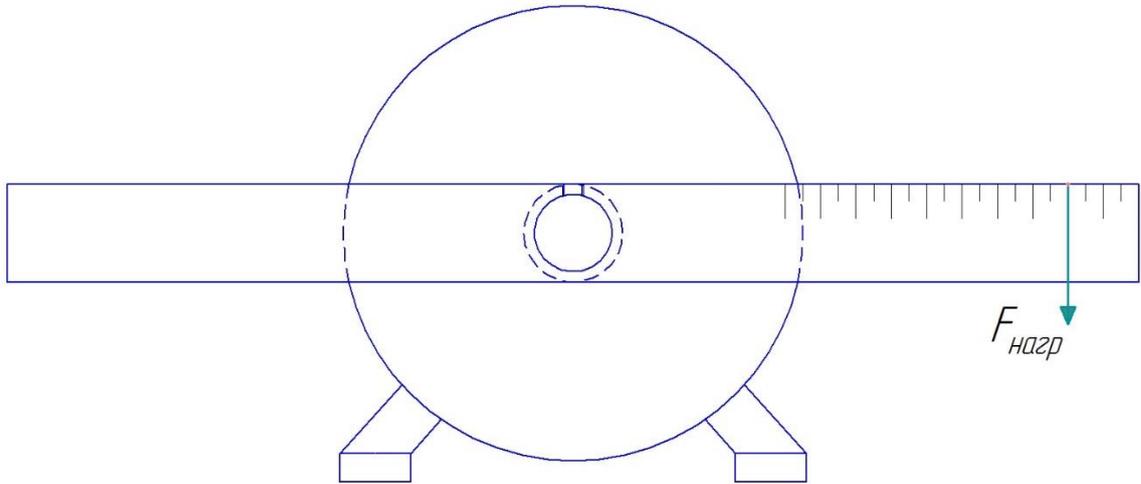


Рисунок 4.11 – Устройство по определению пускового момента в опыте короткого замыкания

4.3 Результаты экспериментального исследования асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой

4.3.1 Обработка результатов исследований

Опыты в экспериментальном исследовании повторялись пять раз, при этом фиксировались показания приборов при заранее заданных значениях изменяемой величины (либо напряжения, либо угла отклонения груза). За показание токов принималось среднеарифметическое значение от всех замеров:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^5 I_k}{5}, \quad (4.31)$$

где I_k – среднее арифметическое значение силы тока в k -ом замере, А.

В свою очередь значение каждого замера определялось, как среднеарифметическое трёх фаз:

$$I_k = \frac{I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}}{3}, \quad (4.32)$$

где I_{Ak} , I_{Bk} , I_{Ck} – значения силы тока в фазе А, В и С при k-ом замере, А.

Суммарная потребляемая активная мощность определялась также, как и в случае с током, как среднеарифметическое от трёх замеров:

$$P = \frac{\sum_{k=1}^5 P_k}{5}, \quad (4.33)$$

где P_k – суммарная потребляемая активная мощность k-ом замере, Вт:

$$P_k = P_{Ak} + P_{Bk} + P_{Ck}. \quad (4.34)$$

Частота вращения по аналогии с мощностью и током тоже принималась как среднее арифметическое от трёх замеров. Значение напряжения в каждой фазе и замере оставалось постоянным. Угол отклонения груза нагрузочного устройства подбирался во всех замерах одинаковым.

Замеренные показания записывались в таблицу, а затем переносились в Excel, где проводилась их обработка.

4.3.2 Опыт холостого хода

Схема испытаний представлена на рисунке 4.7.

Цель опыта – определение потерь и тока холостого хода испытуемых двигателей.

В соответствии с рекомендацией ГОСТ 7217-87 [31] перед проведением опыта двигатель обкатывался на холостом ходу в течении 10 мин. Это необходимо для повышения температуры частей двигателя и приведения их близких к рабочим.

В ходе проведения опыта к АД, работающим без нагрузки, подводилось напряжение, величина которого устанавливалась с помощью индукционного регулятора. Диапазон значений подводимого фазного напряжения: от 150 до 230 В с шагом 10 В, всего 9 точек.

Проведение опыта при значениях выше и ниже номинального необходимо, так как, согласно ГОСТ, допускается отклонение напряжения на $\pm 10\%$ от номинального [30].

В эксперименте фиксировались показания с приборов комплекта К505 по каждой фазе (А, В, С): линейные токи, фазное напряжение питающей линии и потребляемые активные мощности.

Опыт для каждого значения напряжения повторялся несколько раз. В таблице 4.5 приведены среднеарифметические значения линейного тока (ток холостого хода), фазного напряжения и суммарной потребляемой активной мощности (потерь холостого хода), полученные в ходе исследования для двигателей со стандартной и совмещённой обмотками.

Таблица 4.5 – Результаты измерений в опыте холостого хода

| Питающее фазное напряжение $U, В$ | Стандартная обмотка | | Совмещённая обмотка | |
|--|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| | Ток холостого хода $I_0, А$ | Потери холо- стого хода $P_0,$ Вт | Ток холостого хода $I_0, А$ | Потери холо- стого хода $P_0,$ Вт |
| 230 | 1,84 | 204,17 | 1,75 | 175,83 |
| 220 | 1,63 | 169,17 | 1,53 | 144,17 |
| 210 | 1,41 | 141,67 | 1,33 | 120,83 |
| 200 | 1,25 | 123,33 | 1,18 | 105,83 |
| 190 | 1,11 | 108,33 | 1,05 | 92,08 |
| 180 | 0,99 | 96,25 | 0,93 | 81,67 |
| 170 | 0,90 | 86,67 | 0,85 | 73,75 |
| 160 | 0,83 | 79,58 | 0,78 | 67,75 |
| 150 | 0,77 | 73,33 | 0,73 | 62,92 |

По данным опыта были построены зависимости тока холостого хода (рисунок 4.12) и потерь холостого хода (рисунок 4.13) от напряжения.

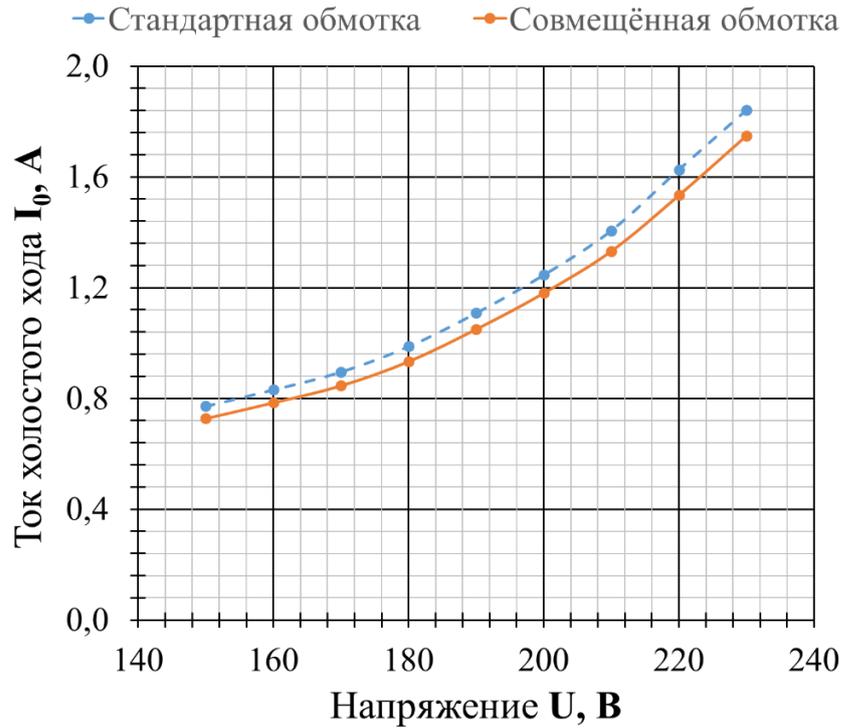


Рисунок 4.12 – Зависимость тока холостого хода от приложенного напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

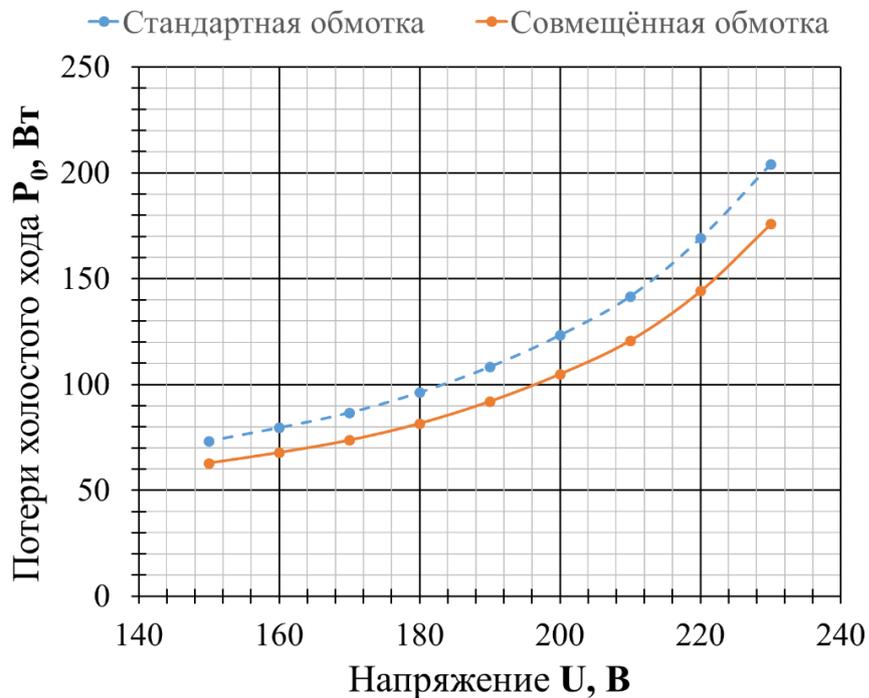


Рисунок 4.13 – Зависимость потерь холостого хода от приложенного напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Как видно из полученных опытных данных, совмещённая обмотка на всём исследуемом диапазоне напряжений имеет меньший ток и потери холостого хода. Определим процентную разницу этих отклонений по формуле:

$$\Delta X = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \cdot 100\%, \quad (4.35)$$

где ΔX – процентная разница уменьшения значения тока (I_0), либо потерь (P_0) холостого хода при применении совмещённой обмотки вместо стандартной;

X_1, X_2 – значение I_0 (А), либо P_0 (Вт) двигателей со стандартной и совмещённой обмоткой соответственно.

Результаты расчёта сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Разница тока и потерь холостого хода между двигателями

| Напряжение $U, В$ | 230 | 220 | 210 | 200 | 190 | 180 | 170 | 160 | 150 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Уменьшение тока холостого хода $\Delta I_0, \%$ | 5,05 | 5,70 | 5,29 | 5,24 | 5,26 | 5,49 | 5,55 | 5,60 | 5,76 |
| Уменьшение потерь холостого хода $\Delta P_0, \%$ | 13,9 | 14,8 | 14,7 | 14,9 | 15,0 | 15,2 | 14,9 | 14,7 | 14,2 |

Из полученных результатов расчётов видно, что при номинальном напряжении (220 В) АД с совмещённой обмоткой имеет на 5,7 % меньший ток холостого хода и на 14,8 % меньшие потери холостого хода, чем такой же двигатель со стандартной обмоткой. Для более углублённого анализа особый интерес представляют составляющие потерь холостого хода.

С большой долей точности можно считать, что потери холостого хода состоят из электрических потерь в обмотке статора $P_{эл1}$, магнитных потерь или потерь в стали $P_{ст}$ и механических потерь $P_{мех}$:

$$P_0 = P_{эл1} + P_{ст} + P_{мех}. \quad (4.36)$$

Электрические потери находятся по известной формуле, вытекающей из закона Джоуля-Ленца:

$$P_{эл1} = m \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (4.37)$$

где m – число фаз;

I_1 – сила тока, протекающего по фазе статора, А;

r_1 – сопротивление обмотки статора (для совмещённой обмотки – эквивалентное сопротивление), Ом.

В таблице 4.7 выписаны составляющие потерь холостого хода при номинальном напряжении (220 В) для двигателей со стандартной и совмещённой обмотками.

Таблица 4.7 – Составляющие потерь холостого хода при напряжении 220 В

| | Потери холостого хода P_0 , Вт | Электрические потери в обмотке статора $P_{эл1}$, Вт | Магнитные и механические потери $P_{ст}+P_{мех}$, Вт |
|----------------------------|----------------------------------|---|---|
| Стандартная обмотка | 169,17 | 91,73 | 78,17 |
| Совмещённая обмотка | 144,17 | 70,56 | 73,61 |

Из таблицы 4.7 видно, что в АД с совмещённой обмоткой все составляющие потерь холостого хода ниже, чем в двигателе со стандартной обмоткой. Это можно связать как со снижением эквивалентного активного сопротивления и тока в двигателе, так и со снижением ВПГ в магнитном поле. Однако стоит отметить, что более всего уменьшились электрические потери в обмотке статора.

АД с совмещённой обмоткой на холостом ходу потребляет меньший ток, чем контрольный двигатель со стандартной обмоткой, предположительно причиной этому могут быть по меньшей мере два фактора:

1. Снижение потерь в двигателе и как следствие снижение активной составляющей тока;
2. Уменьшение реактивной составляющей тока вследствие небольшого увеличения числа витков и, возможно, из-за снижения дифференциального рассеяния, вызванного ВПП.

Активную I_{0a} и реактивную I_{0p} составляющие тока холостого хода определяем по формулам:

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = I_0 \cdot \frac{P_0}{S_0}, \quad (4.38)$$

$$I_{0p} = I_0 \cdot \sin\varphi_0 = I_0 \cdot \frac{Q_0}{S_0}, \quad (4.39)$$

где φ_0 – угол между током холостого хода и напряжением;

$S_0 = m \cdot I_0 \cdot U$ – полная мощность, потребляемая двигателем на холостом ходу, ВА;

Q_0 – реактивная мощность холостого хода, вар:

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}. \quad (4.40)$$

В таблице 4.8 представлены значения мощностей холостого хода и составляющих тока холостого хода при номинальном напряжении для исследуемых двигателей.

Таблица 4.8 – Составляющие потребляемой мощности и тока холостого хода при напряжении 220 В

| | Мощности холостого хода | | | Токи холостого хода | | |
|----------------------------|-------------------------|------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|
| | S_0 , ВА | P_0 , Вт | Q_0 , вар | I_0 , А | I_{0a} , А | I_{0p} , А |
| Стандартная обмотка | 1073,4 | 169,2 | 1060,0 | 1,63 | 0,26 | 1,61 |

Продолжение таблицы 4.8

| | | | | | | |
|------------------------------|--------|-------|--------|------|-------|------|
| Совмещённая обмотка | 1012,2 | 144,2 | 1001,9 | 1,53 | 0,22 | 1,52 |
| Процентная разница, % | 5,70 | 14,78 | 5,48 | 5,70 | 14,78 | 5,48 |

Из таблицы 4.8 видно, что в АД с совмещённой обмоткой меньше как активные, так и реактивные составляющие тока и мощности холостого хода. Причём в процентном соотношении активные составляющие уменьшаются сильнее, чем реактивные, а в абсолютных значениях наоборот.

4.3.3 Испытания двигателей под нагрузкой

Цель испытания – определение механической и рабочих характеристик двигателей.

Также, как и в опыте холостого хода перед проведением испытаний под нагрузкой двигатель обкатывался на холостом ходу в течение 10 минут.

К испытываемому двигателю, установленному на нагрузочном устройстве, через индукционный регулятор подводилось номинальное напряжение, фазное значение которого равно 220 В.

Катушки нагрузочного устройства подключались через реостаты к сети с постоянным напряжением 110 В. С помощью реостатов регулировался ток в катушках устройства и, как следствие, нагрузка на валу АД.

Так как оперативно определять значение механической мощности на валу двигателя является не простой задачей, было принято решение оценивать нагрузку по моменту, действующему на вал двигателя, который определялся по углу отклонения груза на нагрузочном устройстве. Испытания проводились при следующих углах: 0°, 10°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 55°, 75°, что, согласно формуле (4.30), соответствует следующим моментам: 0; 0,94; 1,84; 2,28; 2,70; 3,09; 3,46; 3,81; 4,42; 5,21 Н·м.

В ходе исследования фиксировались показания с приборов комплекта К505 по каждой фазе (А, В, С): линейные токи, фазное напряжение питающей линии, которое на всём промежутке испытаний составляло 220 В и потребляемая активная мощность. С помощью тахометра ТЧ 10-Р, определялась частота вращения вала двигателя.

Испытания для каждого значения момента проводились многократно. В таблице 4.9 приведены среднеарифметические значения линейного тока, суммарной потребляемой активной мощности, момента на валу двигателя, частоты вращения и механической мощности, полученные в исследовании для двигателей со стандартной и совмещённой обмотками. Для краткости оформления в таблице 4.9 данные, относящиеся к стандартной обмотке, обозначены – У, а для совмещённой – УΔ.

Таблица 4.9 – Результаты измерений в опыте под нагрузкой

| № | Электрические величины | | | | Механические величины | | | | | |
|---|------------------------|------|--|-------|---|------|---|------|--|-------|
| | Сила тока I , А | | Потребляемая активная мощность P_1 , Вт | | Момент на валу двига- теля M , Нм | | Частота вращения ротора n , об/мин | | Мощность на валу двигателя P_2 , Вт | |
| | У | УΔ | У | УΔ | У | УΔ | У | УΔ | У | УΔ |
| 1 | 1,63 | 1,53 | 169,2 | 145,0 | 0,00 | 0,00 | 1499 | 1499 | 0,0 | 0 |
| 2 | 1,60 | 1,47 | 313,3 | 285,0 | 0,94 | 0,94 | 1480 | 1482 | 145,0 | 145,2 |
| 3 | 1,63 | 1,51 | 450,0 | 421,7 | 1,84 | 1,84 | 1460 | 1463 | 281,8 | 282,5 |
| 4 | 1,67 | 1,55 | 525,0 | 488,3 | 2,28 | 2,28 | 1450 | 1454 | 345,9 | 346,7 |
| 5 | 1,71 | 1,59 | 595,0 | 561,7 | 2,70 | 2,70 | 1440 | 1444 | 406,4 | 407,4 |
| 6 | 1,75 | 1,66 | 656,7 | 630,0 | 3,09 | 3,09 | 1430 | 1435 | 462,9 | 464,5 |
| 7 | 1,80 | 1,72 | 725,0 | 695,0 | 3,46 | 3,46 | 1420 | 1425 | 515,2 | 517,0 |
| 8 | 1,87 | 1,79 | 788,3 | 760,0 | 3,81 | 3,81 | 1411 | 1415 | 563,1 | 564,7 |

Продолжение таблицы 4.9

| | | | | | | | | | | |
|----|------|------|--------|--------|------|------|------|------|-------|-------|
| 9 | 2,00 | 1,93 | 913,3 | 880,0 | 4,42 | 4,42 | 1393 | 1397 | 643,9 | 646,0 |
| 10 | 2,21 | 2,13 | 1071,7 | 1030,0 | 5,21 | 5,21 | 1366 | 1371 | 744,5 | 747,4 |

Как видно из таблицы 4.9, АД с совмещённой обмоткой имеет меньший ток статора не только на холостом ходу, но также и при нагрузке. При нагрузке близкой к номинальной процентная разница токов составляет 3,77%. На рисунке 4.14 изображена зависимость тока статора от мощности на валу двигателя.

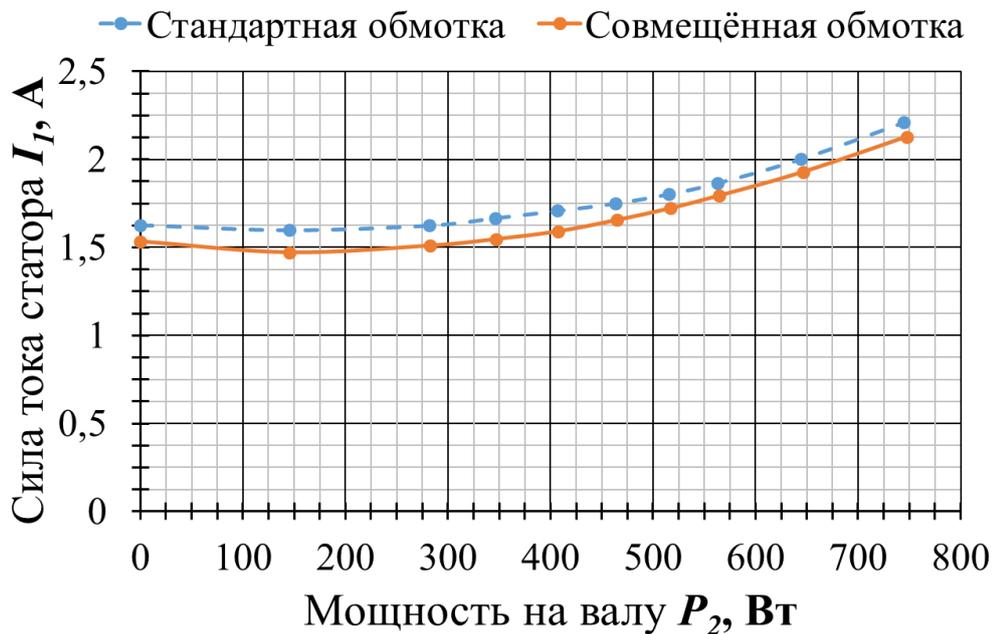


Рисунок 4.14 – Зависимость тока статора от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Как видно из рисунка 4.14, у обоих двигателей при небольшой нагрузке наблюдается снижение тока статора по сравнению с холостым ходом. Так как ток статора при постоянном напряжении зависит от потребляемой двигателем мощности, то для объяснения этого явления разобьём её на составляющие. Результаты анализа представлены в таблице 4.10 и на рисунке 4.15.

Таблица 4.10 – Потребляемые мощности двигателей в испытании под нагрузкой

| № | Полная мощность S , ВА | | Активная мощность P_I , Вт | | Реактивная мощность Q , вар | | Процентная разница, % | | |
|----|--------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-----------------------|------------|------------|
| | Y | YΔ | Y | YΔ | Y | YΔ | ΔS | ΔP | ΔQ |
| 1 | 1074,3 | 1012,9 | 169,2 | 145,0 | 1060,9 | 1002,5 | 5,72 | 14,29 | 5,51 |
| 2 | 1055,1 | 971,7 | 313,3 | 285,0 | 1007,5 | 928,9 | 7,91 | 9,04 | 7,80 |
| 3 | 1072,5 | 997,3 | 450,0 | 421,7 | 973,5 | 903,8 | 7,01 | 6,30 | 7,16 |
| 4 | 1100,0 | 1021,2 | 525,0 | 488,3 | 966,6 | 896,8 | 7,17 | 6,98 | 7,22 |
| 5 | 1127,5 | 1050,5 | 595,0 | 561,7 | 957,7 | 887,7 | 6,83 | 5,60 | 7,31 |
| 6 | 1155,0 | 1092,7 | 656,7 | 630,0 | 950,2 | 892,8 | 5,40 | 4,06 | 6,04 |
| 7 | 1189,8 | 1136,7 | 725,0 | 695,0 | 943,4 | 899,4 | 4,47 | 4,14 | 4,66 |
| 8 | 1232,0 | 1184,3 | 788,3 | 760,0 | 946,7 | 908,3 | 3,87 | 3,59 | 4,06 |
| 9 | 1321,8 | 1272,3 | 913,3 | 880,0 | 955,5 | 918,9 | 3,74 | 3,65 | 3,83 |
| 10 | 1459,3 | 1404,3 | 1071,7 | 1030,0 | 990,5 | 954,6 | 3,77 | 3,89 | 3,63 |

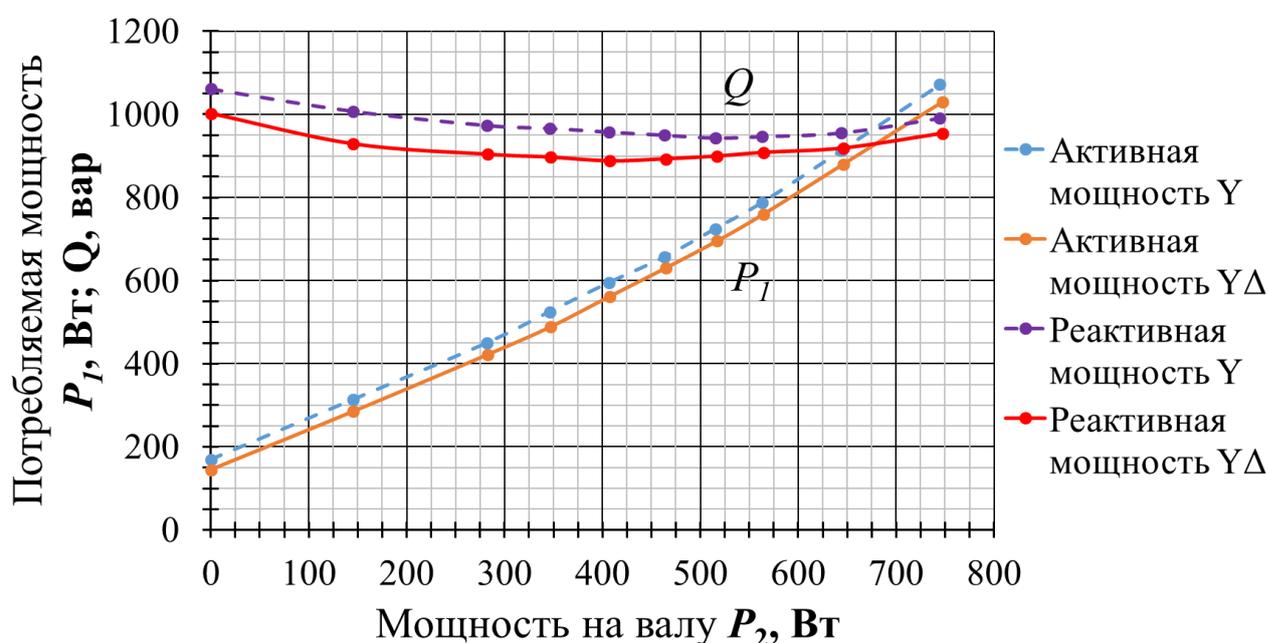


Рисунок 4.15 – Зависимость потребляемых активной и реактивной мощностей от нагрузки на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Из рисунка 4.15 видно, что у обоих двигателей при низких нагрузках происходит уменьшение потребляемой реактивной мощности по сравнению с холостым ходом, чем и объясняется уменьшения силы тока. Такое явление можно наблюдать в машинах малой мощности и, по всей видимости, причиной тому может являться уменьшение насыщения магнитопровода двигателя, вследствие небольшого снижения магнитного потока. Однако с дальнейшим ростом нагрузки происходит увеличение магнитных потоков рассеяния, и потребляемая реактивная мощность вновь повышается.

Оценим показатели энергоэффективности исследуемых асинхронных двигателей. К показателям энергоэффективности двигателей относят КПД и коэффициент мощности (отношение потребляемой активной мощности к полной). В исследование к фазам двигателей подводилось практически синусоидальное симметричное напряжение, поэтому коэффициент мощности K_m равен $\cos\varphi$. Результаты расчёта показателей энергоэффективности приведены в таблице 4.11 и на рисунках 4.16, 4.17.

Таблица 4.11 – Показатели энергоэффективности двигателей в испытании под нагрузкой

| № | КПД η , % | | Коэффициент мощности K_m | | Разница КПД $\Delta\eta$ |
|---|----------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------|
| | Y | Y Δ | Y | Y Δ | |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,157 | 0,143 | 0,0 |
| 2 | 46,3 | 51,0 | 0,297 | 0,293 | 4,7 |
| 3 | 62,6 | 67,0 | 0,420 | 0,423 | 4,4 |
| 4 | 65,9 | 71,0 | 0,477 | 0,478 | 5,1 |
| 5 | 68,3 | 72,5 | 0,528 | 0,535 | 4,2 |
| 6 | 70,5 | 73,7 | 0,569 | 0,577 | 3,2 |
| 7 | 71,1 | 74,4 | 0,609 | 0,611 | 3,3 |
| 8 | 71,4 | 74,3 | 0,640 | 0,642 | 2,9 |

Продолжение таблицы 4.11

| | | | | | |
|----|------|------|-------|-------|-----|
| 9 | 70,5 | 73,4 | 0,691 | 0,692 | 2,9 |
| 10 | 69,5 | 72,6 | 0,734 | 0,733 | 3,1 |

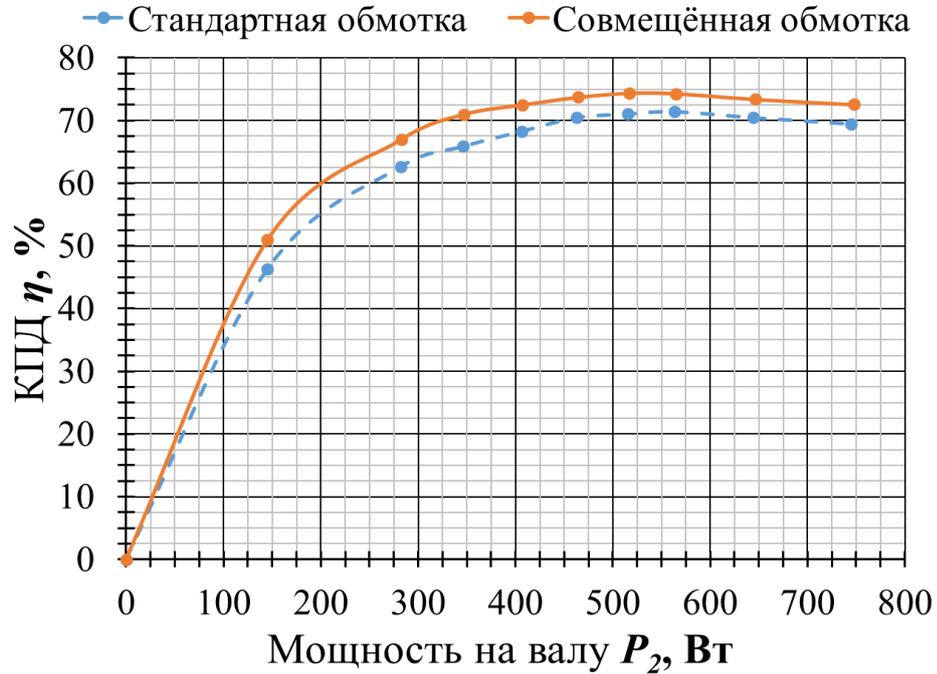


Рисунок 4.16 – Зависимость КПД от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

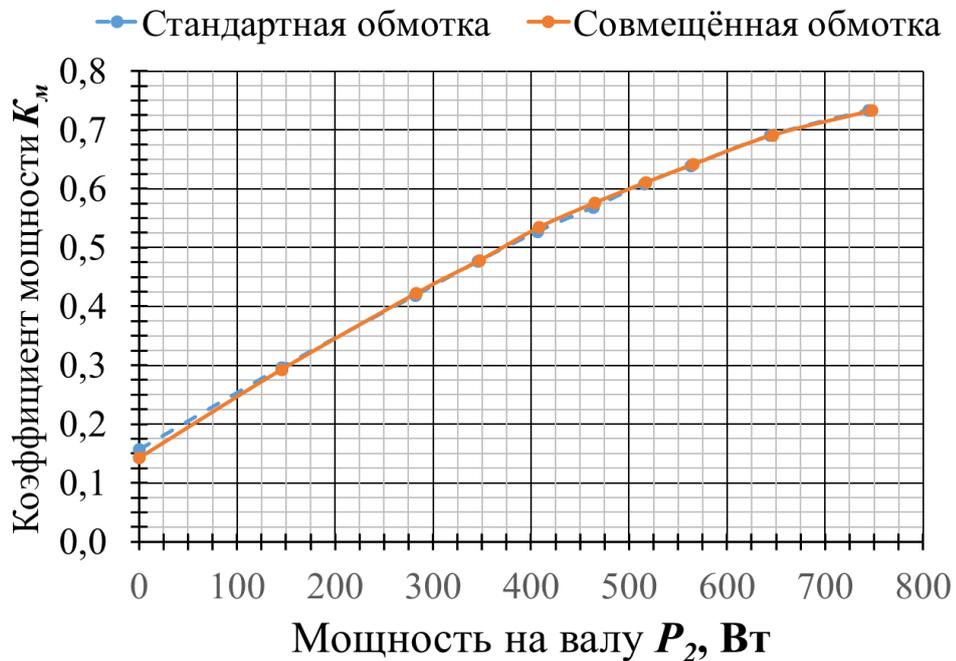


Рисунок 4.17 – Зависимость коэффициента мощности от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Расчёты показывают, что АД с совмещённой обмоткой обладает большим КПД, чем двигатель со стандартной обмоткой на всём диапазоне рассматриваемых мощностей. Причём наибольшая разница проявляется при недогрузке двигателя. При номинальной же мощности КПД двигателя с совмещённой обмоткой на 3,1 % больше, чем КПД двигателя со стандартной обмоткой.

Как видно из рисунка 4.17 коэффициент мощности двигателя с совмещённой обмоткой практически не отличается от коэффициента мощности стандартного двигателя. Это объясняется тем, что такой двигатель обладает меньшими потерями активной мощности. Однако, как было установлено ранее (таблица 4.10 и рисунок 4.16), в экспериментальном двигателе происходит снижение и активной и реактивной потребляемой мощности. Поэтому, несмотря на то что коэффициент мощности остался практически неизменным, более важным является факт снижения реактивной мощности.

Для оценки работы двигателей совместно с рабочей машиной необходимо исследовать его механическую характеристику (рисунок 4.18).

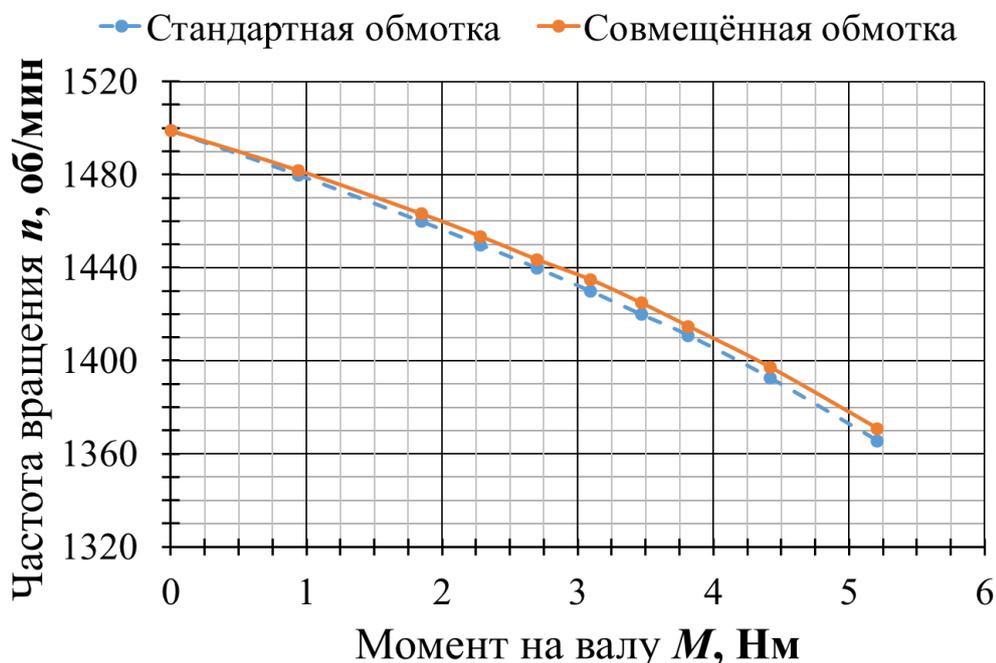


Рисунок 4.18 – Механическая характеристика: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Из рисунка 4.18 видно, что хоть и АД с совмещённой обмоткой имеет большую частоту вращения при одинаковом моменте на валу, чем двигатель со стандартной обмоткой, разница эта не велика. Так, например при номинальной нагрузке она составляет всего 5 об/мин, что менее 1 %. И что вполне оправдано, если считать, что увеличение числа оборотов вызвано снижением асинхронных моментов от ВПГ, которые в свою очередь оказывают наибольшее влияние при пуске и разгоне двигателя. В рабочей же части механической характеристики, которая изображена на рисунке 4.18, их действие не столь велико.

4.3.4 Опыт короткого замыкания

Цель опыта – определить мощность и ток короткого замыкания, а также значение момента при пуске двигателей.

Опыт короткого замыкания проводится при заторможенном роторе, что соответствует режиму пуска двигателя, а значит токи, мощности и моменты замеренные в ходе опыта будут иметь сходство с аналогичными значениями, получаемыми во время пуска.

В опыте к двигателям от индукционного регулятора подводилось пониженное напряжение (во избежание больших токов), а ротор был заторможен с помощью груза, подвешенного на балке (рисунок 4.11). По массе груза и длине плеча определялся момент действующий на ротор двигателя. Данные испытания проводились при значениях подводимых фазных напряжений: 30, 40, 50, 60 и 70 В.

Опыт при каждом значении напряжения повторялся несколько раз. В таблице 4.12 приведены среднеарифметические значения линейного тока (ток короткого замыкания), фазного напряжения, суммарной потребляемой активной мощности (мощность короткого замыкания) и пускового момента, полученные в ходе исследования для двигателей со стандартной и совмещённой обмотками.

Таблица 4.12 – Результаты измерения в опыте короткого замыкания

| Питающее фазное напряжение U , В | Стандартная обмотка | | | Совмещённая обмотка | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|
| | Ток короткого замыкания I_k , А | Мощность короткого замыкания P_k , Вт | Пусковой момент M_n , Н·м | Ток короткого замыкания I_k , А | Мощность короткого замыкания P_k , Вт | Пусковой момент M_n , Н·м |
| 30 | 1,01 | 60,0 | 0,196 | 1,04 | 61,3 | 0,208 |
| 40 | 1,34 | 105,0 | 0,294 | 1,38 | 107,5 | 0,310 |
| 50 | 1,68 | 170,0 | 0,478 | 1,73 | 176,3 | 0,515 |
| 60 | 2,01 | 255,0 | 0,698 | 2,08 | 263,8 | 0,751 |
| 70 | 2,35 | 350,0 | 0,980 | 2,43 | 362,5 | 1,078 |

Данные опыта, представленные в виде зависимостей от напряжения, изображены на рисунках 4.19, 4.20 и 4.21.

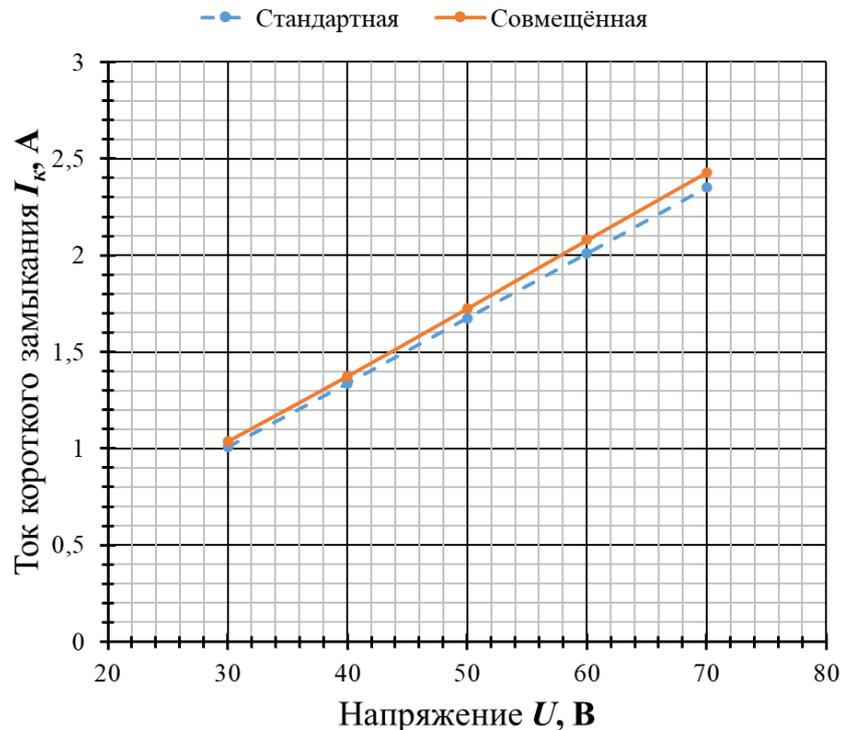


Рисунок 4.19 – Зависимость тока короткого замыкания от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

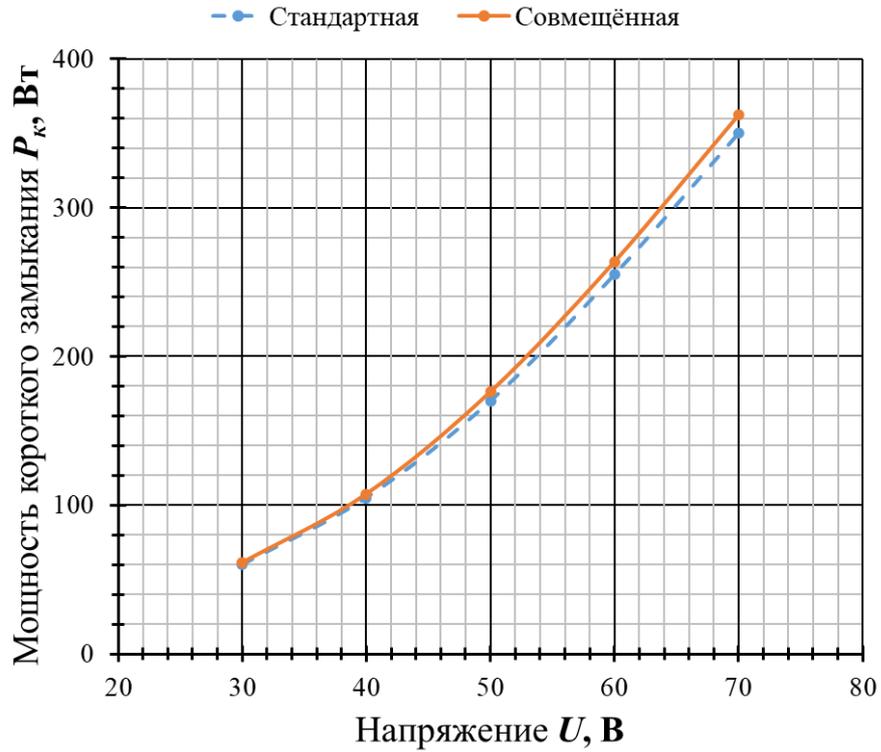


Рисунок 4.20 – Зависимость мощности короткого замыкания от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

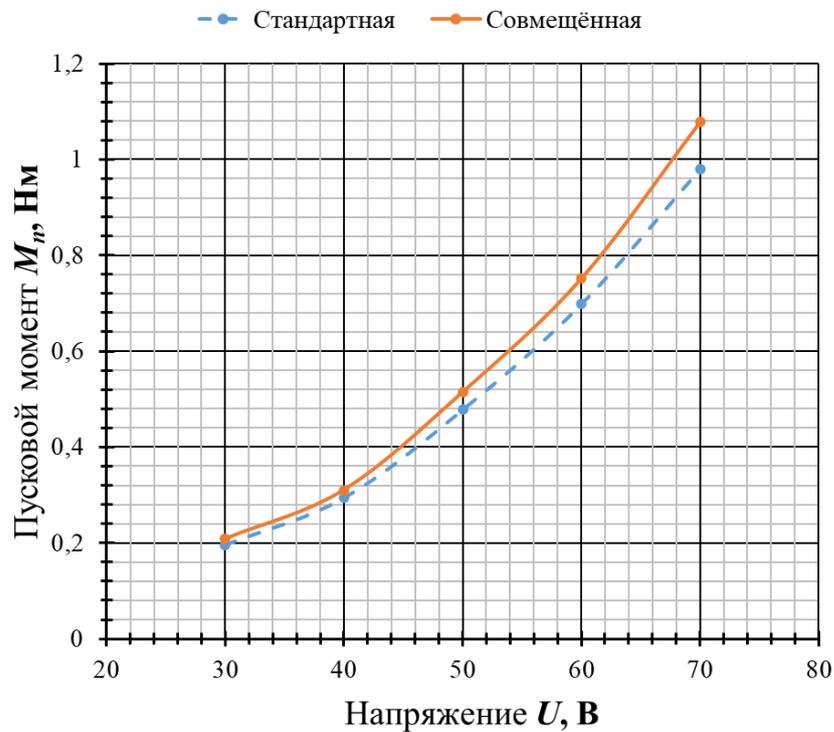


Рисунок 4.21 – Зависимость пускового момента от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Из рисунков 4.19–4.21 и таблицы 4.12 видно, что в режиме короткого замыкания значение потребляемого тока и активной мощности больше для АД с совмещённой обмоткой, однако при этом и пусковой момент такого двигателя также больше, чем у стандартного.

Для ориентировочного определения значений токов короткого замыкания (пусковых токов), мощности короткого замыкания и пускового момента при номинальном напряжении была проведена аппроксимация в программе Excel зависимостей 4.19–4.21 и построена линия тренда до напряжения 220 В. При этом, пренебрегая насыщением, считаем, что зависимость тока от напряжения линейная, а мощности и момента степенная (квадратичная). Полученные графики изображены на рисунках 4.22–4.24.

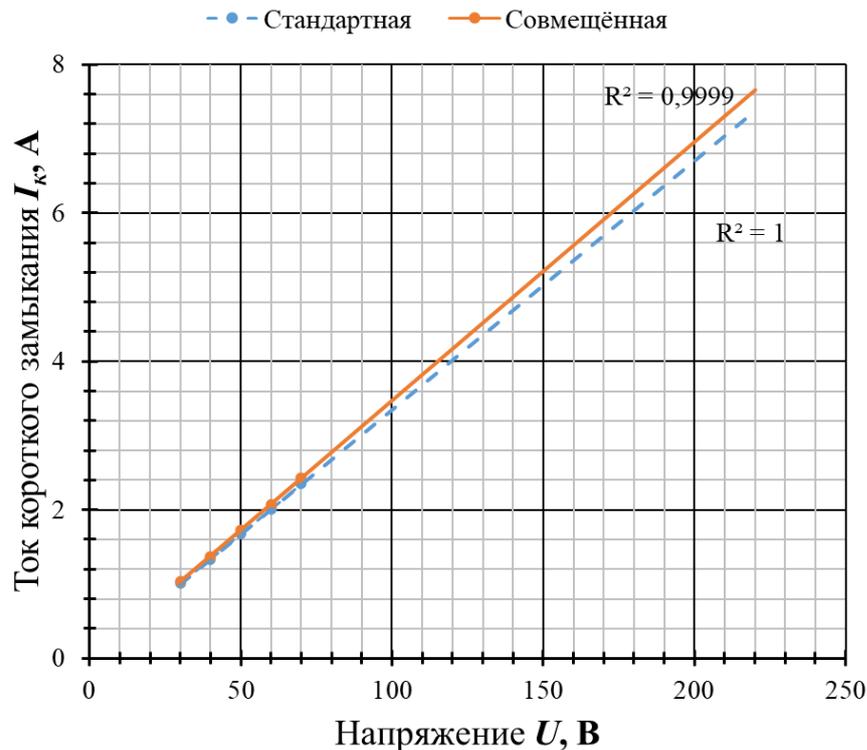


Рисунок 4.22 – Аппроксимированная зависимость тока короткого замыкания от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

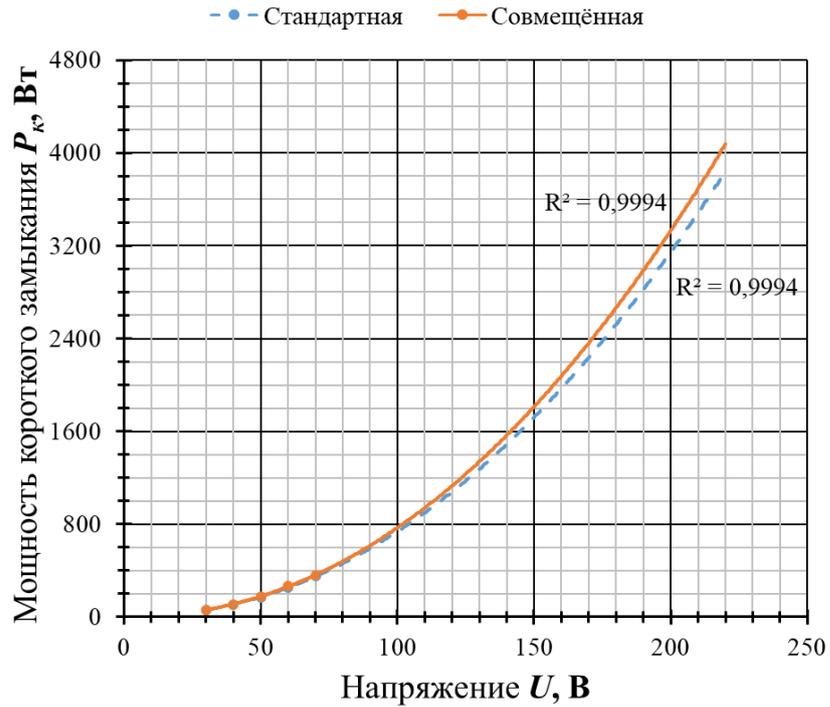


Рисунок 4.23 – Аппроксимированная зависимость мощности короткого замыкания от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

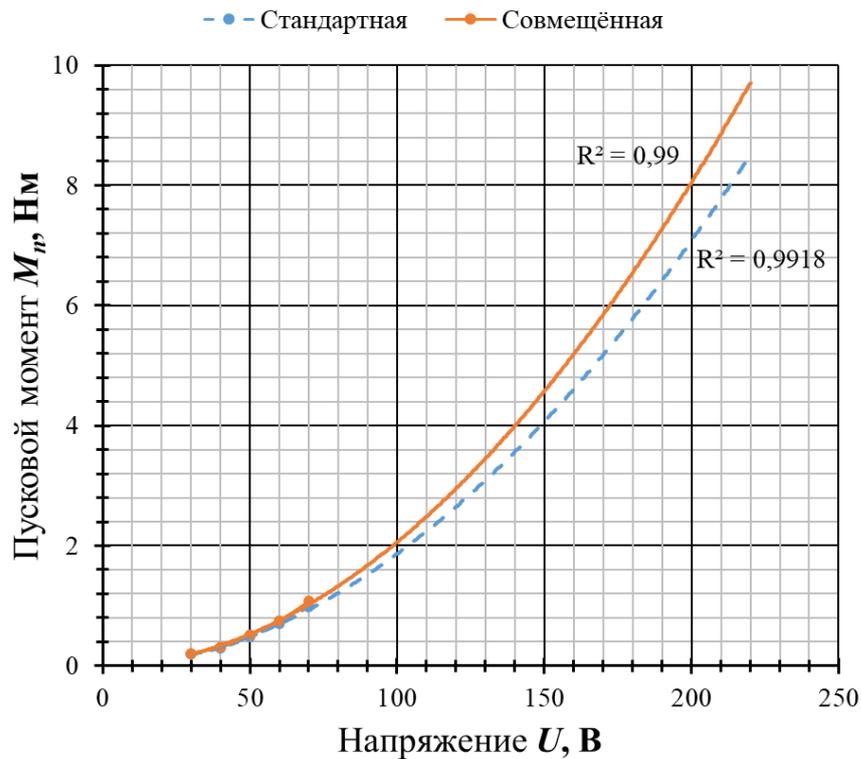


Рисунок 4.24 – Аппроксимированная зависимость пускового момента от напряжения: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

По формуле (4.35) определим процентную разницу изменения тока, мощности и пускового момента, полученных в опыте короткого замыкания. Результаты приведены в таблице 4.13, при этом для удобства восприятия процентная разница представлена без учёта знака.

Таблица 4.13 – Разница значений тока короткого замыкания, мощности короткого замыкания и пускового момента двигателей

| Напряжение U, В | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 220 |
|---|------|------|------|------|------|-------|
| Увеличение тока короткого замыкания ΔI_k, % | 2,89 | 2,80 | 2,99 | 3,53 | 3,37 | 3,38 |
| Увеличение мощности короткого замыкания ΔP_k, % | 2,09 | 2,39 | 3,68 | 3,43 | 3,58 | 5,84 |
| Увеличение пускового момента ΔM_n, % | 6,25 | 5,56 | 7,69 | 7,60 | 10,0 | 14,11 |

По результатам из таблицы 4.13 можно заключить, что опытный АД с совмещённой обмоткой при номинальном напряжении сети имеет большие значения пускового тока на 3,38%, потребляемой активной мощности на 5,84% и развиваемого пускового момента на 14,11%. Увеличение тока и мощности во время пуска двигателя можно связать в первую очередь с уменьшением активного сопротивления обмотки. Увеличение же пускового момента, по всей видимости предположительно вызвано двумя факторами: уменьшением ВПГ и активного сопротивления статора.

Увеличение тока короткого замыкания является негативным фактором, однако в большинстве приводов пуск длится не долго и небольшое возрастание токов при этом не должно сильно повлиять на их работу. Кроме того, увеличение пускового момента может приводить к сокращению времени разгона двигателя.

4.3.5 Исследование распределения токов по фазам в двигателе с совмещённой обмоткой

Цель исследования – определить, как в двигателе с совмещённой обмоткой распределяются токи между фазами «звезды» и «треугольника».

Опыт проводился в двух крайних режимах работы двигателя: при холостом ходе и при коротком замыкании. Схема испытания изображена на рисунке 4.25 а. С помощью приборов К505 замерялись токи: линейный, фазный в «звезде» и два фазных в «треугольнике». В остальном же программа испытаний такая же как была для опытов холостого хода и короткого замыкания.

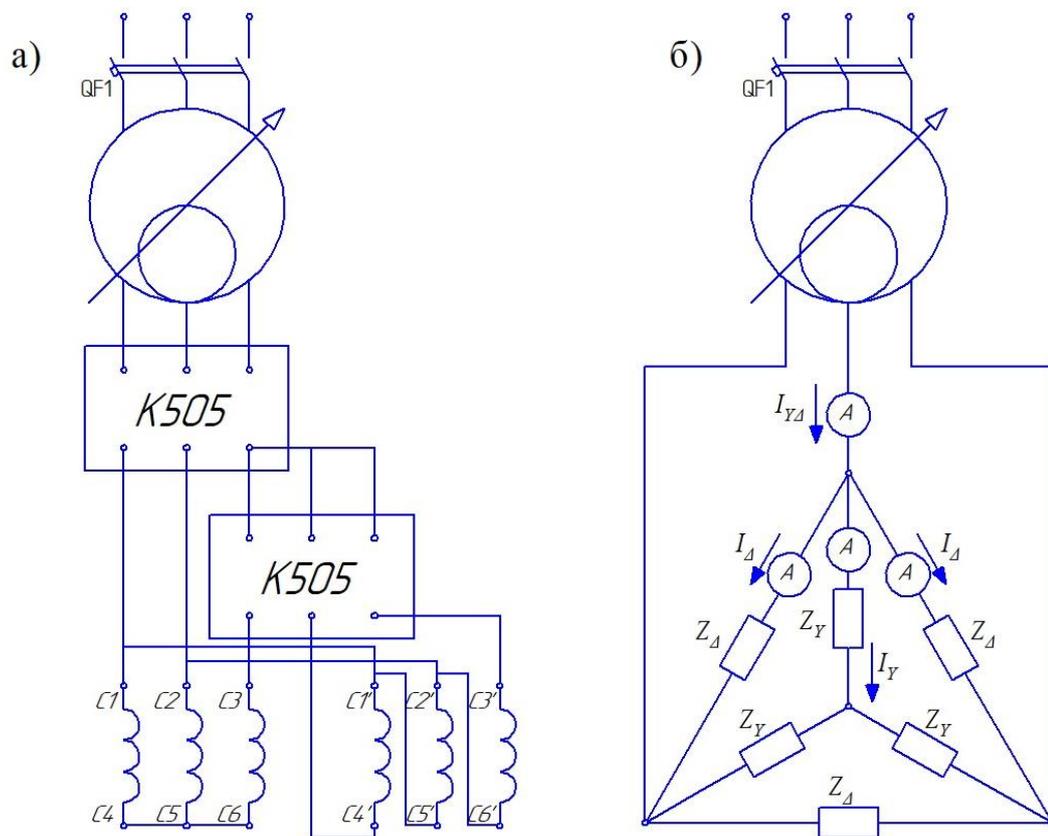


Рисунок 4.25 – Схема испытания по определению распределения токов в асинхронном двигателе с совмещённой обмоткой: а) реальная схема; б) эквивалентная схема

В совмещённой обмотки с параллельным соединением фаз «звезды» и «треугольника» теоретически возможно не пропорциональное распределение токов

между фазами, что приведёт к более сильному нагреву одной из обмоток. Это может происходить вследствие несоответствия реального соотношения сопротивлений фаз теоретическому. Для случая, если при проектировании закладывается равное разделение мощности между «звездой» и «треугольником» соотношение их сопротивлений должно быть $z_{\Delta}/z_Y=3$. При этом токи распределяются следующим образом:

$$I_Y = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} = \frac{I_{Y\Delta}}{2}, \quad (4.41)$$

где I_Y и I_{Δ} – действующее значение токов, протекающих по фазам «звезды» и «треугольника» соответственно, А;

$I_{Y\Delta}$ – линейный ток двигателя с совмещённой обмоткой, А.

Для определения процентной разницы между токами, протекающими по фазам «треугольника» и «звезды» воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta I_{Y\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\Delta} - I_{Y\Delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\Delta}} \cdot 100\%. \quad (4.42)$$

Процентную разницы между токами, протекающими по фазам «треугольника» и «звезды», полученными в эксперименте и в результате расчёта по формуле 4.41 (в расчёте $I_{Y\Delta}$ берётся из эксперимента) определим по формулам:

$$\Delta I_Y = \frac{I_Y - I_{Y\text{теор}}}{I_Y} \cdot 100\%; \quad (4.43)$$

$$\Delta I_{\Delta} = \frac{I_{\Delta} - I_{\Delta\text{теор}}}{I_{\Delta}} \cdot 100\%, \quad (4.44)$$

где $I_{Y\text{теор}}$ и $I_{\Delta\text{теор}}$ – соответственно действующее значение токов, протекающих по фазам «звезды» и «треугольника», полученные в результате расчёта, А.

В таблице 4.14 приведены результаты испытаний двигателя на холостом ходу и процентные разницы, полученные по формулам 4.42–4.44.

Таблица 4.14 – Результаты исследования распределения токов по фазам двигателя с совмещённой обмоткой на холостом ходу

| Напряжение U , В | Линейный ток $I_{Y\Delta}$, А | Ток «звезды» | | Ток «треугольника» | | Разница $\Delta I_{Y\Delta}$, % |
|--------------------|--------------------------------|--------------|------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|
| | | I_Y , А | ΔI_Y , % | I_{Δ} , А | ΔI_{Δ} , % | |
| 230 | 1,77 | 0,88 | -0,81 | 0,52 | 2,47 | 3,25 |
| 220 | 1,55 | 0,77 | -0,77 | 0,46 | 2,38 | 3,12 |
| 210 | 1,35 | 0,67 | -0,86 | 0,40 | 2,19 | 3,03 |
| 200 | 1,19 | 0,59 | -0,88 | 0,35 | 2,12 | 2,98 |
| 190 | 1,06 | 0,52 | -1,02 | 0,31 | 2,12 | 3,11 |
| 180 | 0,94 | 0,47 | -0,98 | 0,28 | 2,19 | 3,14 |

На рисунке 4.26 изображены зависимости токов короткого замыкания от напряжения, к которым применена линейная аппроксимация и построены линии тренда до напряжения 220 В.

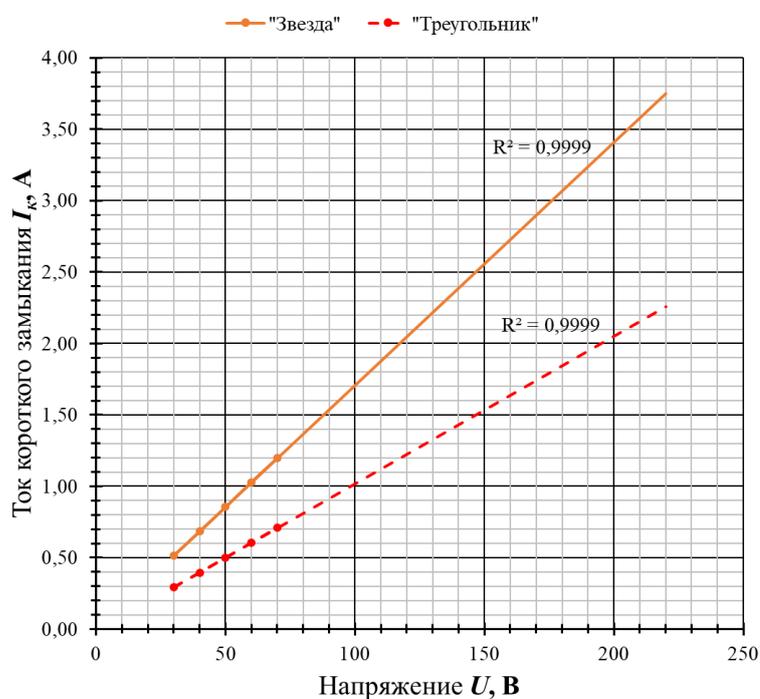


Рисунок 4.26 – Аппроксимированная зависимость токов короткого замыкания от напряжения для фаз двигателя с совмещённой обмоткой: сплошной линией – ток в фазах «звезды»; пунктирной линией – в фазах «треугольника»

В таблице 4.15 приведены результаты испытаний двигателя в режиме короткого замыкания и процентные разницы, найденные по формулам 4.42–4.44. Значения токов при напряжении 220 В получены в результате линейной аппроксимации и построения линии тренда.

Таблица 4.15 – Результаты исследования распределения токов по фазам двигателя с совмещённой обмоткой, работающего в режиме короткого замыкания

| Напряжение U , В | Линейный ток $I_{Y\Delta}$, А | Ток «звезды» | | Ток «треуголь- ника» | | Разница $\Delta I_{Y\Delta}$, % |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | | I_Y , А | ΔI_Y , % | I_{Δ} , А | ΔI_{Δ} , % | |
| 30 | 1,04 | 0,52 | -0,40 | 0,30 | -1,24 | -0,84 |
| 40 | 1,38 | 0,68 | -0,61 | 0,40 | -0,28 | 0,33 |
| 50 | 1,73 | 0,85 | -0,98 | 0,50 | 0,41 | 1,37 |
| 60 | 2,08 | 1,03 | -1,01 | 0,60 | 0,66 | 1,65 |
| 70 | 2,43 | 1,20 | -1,57 | 0,71 | 1,00 | 2,53 |
| 220 | 7,65 | 3,75 | -2,00 | 2,25 | 1,85 | 3,77 |

Из результатов исследования видно, что замеренный ток в «треугольнике» превосходит расчётное значение, причём с ростом напряжения эта разница становится более заметной, хоть и небольшой. Причиной тому могут быть токи гармоник кратных трём, замкнутые по фазам «треугольника». Они могут появляться вследствие насыщения магнитной цепи [19]. А также на это могло частично повлиять заниженное активное сопротивление «треугольника».

Результаты данного исследования можно использовать при составлении схемы защиты от перегрузки двигателя с совмещённой обмоткой. Так, согласно ГОСТу для тепловых реле, ток, протекающий по главной цепи, не должен отличаться от заданного значения более чем на $\pm 2\%$ [28]. В исследуемом двигателе измеренный при номинальном напряжении ток в «треугольнике» отличается от расчётного на 1,85% при коротком замыкании и на 2,38% при холостом ходе. А значит

по усмотрению могут использоваться три различных способа подключения главных контактов теплового реле: к линейным проводам (как для стандартного двигателя); в фазы «звезды» и «треугольника» (для этого потребуются два тепловых реле); только в фазы «треугольника». На рисунке 4.27 изображены варианты схемы подключения главных контактов теплового реле в фазы «звезды» и «треугольника» и только в фазы «треугольника».

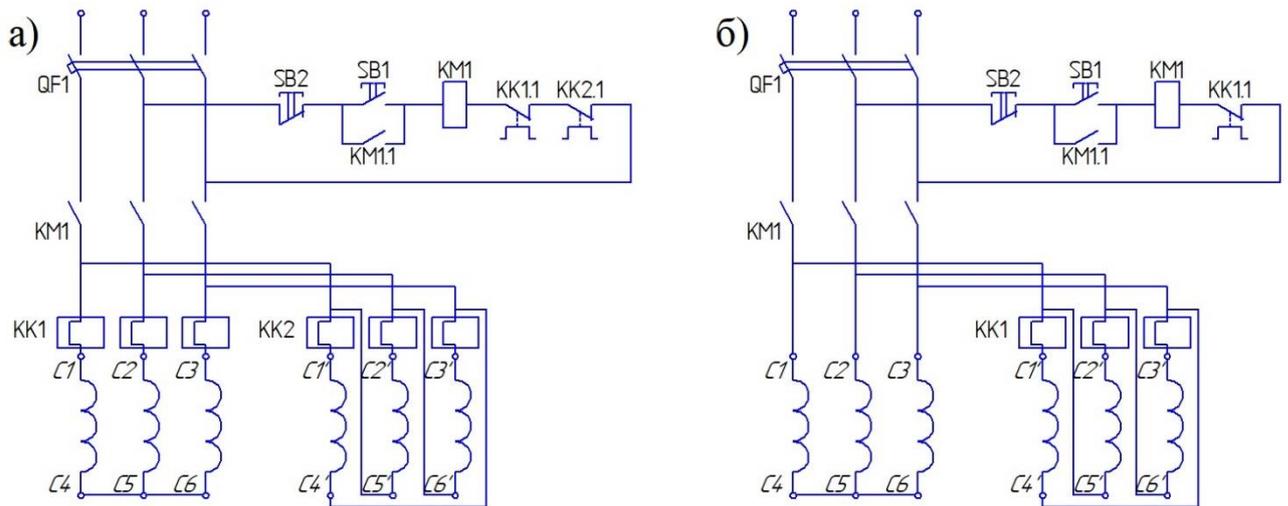


Рисунок 4.27 – Схема подключения теплового реле для асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой: а) подключение главных контактов в фазы «звезды» и «треугольника»; б) только в фазы «треугольника»

На рисунке 4.27 предлагается устанавливать трёхполюсное тепловое реле, так как в случае обрыва одной из питающих линий, токи в фазах треугольника могут отличаться [74].

Рассмотрим, как распределяются токи по фазам двигателя в случае обрыва одного из линейных проводов. На рисунке 4.28 а изображена схема испытания.

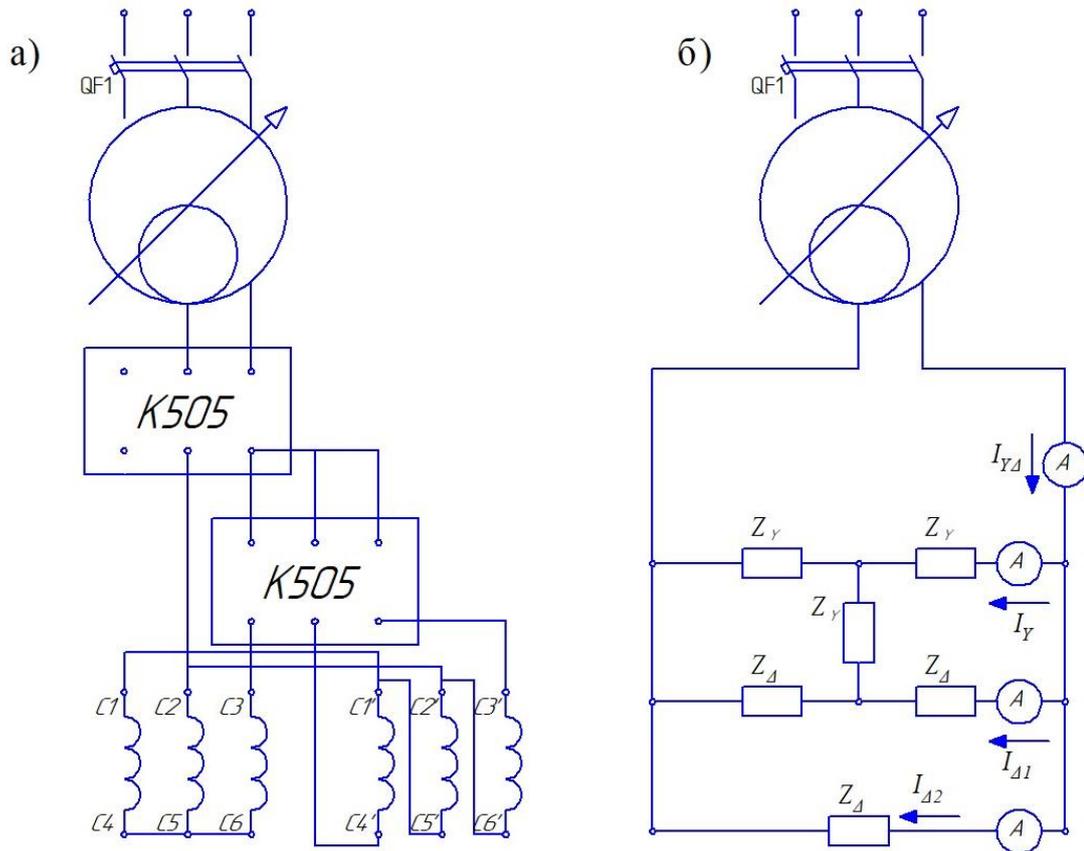


Рисунок 4.28 – Схема испытания по определению распределения токов в асинхронном двигателе с совмещённой обмоткой при обрыве одного линейного провода: а) реальная схема; б) эквивалентная схема

Опыт проводился в режиме короткого замыкания при значении фазного напряжения 30 В. В ходе опыта определялись токи, протекающие в линии и фазах двигателя. Результаты исследования приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Результаты исследования распределения токов по фазам двигателя с совмещённой обмоткой, работающего в режиме короткого замыкания при обрыве одного линейного провода ($U=30$ В)

| | Линейный ток $I_{Y\Delta}$ | Ток «звезды» I_Y | Ток «треугольника» | |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| | | | $I_{\Delta 1}$ | $I_{\Delta 2}$ |
| Значение в А | 0,91 | 0,45 | 0,15 | 0,30 |
| Относительно 3-фазного режима | 0,88 | 0,88 | 0,51 | 1,02 |

Из схемы 4.28 б можно получить теоретические выражения для токов через значение напряжения и сопротивления «треугольника» (считая $z_{\Delta}=3 \cdot z_Y$):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{Y\Delta} = \frac{U_{\text{л}}}{\frac{2 \cdot z_Y \cdot z_{\Delta}}{3 \cdot z_Y + z_{\Delta}}} = 3 \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_Y = \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot z_Y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 1} = \frac{U_{\text{л}}}{2 \cdot z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 2} = \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}. \end{array} \right. \quad (4.45)$$

В случае же питания двигателя от трёх фаз уравнения для токов будут выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{Y\Delta} = 2\sqrt{3} \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_Y = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot z_Y} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta} = \frac{U_{\text{л}}}{z_{\Delta}}. \end{array} \right. \quad (4.46)$$

Сравнивая между собой уравнения 4.45 и 4.46 получаем, что при обрыве одного линейного провода в режиме короткого замыкания линейный ток и ток в двух фазах «звезды» отличается в 0,866 от тока при питании от трёх фаз. Ток в одной из фаз «треугольника» равен току при работе от трёхфазного напряжения, в двух других же фазах он меньше в два раза.

Из результатов исследования получается, что наиболее нагружена будет одна из фаз «треугольника», причём, как и для двигателя со стандартной обмоткой [74], ток в ней возрастает сильнее, чем в линейных проводах. Из этого следует, что наиболее удачным будет включение нагревательных элементов теплового реле в фазы «треугольника».

Основные результаты экспериментальных исследований опубликованы в статьях [44, 62, 64, 77].

4.3.6 Исследование нагрева двигателей

В процессе работы двигателя потери мощности в нём преобразуются в тепло. Известно, что одним из факторов, влияющих на срок службы электрической изоляции, является её температура. Так к одному из важнейших свойств диэлектрика (изоляции) относится нагревостойкость – способность выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств [14].

В зависимости от значений допустимых в эксплуатации температур, изоляция делится на классы нагревостойкости [32] и температурные индексы. Температурный индекс численно равен значению температуры в градусах Цельсия, полученному из графика сроков службы при времени срока службы 20000 ч [29]. Так для эмалевой изоляции провода ПЭТВ-2, который использовался при перемотке двигателей, температурный индекс соответствует 130°C, что соответствует классу нагревостойкости В. Для данного провода превышение температуры в 130°C приводит к снижению срока службы изоляции. И наоборот, при работе двигателя с меньшей температурой обмотки повышает срок службы изоляции.

Известна [14, 21, 42] зависимость срока службы изоляции от рабочей температуры:

$$\ln \tau' = \frac{B'}{T^\circ} - G, \quad (4.47)$$

где τ' – срок службы изоляции, ч;

B' и G – постоянные, зависящие от состава и структуры вещества;

T° – абсолютная температура изоляции, К.

Если известен срок службы изоляции τ'_0 при температуре T°_0 , то используя уравнение (4.47), можно рассчитать ориентировочный срок службы при температуре T° :

$$\tau' = \tau'_0 \cdot \exp \left[-B' \cdot \left(\frac{1}{T^\circ} - \frac{1}{T^\circ_0} \right) \right]. \quad (4.48)$$

Цель опыта – сравнить температуры обмоток двигателя и оценить изменение срока службы двигателя при применении в нём совмещённой обмотки вместо стандартной.

Ввиду невозможности продолжительной работы нагрузочного устройства опыт проводился на холостом ходу при трёх значениях напряжения (фазное значение): 180, 200 и 220 В. В ходе опыта определялись: линейные токи, потери холостого хода и активное сопротивление фаз.

Перед проведением опыта была замерена температура окружающей среды, она составила 22°C и активные сопротивления обмоток двигателя. Затем к исследуемому двигателю через индукционный регулятор подводилось напряжение, фазное значение которого составляло 180 В. Двигатель работал 10 минут, после чего отключалось питание и проводился замер сопротивлений обмотки. Затем на двигатель снова подавалось напряжение, но уже величиной 200 В, при котором он также работал 10 минут. Далее, аналогичным образом, осуществлялся замер показателей. И в последнюю очередь проводились испытания при напряжении 220 В по описанному выше циклу.

Средняя температура обмоток определялась исходя из зависимости изменения сопротивления обмотки от её температуры:

$$t = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) + t_0, \quad (4.49)$$

где r и r_0 – активные сопротивления обмоток, Ом, при температурах t и t_0 , °C, соответственно;

$\alpha=0,004$ – температурный коэффициент сопротивления меди.

Результаты измерений опыта приведены в таблице 4.17

Таблица 4.17 – Результаты измерений в исследовании нагрева двигателя

| Напряжение U , В | | 0 | 180 | 200 | 220 |
|---------------------------------|----|---|------|------|------|
| Ток холостого хода I_0 , А | Y | 0 | 0,99 | 1,25 | 1,63 |
| | YΔ | 0 | 0,94 | 1,18 | 1,54 |

Продолжение таблицы 4.17

| | | | | | |
|---|-------------------------|------|------|-------|-------|
| Потери холостого хода P_0, Вт | У | 0 | 95,0 | 120,0 | 165,0 |
| | УΔ | 0 | 80,0 | 102,5 | 142,5 |
| Сопротивление обмотки r, Ом | У | 10,2 | 10,7 | 11,0 | 11,4 |
| | УΔ «звезда» | 19,3 | 19,8 | 20,4 | 21,0 |
| | УΔ «треугольник» | 52,5 | 54,0 | 55,7 | 57,3 |
| Средняя температура обмотки t, °С | У | 22,0 | 35,6 | 42,8 | 51,6 |
| | УΔ «звезда» | 22,0 | 29,3 | 36,5 | 44,9 |
| | УΔ «треугольник» | 22,0 | 29,0 | 37,1 | 45,0 |

Из данных, полученных в ходе опыта видно, что АД с совмещённой обмоткой на холостом ходу нагревается меньше, чем двигатель со стандартной обмоткой. При номинальном напряжении разница средних температур стандартной обмотки и фаз совмещённой обмотки, соединённых «треугольником», составляет примерно 6,7°С. На первый взгляд можно подумать, что разница возникает вследствие разницы электрических потерь в обмотках статора, однако результаты исследования показывают, что наиболее близкими между двумя двигателями являются зависимости температуры обмотки от потерь холостого хода. Причиной тому, по всей видимости является, что помимо нагрева самой обмотки, тепловая энергия к ней передаётся также от нагрева железа статора, вследствие магнитных потерь. На рисунке 4.29 изображена зависимость средней температуры обмотки от потерь холостого хода.

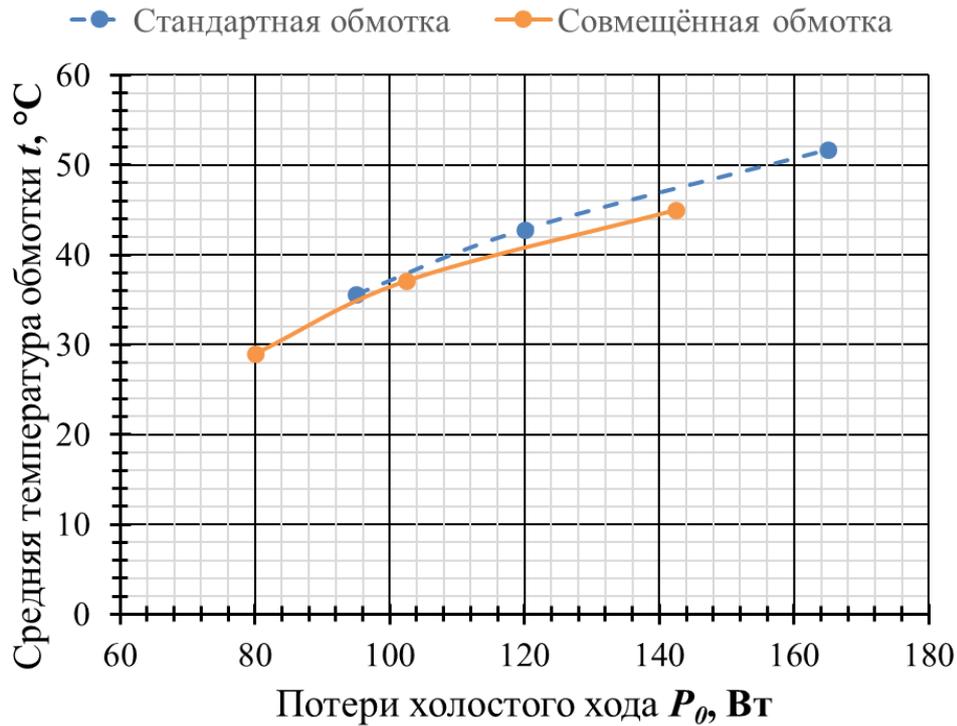


Рисунок 4.29 – Зависимость средней температуры обмотки от потерь холостого хода: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Полученные выводы нельзя переносить в полной мере на двигатель, работающий под нагрузкой. Более того, на срок службы изоляции, помимо её температуры, влияет множество других факторов: напряжённость электрического поля, вибрации, количество дефектов изоляции, качество пропитки, состав окружающей среды и другие. Однако, цель данного исследования оценить возможность повышения надёжности АД, за счёт снижения потерь в нём при применении совмещённой обмотки вместо стандартной. Для этого проведём расчёт срока службы изоляции по формуле (4.48) сделав допущение, что двигатель со стандартной обмоткой, работая под нагрузкой, имеет температуру обмотки 130°C, а двигатель с совмещённой температурой меньше на значение, полученное в опыты – 6,7°C.

$$\tau' = 2 \cdot 10^4 \cdot \exp \left[-0,95 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{403} - \frac{1}{396,3} \right) \right] = 2,98 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

Постоянная B' была взята для класса изоляции В [21]. Результаты оценочного расчёта показывают, что снижению температуры обмотки на 6,7° приводит к

повышению срока службы изоляции на 9793 ч или в 1,49 раза. Причём, стоит отметить, что чем ниже температура, при которой работает обмотка тем большее влияние оказывает уменьшение температуры. Так, если стандартный двигатель работал при температуре 105°C, а двигатель с совмещённой обмоткой при 98,3°C, то срок службы изоляции второго был бы выше в 1,57 раза при прочих равных условиях.

Данные результаты стоит воспринимать как ориентировочные. Они показывают, что применение совмещённой обмотки потенциально может приводить к повышению срока службы АД. Для точных показателей следует провести более обширные и массовые исследования двигателя с такими обмотками.

Выводы по главе:

1. Разработанная методика перерасчёта обмотки статора со стандартной на совмещённую позволяет определить обмоточные данные для нескольких вариантов таких обмоток, что позволяет упростить подбор обмоточных проводов. Расчёты, полученные программой для перерасчёта, совпадают с расчётами, проведёнными вручную.

2. Результаты опыта холостого хода показывают, что экспериментальный АД с совмещённой обмоткой потребляет меньший ток и мощность при работе без нагрузки, чем двигатель со стандартной обмоткой. Причём снижаются как их активные, так и реактивные составляющие. Так при номинальном напряжении активные составляющие тока и мощности снизились на 14,78%, а реактивные на 5,48%.

3. Снижение потерь холостого хода при применении совмещённой обмотки обусловлено снижением всех их составляющих. Наибольшее снижение показали потери в обмотке статора. Причина этому является уменьшение потребляемого тока и эквивалентного активного сопротивления обмотки. Снижение потребляемой реактивной мощности можно объяснить двумя причинами: из-за небольшого увеличения числа витков и уменьшения дифференциального рассеяния, вызванного ВПГ.

4. Испытания под нагрузкой показали, что АД с совмещённой обмоткой потребляет меньшую активную и реактивную мощность, чем двигатель со стандартной. Наибольшая разница в КПД двигателей оказалась при нагрузке 46% от номинальной и составила 5,1%, при номинальной нагрузке двигатель с совмещённой обмоткой имел КПД больший на 3,1%. Коэффициенты мощности обоих двигателей на всём диапазоне нагрузок практически не отличаются друг от друга, несмотря на меньшее потребление реактивной мощности АД с совмещённой обмоткой. При исследовании рабочей части механической характеристики двигателей между ними также не было существенных различий в значениях.

5. По результатам опыта короткого замыкания установлено, что АД с совмещённой обмоткой во время пуска развивает больший момент (на 14,11%), чем двигатель со стандартной. Однако для такого двигателя значения пускового тока и активной мощности также больше.

6. Из результатов исследования распределения токов по фазам в двигателе с совмещённой обмотке обнаружено, что ток в «треугольнике» немного (на 1,85% при коротком замыкании и на 2,38%) превосходит ожидаемое значение. Из чего следует, что нагревательные элементы теплового реле лучше всего включать в фазы «треугольника».

7. Исследования нагрева двигателей показали, что на холостом ходу АД с совмещённой обмоткой по причине меньших потерь в нём имеет более низкую температуру, чем двигатель со стандартной обмоткой. При номинальном напряжении разница средних температур обмоток составила 6,7°C. Данное исследование показывает потенциал применения совмещённых обмоток для повышения надёжности АД.

ГЛАВА 5. РАСЧЁТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКИ В АСИНХРОННОМ ДВИ- ГАТЕЛЕ

5.1 Применение асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой для турбо- механизмов

В первой главе было установлено, что АД в промышленности и сельском хозяйстве получили наибольшее распространение в качестве приводов вентиляторов и транспортёров. Транспортёры преимущественно обладают простой механической характеристикой, при которой момент сопротивления на зависит от частоты вращения [75]. Для турбомеханизмов же, к которым относятся вентиляторы, центробежные насосы, сепараторы и прочее, момент с увеличением частоты возрастает нелинейно. Поэтому исследование двигателя с совмещённой обмоткой в качестве привода вентилятора будет наиболее интересно и актуально.

Предварительные испытания двигателей с совмещённой и стандартной обмотками были проведены для привода вентилятора в калорифере и описаны в статье [60]. Результаты исследования приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты испытания двигателей в качестве привода вентилятора в калорифере

| | Напряжение сети (фазное) U , В | Сила тока I , А | Потребляемая активная мощ- ность P_I , Вт |
|-----------------------|--|-------------------|---|
| Стандартная обмотка | 234 | 2,14 | 260 |
| Совмещённая обмотка | 234 | 2,03 | 242 |
| Процентная разница, % | - | 5,06 | 6,92 |

По результатам предварительных исследований установлено, что АД с совмещённой обмоткой имеет меньшее потребление активной мощности, чем

стандартный двигатель при их работе в качестве привода вентилятора в калорифере. Однако, как можно заметить, нагрузка для двигателей в предварительных испытаниях была низкой, поэтому для основных испытаний был выбран вентилятор с большей производительностью.

Основные испытания проводились на осевом вентилятор низкого давления ВО 06-300-6,3, который рассчитан на двигатель мощностью 0,75 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Производительность вентилятора составляет 8,0–9,0 тыс. м³/ч, а рабочее давление 210–220 Па [17]. На рисунке 5.1 изображён данный вентилятор с приводом от АД с совмещённой обмоткой.



Рисунок 5.1 – Вентилятор ВО 06-300-6,3 с асинхронным двигателем с совмещённой обмоткой

В таблице 5.2 приведены результаты испытаний двигателей в качестве привода вентилятора 06-300-6,3. Опыты для привода с двигателем со стандартной и совмещённой обмоткой проводились в один день при одном и том же значении напряжения, фазное значение которого составляло 236 В.

Таблица 5.2 – Результаты испытания двигателей в качестве привода вентилятора ВО 06-300-6,3

| | Сила тока I, А | Потребляемая активная мощность P_1, Вт | Реактивная мощность Q, вар |
|------------------------------|--|--|--|
| Стандартная обмотка | 2,88 | 1586,7 | 1278,2 |
| Совмещённая обмотка | 2,79 | 1526,7 | 1258,4 |
| Процентная разница, % | 2,90 | 3,78 | 1,55 |

Как видно из таблицы 5.2, электропривод вентилятора с двигателем с совмещённой обмоткой при одинаковой производительности обладает меньшим потреблением активной энергии, чем привод со стандартным двигателем. Полученные данные будут использоваться для расчёта экономической эффективности.

Результаты диссертационной работы были внедрены на другом типе турбомеханизмов, а именно на электродвигателе привода фекального насоса. При ремонте двигателя А180S4 мощностью 22 кВт была применена 12-зонная совмещённая обмотка. Данный двигатель используется ООО «Восточный» в качестве привода насоса на участке очистительных сооружений с июля 2019 года. В приложении В представлен акт о внедрении.

5.2 Определение экономической эффективности применения совмещённой обмотки при ремонте электропривода вентилятора ВО 06-300-6,3

Из результатов замеров активного сопротивления фаз двигателей, определим длину обмоточного провода по формуле:

$$l = 3 \cdot \frac{r \cdot S}{\rho}, \quad (5.1)$$

где r – активное сопротивление фазы двигателя, Ом;

S – сечение обмоточного провода, мм²;

$\rho=0,0172$ Ом·мм²/м – удельное сопротивление меди при температуре 20°С.

Цифра 3 в формуле (5.1) введена для учёта числа фаз в обмотке.

Стоимость обмоточного провода в зависимости от продавца может отличаться. В работе были взяты цены провода ПЭТВ-2 с сайта организации ООО «Снабкабель» [93].

Материалы для изготовления двигателя рекомендуется брать с запасом. Коэффициенты, учитывающие запас материала, возьмём такие же как для проектируемого двигателя из [26]. Для обмоточного провода – 1,03; для изоляционных материалов – 1,05.

Данные для расчёта стоимости обмоточного провода и его результаты приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Данные расчёта стоимости обмоточного провода

| | Стандартная обмотка | Совмещённая обмотка | |
|---|---------------------|---------------------|---------------|
| | | «Звезда» | «Треугольник» |
| Диаметр провода d , мм | 0,56 | 0,4 | 0,315 |
| Сопротивление при температуре 20°C r , Ом | 10,1 | 19,1 | 52,1 |
| «Чистая» длина провода l , м | 433,9 | 418,6 | 708,2 |
| Заготовительная длина провода $l'=1,03 \cdot l$, м | 446,9 | 431,2 | 729,4 |
| Стоимость одного кг провода, руб/кг | 716 | 720 | 726 |
| Масса на 1 км провода кг/км | 2,2802 | 1,1733 | 0,7075 |
| Стоимость провода, руб | 729,6 | 364,3 | 374,7 |
| | | 738,9 | |

Определим нормы расхода других материалов на перемотку электродвигателей, при этом считая их одинаковыми для двигателей со стандартной и совмещённой обмоткой. Результаты представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Расход дополнительных материалов на перемотку

| Материал | | | Заготовительные (·1,05) | | Стоимость, руб |
|------------------|--------------------------|------|-------------------------|----------|----------------|
| | | | Масса, кг | Длина, м | |
| Синтофлекс 51 | Толщина, мм | 0,25 | $2,55 \cdot 10^{-2}$ | - | 2,55 |
| | | 0,37 | $6,20 \cdot 10^{-3}$ | - | 0,62 |
| Стеклолента ЛЭСБ | Толщина, мм | 0,10 | - | 1,05 | 2,37 |
| | Ширина, мм | 10 | | | |
| Трубка ТКР | Диаметр, мм | 1,0 | - | 0,479* | 1,96 |
| Провод ПВКВ | Сечение, мм ² | 0,5 | - | 0,239* | 2,02 |
| Лак МЛ-92 | - | - | $2,85 \cdot 10^{-3}$ | - | 0,36 |
| Толуол | - | - | $9,51 \cdot 10^{-4}$ | - | 0,07 |

*примечание – длина указана для стандартного двигателя, имеющего в клеммной коробке 6 выводных концов; для двигателя с совмещённой обмоткой, имеющего 12 выводных концов, необходимо умножить длину на 2.

В итоге, просуммировав стоимость всех необходимых материалов для изготовления двигателей, получим: 739,57 руб – для стандартной обмотки и 752,85 руб – для совмещённой обмотки.

В стоимость ремонта помимо стоимости материалов входят транспортные расходы, зарплаты рабочих и накладные расходы, учитывающие налоги, плату за энергию и прочее. В работе при определении транспортных и накладных расходов воспользуемся опытом электроремонтных предприятий [96]. Транспортные расходы примем равными 8% от стоимости материалов, а накладные 50% от заработной платы основных производственных рабочих, которую возьмём равной 125 руб/ч.

Трудозатраты на ремонт с заменой обмотки статора двигателя мощностью 0,75 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин составляют 6,6 чел·ч/шт [96]. Для двигателя с совмещённой обмоткой трудозатраты будем учитывать с коэффициентом $K=1,15$, как для иностранных двигателей [91]. Данный коэффициент введён с целью учёта применения нового, непривычного исполнения для обмотчика вида обмотки.

Итоговая формула определения стоимости перемотанного двигателя:

$$C = (C_n + C_{дм}) \cdot 1,08 + K \cdot TЗ \cdot ЧС \cdot 1,5, \quad (5.2)$$

где C_n и $C_{дм}$ – стоимость обмоточного провода и дополнительных материалов соответственно, руб;

1,08 – коэффициент, учитывающий транспортные расходы;

K – коэффициент учитывающий вид обмотки (для стандартной равен 1);

$TЗ$ – трудозатраты, ч;

$ЧС$ – часовая ставка рабочего, руб/ч;

1,5 – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Проведя расчёт, получим стоимость ремонта двигателя со стандартной обмоткой 2036,24 руб, с совмещённой обмоткой 2236,20 руб.

Определим экономический эффект капитальных вложений [111]:

$$\Delta_r = [(I_c + E_n \cdot K_{ус}) - (I_n + E_n \cdot K_{ун})] \cdot A_n, \quad (5.3)$$

где I_c и I_n – издержки или производственные затраты при существующем и новом варианте, руб;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K_{ус}$ и $K_{ун}$ – удельные капитальные вложения на существующий и новый вариант, руб;

A_n – годовой объём продукции при использовании нового варианта.

При использовании нового варианта перемотанного двигателя с совмещённой обмоткой годовой объём продукции не изменяется по сравнению со старым вариантом (со стандартной обмоткой). Отличие заключается только в снижении

потребления электрической энергии и изменении капитальных вложений. Поэтому формулу (5.3) можно преобразовать:

$$\mathcal{E}_r = C_{эл} \cdot (P_c - P_n) \cdot t + E_n \cdot (K_{ус} - K_{ун}), \quad (5.4)$$

где $C_{эл}$ – стоимость электрической энергии, руб/кВт·ч;

P_c и P_n – средняя потребляемая мощность электродвигателя при старом и новом варианте, кВт;

t – время работы двигателя в году, ч.

В расчётах принимаем стоимость электрической энергии 5 руб/кВт·ч, значение потребляемой активной мощности берём из результатов исследования, время годовой наработки вентилятора 3000 часов, нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений 0,15 (в зависимости от отрасли предприятия может отличаться [82]). Подставив значения в формулу (5.4), получим:

$$\mathcal{E}_r = 5 \cdot (1,587 - 1,527) \cdot 3000 - 0,15 \cdot (2036,24 - 2236,20) = 870,01 \text{ руб.}$$

Чистый дисконтированный доход ЧДД определяется как сумма эффектов за весь расчётный период приведения к начальному моменту времени [111]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (5.5)$$

где T – горизонт расчёта, лет;

R_t – результаты, достигаемые в t -м году, руб;

Z_t – затраты осуществляемые в t -м году, руб;

E – норма дисконта (ставка дисконтирования).

В качестве горизонта расчёты примем срок службы двигателя, который зависит от множества факторов. Если считать, что срок службы двигателя равен сроку службы изоляции обмотки класса В при рабочей температуре в 130°C, то с продолжительностью работы 3000 ч в год, он составит 20000/3000=6,67 года. Норма дисконта для предприятий может принимать различные значения. Более того в литературе нет единого мнения к проблеме её определения [24]. В работе было выбрано ориентировочное значение нормы дисконта. В таблице 5.5 приведены результаты расчёта ЧДД по годам при норме дисконта 0,15.

Таблица 5.5 – Результаты расчёта чистого дисконтированного дохода при норме дисконта 0,15

| Год t , лет | Достижимый результат R_t , руб | Осуществляемые затраты Z_t , руб | ЧДД, руб |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|----------|
| 0 | 0 | 199,96 | -199,96 |
| 1 | 900,00 | 0 | 582,65 |
| 2 | 900,00 | 0 | 1263,18 |
| 3 | 900,00 | 0 | 1854,94 |
| 4 | 900,00 | 0 | 2369,52 |
| 5 | 900,00 | 0 | 2816,98 |
| 6 | 900,00 | 0 | 3206,08 |
| 7 | 900,00 | 0 | 3544,42 |

Для определения дисконтированного срока окупаемости построим график зависимости ЧДД от времени (рисунок 5.2).

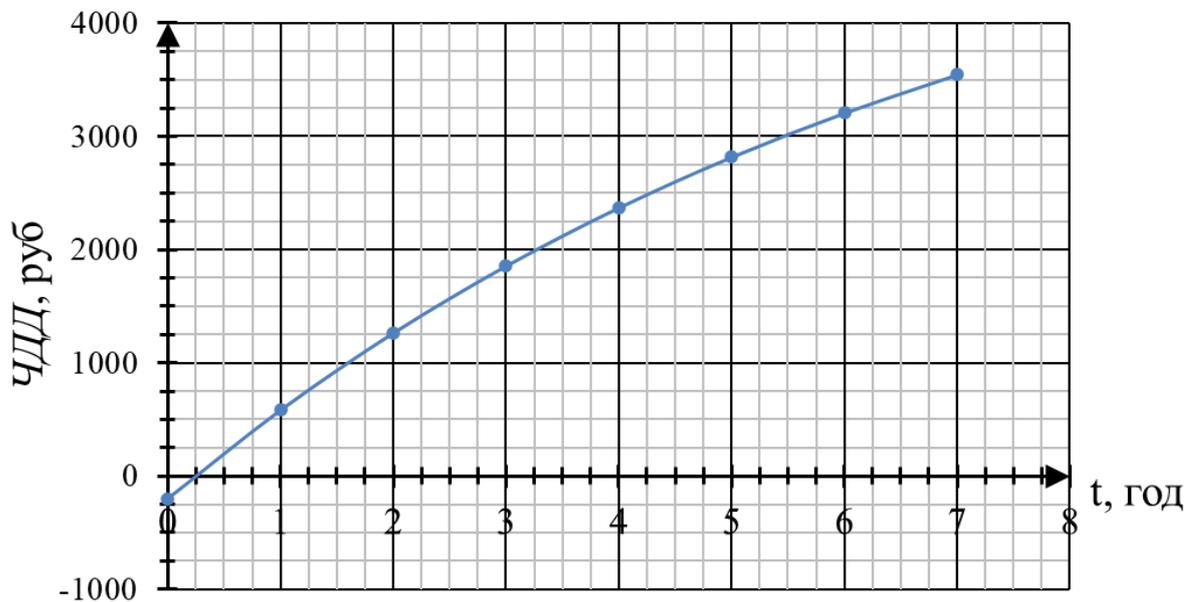


Рисунок 5.2 – График зависимости ЧДД от времени

Точка пересечения графика с осью t является значением дисконтированного срока окупаемости. Простой срок окупаемости определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{ус}} - K_{\text{ун}}}{C_{\text{эл}} \cdot (P_{\text{с}} - P_{\text{н}}) \cdot t}. \quad (5.6)$$

Применение совмещённой обмотки при ремонте электродвигателя осевого вентилятора приводит к снижению потребляемой им электрической энергии, при сохранении прежней производительности. Чистый дисконтированный доход при норме дисконта 0,15 к 7 году составил 3544,42 руб. Срок окупаемости капитальных вложений 0,22 года.

Выводы по главе:

1. АД с совмещённой обмоткой при работе в качестве привода вентилятора имеет меньшее потребление активной мощности, чем аналогичный двигатель со стандартной обмоткой.

2. Технико-экономическая оценка показала эффективность применения совмещённой обмотки при ремонте АД, используемых в качестве привода вентиляторов с продолжительным режимом работы. Благодаря небольшой разнице капитальных вложений и возросшему КПД срок окупаемости предлагаемой технологии составил 0,22 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведено исследование применения совмещённых обмоток в АД с целью совершенствования их энергетических характеристик.

В ходе работы были сделаны следующие выводы:

1. Анализ схем совмещённых обмоток позволил выявить их потенциальные преимущества по сравнению со стандартными: снижение содержания ВПГ в МДС и увеличение обмоточного коэффициента. Предложены новые схемы совмещённых обмоток, обладающие более простой технологией укладки, чем известные варианты двухслойных и трёхслойных обмоток, но при этом имеющие те же электромагнитные свойства, что и их аналоги.

2. Показано, что в МДС совмещённой обмотки содержится меньше ВПГ, чем в МДС стандартной. Причём с увеличением числа пазов, приходящихся на пару полюсов, относительное содержание ВПГ в МДС совмещённой обмотки снижается быстрее. Первыми наиболее значимыми ВПГ в МДС таких обмоток являются 11 и 13 гармоники, а значит относительный шаг $11/12$ является предпочтительным для двухслойных укороченных обмоток. Разработана схема двухслойной совмещённой обмотки с расширенными фазными зонами, применение которой практически полностью устраняет 11 и 13 гармонику МДС, уменьшая их амплитуды в 60 и 50,5 раз соответственно по сравнению со стандартной обмоткой, а также 8 и 6,5 раз по сравнению с двухслойной укороченной совмещённой обмоткой.

3. Разработана методика определения изменения электрических потерь в статоре при использовании в нём совмещённой обмотки вместо стандартной, которая основана на определении разницы эквивалентных активных сопротивлений. Наибольшее потенциальное снижение электрических потерь для статора с однослойной обмоткой стоит ожидать, если при переходе на совмещённую обмотку не увеличивается длина лобовой части катушек. Так, было установлено, что для таких статоров, у которых чётное число пазов, приходящихся на полюс и фазу, наибольшее снижение составляет 6,7%, если же это число нечётное, тогда 5,3%. Для двухслойных обмоток данный показатель зависит от габаритов двигателя и может быть

больше, чем для однослойных ввиду большей разницы обмоточных коэффициентов. Если при переходе от стандартной обмотки к совмещённой происходит изменение длины катушки, то с увеличением длины сердечника статора по отношению к длине его полюсного деления применение совмещённой обмотки становится более выгодным.

4. Разработана методика перерасчёта стандартной обмотки статора на совмещённую, которая учитывает изменение обмоточного коэффициента и позволяет получить несколько возможных вариантов обмоток для разного числа параллельных ветвей и сечений обмоточных проводов. По данной методике составлена программа для ЭВМ, что позволяет упростить использование совмещённых обмоток при ремонте АД.

5. Проведены сравнительные экспериментальные исследования двигателя с совмещённой обмоткой для режимов холостого хода, короткого замыкания и при работе под нагрузкой. Двигатель с совмещённой обмоткой потребляет меньший ток и имеет меньшие потери на всём исследуемом диапазоне нагрузок. При нагрузке 46% от номинальной двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим на 5,1% КПД, чем стандартный двигатель. При номинальной нагрузке разница КПД составляет 3,1%. Коэффициент мощности исследуемых машин практически не отличается, однако потребление реактивной мощности двигателем с совмещённой обмоткой ниже, чем у образца со стандартной обмоткой.

6. Техничко-экономическая оценка показала эффективность применения совмещённой обмотки при ремонте АД, используемых в качестве привода вентиляторов с продолжительным режимом работы. Благодаря небольшой разнице капитальных вложений и возросшему КПД срок окупаемости предлагаемой технологии составил 0,22 года.

Результаты диссертационной работы рекомендуются использовать при перемотке и изготовлении АД. Двигатели с совмещённой обмоткой целесообразно применять для снижения затрат электрической энергии приводов с продолжительным режимом работы.

Дальнейшими направлениями изучения АД с совмещённой обмоткой могут быть исследования их динамических режимов работы, работы совместно с частотным регулятором, а также применение совмещённой обмотки с переключением между параллельным и последовательным соединением «звезды» и «треугольника» с целью регулирования частоты вращения, либо улучшения пусковых характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines With Concentrated Windings / H. Vansompel, P. Sergeant, L. Dupre, A. Van den Bossche // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2012. – №2 – P. 403-410.
2. Chen, J. Y. Investigation of a new AC electrical machine winding / J. Y. Chen, C. Z. Chen // *IEE Proceedings - Electric Power Applications.* – 1998. – № 2 – P. 125-132.
3. Cistelecan, M. V. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines With Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections / M. V. Cistelecan, F. J. T. E. Ferreira, M. Popescu // *IEEE Transactions on Energy Conversion.* – 2010. – № 2 – P. 348-355.
4. Gwozdziwicz, M. Application of star-delta mixed stator winding in synchronous machine, with permanent magnets on the rotor surface / M. Gwozdziwicz, S. Gawron // *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych* – 2011. – № 65. – P. 55-63.
5. Kasten, H. Wirkungsgradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung / H. Kasten // *Jahresbercht* – 2010 – P. 76-82.
6. Patent 0557809 Europa, МПК H02K 3/28. Mehrphasige Wicklungen in Stern-Polygon-Mischschaltung für eine elektrische Maschine / Auinger H. ; Patentinhaber Siemens AG. Anmeldetag 11.02.1993 ; Priorität 27.02.1992. – P. 18
7. Patent 1267232 United States, МПК H02K 3/28. Motor winding / W. C. Kothals-Altes. Application 16.03.1916 ; publication 21.05.1918. – P. 4.
8. Patent 3202958 Deutschland, МПК H02K 3/28. Dreiphasige Wicklung in Stern-Dreieck-Mischschaltung für eine elektrische Maschine Nürnberg / Auinger H. ; Patentinhaber Siemens AG. Anmeldetag 29.01.1982 ; Offenlegungstag 11.08.1983. – P. 36
9. Алгоритмы оценки эквивалентных сопротивлений внутривоздушных электрических сетей / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Н. Горлов и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 3-13.
10. Александров, Н. Н. Электрические машины и микромашины / Н. Н. Александров. – М. : Колос, 1983. – 384 с.

11. Антонов, М. В. Технология производства электрических машин: учебное пособие для вузов / М. В. Антонов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
12. Асинхронные двигатели общего назначения / [Е. П. Бойко и др.] ; под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.
13. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. И доп. – М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.
14. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – 7-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
15. Бычков, С.А. Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения / С. А. Бычков, С. Л. Назаров, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 80 с.
16. Ванурин, В. Н. Статорные обмотки асинхронных машин : учебное пособие / В. Н. Ванурин. – СПб. : Лань, 2014. – 176 с.
17. Вентилятор осевой ВО 06-300-6,3 (0,75/1500) [Электронные ресурсы], URL: <https://xn----ctbbkcsvolucrc2k7b.xn--p1ai/p395736849-ventilyator-osevoj-300.html> (дата обращения 21.04.2021).
18. Видеман, Е. Конструкции электрических машин / Е. Видеман, В. Келленбергер; под ред. Б. Н. Красовского. – Л. : Энергия, 1972. – 520 с.
19. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2010. – 350 с.
20. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. – М., Л. : Издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 817 с.
21. Воробьёв, В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин : письменные лекции / В.Е. Воробьёв, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
22. Геллер, Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата; под ред. З. Г. Каганова. – М. : Энергия, 1981. – 352 с.
23. Геллер, Б. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата; под ред. Ф. М. Юферова. – М., Л. : Энергия, 1964. – 263 с.

24. Гинзбург, М. Ю. Проблемы определения ставки дисконтирования для различных направлений деятельности предприятия / М. Ю. Гинзбург, А. С. Кокин, А. А. Агеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2009. – № 2. – С. 166-169.
25. Гольдберг, О. Д. Надёжность электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Академия, 2010. – 288 с.
26. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: Учебник / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. – 3-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2006. – 430 с.
27. ГОСТ 11828-86. Машины электрически вращающиеся. Общие методы испытаний. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 32 с.
28. ГОСТ 16308-84. Реле электротепловые токовые. Общие технические условия. – М. : Издательство стандартнов, 1992. – 32 с.
29. ГОСТ 27710-88 Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость. – М. : Издательство стандартнов, 1988. – 54 с.
30. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартиформ, 2014. – 16 с.
31. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 41 с.
32. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.
33. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2017 году. – Текст : электронный // Министерство экономического развития Российской Федерации : [официальный сайт]. – Москва, 2018. – URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/2388d-ff12e9df8f2a9abc4f2b19bf9dd/energyefficiency2018.pdf> (дата обращения: 17.06.2021).
34. Грундулис, А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А. О. Грундулис. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1988. – 111 с.

35. Домбровский, В. В. Асинхронные машины : Теория, расчёт, элементы проектирования / В. В. Домбровский, В. М. Зайчик. - Л. : Энергоатомиздат, 1990. - 368 с.
36. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. – 2-к изд., перераб. – М. : Энергия, 1974. – 240 с.
37. Епифанов, А. П. Электропривод в сельском хозяйстве : учебное пособие / А. П. Епифанов, А. Г. Гуцинский, Л. М. Малайчук. - 2- изд., стер. – СПб. : Лань, 2016. – 224 с.
38. Ермолаев, С. А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве : учебник / С. А. Ермолаев, Е. П. Масюткин, В. Ф. Яковлев; по ред. С. А. Ермолаева. – Киев: Инкос, 2005. – 670 с.
39. Ермолин, Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 135 с.
40. Жерве, Г. К. Обмотки электрических машин / Г. К. Жерве. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
41. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – 4-е изд. сокр. и перераб. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
42. Закладной, А. Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А. Н. Закладной, О. А. Закладной // Энергетика та електрифікація. – 2010. – № 4. – С. 63-67.
43. Иноземцев, Е. К. Ремонт мощных электродвигателей / Е. К. Иноземцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
44. Исследование распределения токов по фазам в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов, Л. А. Пантелеева, Д. А. Васильев, Е. В. Дресвянникова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 150-159.
45. Касумов, Н. Э. Энергоёмкость производства сельскохозяйственной продукции как критерий эффективности / Н. Э. Касумов, И. И. Свентицкий // Вестник Брянского государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 42-45.
46. Ключев, В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. / В.И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001 – 704 с.

47. Коварский, Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
48. Комплект измерительный К505 [Электронный ресурс], URL: <https://www.astena.ru/k505.html> (режим доступа 16.04.2020)
49. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.
50. Крылов, Э. И. Анализ эффективности инвестиционной и инновационной деятельности предприятия : учебное пособие / Э. И. Крылов, В. М. Власова, И. В. Журавкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 608 с.
51. Курбатова, Г.С. Электродвигатели для сельского хозяйства / Г.С. Курбатова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 54с.
52. Кучера, Я. Обмотки электрических вращательных машин / Я. Кучера, Й. Гапл; под ред. Е. М. Калинина. – Прага: Чехословацкая академия наук, 1963. – 983 с.
53. Лущик, В.Д. Електромагнітний розрахунок трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою / В.Д. Лущик, В.В. Кирьянов, С.Ю. Полезін // Електротехніка і Електромеханіка – 2013. – №1. – С. 35-37.
54. Лущик, В.Д. Реверс трифазних асинхронних двигунів з шестифазними обмотками / В.Д. Лущик, С.Ю. Полезін // Електротехніка і Електромеханіка – 2014. – №2. – С. 37-39.
55. Лущик, В.Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів / В.Д. Лущик // Електротехніка і Електромеханіка – 2012. – №2. – С. 42-44.
56. Макаров, Ф. К. Электрические машины переменного тока с магнитными клиньями / Ф. К. Макаров. – М. : Энергоиздат, 1981. – 96 с.
57. Мартынов, К. В. Выбор и обоснование методики сравнительного эксперимента со снятием механической характеристики для асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Инновационные направления развития энергетики АПК: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 40-летию факультета энергетики и электрификации. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2017. – С. 83-86.

58. Мартынов, К. В. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с распределённой совмещённой обмоткой / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА. – 2018. – С. 151-156.
59. Мартынов, К. В. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии: материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. – Троицк: Южно-Уральский ГАУ. – 2018. – С. 94-101.
60. Мартынов, К. В. Испытание асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой в качестве привода вентилятора / К. В. Мартынов, А. С. Корепанов, М. Л. Шавкунов, В. В. Капитонов // Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной году науки и технологии в России. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2021. – С. 48-52.
61. Мартынов, К. В. Методика перерасчёта асинхронного двигателя на совмещённую обмотку статора / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3 (28). – С. 71-77.
62. Мартынов, К. В. Определение пусковых характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3(67). – С. 62-68.
63. Мартынов, К. В. Оптимизация конструкции обмотки статора асинхронного двигателя по активному сопротивлению / К.В. Мартынов, В.А. Носков // Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых ученых-исследователей: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2017. – С. 215-219.
64. Мартынов, К. В. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К. В. Мартынов, Л. А. Пантелеева, И. А.

Благодатских// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 109-118.

65. Мартынов, К. В. Разработка программы по перерасчёту статора на совмещённую обмотку / К.В. Мартынов, И.А. Благодатских, В.А. Носков // Научные инновации в развитии отраслей АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА. – 2020. – С. 133-138.

66. Мартынов, К. В. Совершенствование конструкции обмотки статора асинхронного двигателя / К.В. Мартынов, В.А. Носков, Л.А. Пантелеева // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 1 (26). – С. 5-12.

67. Мартынов, К. В. Совершенствование эксплуатационных характеристик асинхронного электродвигателя на основе совмещённой обмотки статора / К.В. Мартынов // Наука молодых – инновационному развитию АПК: материалы международной молодёжной научно-практической конференции. Часть 2. – Уфа: Башкирский ГАУ. – 2016. – С. 106-112.

68. Мартынов, К. В. Совмещённые обмотки статоров машин переменного тока с 18 и 30 пазами, приходящимися на пару полюсов / К. В. Мартынов // Интеграционные взаимодействия молодых ученых в развитии аграрной науки : материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых, в 3 томах, Ижевск, 04–05 декабря 2019 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 359-365.

69. Мартынов, К.В. Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре / К.В. Мартынов, В.А. Носков, Л.А. Пантелеева, Д.А. Васильев // АгроЭкоИнфо. – 2020. №1 (39). – С. 18.

70. Маршак, Е. Л. Ремонт всыпных обмоток асинхронных двигателей / Е. Л. Маршак. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. - 88 с.

71. Мугалимов, Р. Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе / Р. Г. Мугалимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1(33). – С. 59-63.

72. Мугалимов, Р.Г. Математическое описание электропривода на основа энерго-сберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности / Р.Г. Мугалимов, В.И. Косматов, А.Р. Мугалимова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 78-89.
73. Мугалимов, Р.Г. Техничко-экономическое обоснование целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности / Мугалимов Р.Г., Баранкова И.И., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Михайлова У.В., Никифоров Г.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – №2. – С. 101-109
74. Мусин, А. М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А. М. Мусин. – М. : Колос, 1979. –112 с.
75. Назаров, Г.И. Основы электропривода и применение электрической энергии в сельском хозяйстве. / Г.И. Назаров, Н.П. Олейник, А.П. Фоменков, И.М. Юровский // М., Издательство "Колосс" 1965 г. – 392 с.
76. Новые энергосберегающие технологии [Электронный ресурс], URL: http://kopen.narod.ru/product_1.html (дата обращения 15.02.2015).
77. Носков, В. А. Опыт холостого хода асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / В.А. Носков, К.В. Мартынов, М.В. Яковенко, Д.А. Сычугов // Роль молодых ученых-инноваторов в решении задач по ускоренному импортозамещению сельскохозяйственной продукции: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА. – 2015. – С. 191-194.
78. Носков, В. А. Повышение эффективности обмоток машин переменного тока / В.А. Носков, Л.А. Пантелеева, К.В. Мартынов // Электротехника. – 2018. – №1. – С. 39-43. Noskov, V. A. Improving the Efficiency of Alternating-Current Machine Windings / V.A. Noskov, L.A. Panteleeva, K.V. Martynov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Т. 89. – № 1. – С. 32-35.
79. Носков, В. А. Разработка стенда для испытаний асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / В.А. Носков, К.В. Мартынов // Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства: материалы

Международной научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2017. – С. 296-300.

80. Носков, В. А. Расчёт экспериментальной совмещённой обмотки асинхронного двигателя / В.А. Носков, К.В. Мартынов // Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2016. – С. 234-238.

81. Носков, В. А. Совершенствование эксплуатационных характеристик машин переменного тока на основе совмещённой обмотки статора / В.А. Носков, К.В. Мартынов // Теория и практика - устойчивому развитию агропромышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск: Ижевская ГСХА. – 2015. – С. 143-149.

82. Об утверждении методики по определению уровня арендной платы за нежилые здания (помещения) : Приказ Минстроя РФ №209 от 14 сентября 1992 г. – Доступ из информационного портала Zakonbase.ru. – Текст : электронный.

83. Оптимизация ряда интеллектуальных энергосберегающих асинхронных электрических двигателей с совмещёнными обмотками с 100 по 132 габариты / К.А. Змиева, А.П. Яковлев, Е.М. Углева, Е.Ю. Должикова // Электротехнические комплексы и системы управления – 2013. – №3. – С. 32-37.

84. Косматов, В. И. Исследование нагрузочных режимов электроприводов с асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре / В. И. Косматов, А. С. Сарваров, Е. И. Данилов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2(39). – С. 12-17.

85. Панченко, В.І. Асинхронний двигун з явно вираженими зубцями та шестифазною обмоткою на статорі / В. І. Панченко, Д.В. Ципленков, А.М. Гребенюк А.М. // Електротехніка і Електромеханіка – 2008. – №1. – С. 36-37.

86. Пат. 197319 РФ, МПК H02K 3/28. Трёхфазная 12-зонная одно-двухслойная обмотка статора / К. В. Мартынов, В. А. Носков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – №2020102866; заявл. 23.01.2020, опубл. 21.04.2020, Бюл. №12. – 6с.

87. Пат. 2508593 Российская Федерация, МПК Н02К 3/28. Обмотка статора трёхфазных электрических машин переменного тока / Е.Ф. Беляев, А.А Ташкинов, П.Н. Цылев. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2012136476/07; заявл. 27.28.2012, опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – 10 с.
88. Пат. 2528179 РФ, МПК Н02К 17/14, Н02К 3/28. Совмещенная обмотка асинхронной машины для $2p=2$, $z=18$ / [Агриков Ю. М. и др] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "АС и ПП". – № 2013110174/07; заявл. 06.03.2013, опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. – 5 с.
89. Пат. 2538266 РФ, МПК Н02К 17/14, Н02К 3/28. Совмещенная обмотка асинхронной машины для $2p=4$, $z=36$ / [Агриков Ю. М. и др] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "АС и ПП". – № 2013108787/07; заявл. 27.02.2013, опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 6 с.
90. Пат. 2735288 РФ, МПК МПК Н02К 3/28. Трёхфазная 12-зонная двухслойная обмотка статора с пониженным содержанием высших пространственных гармоник в составе магнитодвижущей силы / К. В. Мартынов, В. А. Носков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – № 2019140789; заявл. 09.12.2019, опубл. 29.10.2020, Бюл. № 31.
91. Петриков, Л. В. Асинхронные электродвигатели : Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация : справочник / Л. В. Петриков, Г. Н. Корначенко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
92. Попов, В. И. Новые схемы трёхфазных обмоток электрических машин с улучшенными электромагнитными свойствами : монография / В. И. Попов. – Н. Новгород : ВГИПИ, 1998. – 116 с.
93. Провод ПЭТВ-2 [Электронный ресурс], URL: https://snabcable.ru/enameled_wire/petv-2-pet-155-pevtl-1-2/petv-2/ (дата обращения 30.05.2020)
94. Проектирование электрических машин : учебник для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов / [И. П. Копылов и др.] ; под

ред. И. П. Копылова. – 4-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Высшая школа, 2005. – 766 с.

95. Разработка теоретических основ для создания нового типа интеллектуальных энергосберегающих асинхронных электрических двигателей с совмещёнными обмотками / Е.Ю. Должикова, Д.В. Козлов, Е.В. Кузнецова и др. // Вестник МГТУ «Станкин» – 2013. – №4. – С. 96-102.

96. Расчёт стоимости ремонта электродвигателей [Электронный ресурс], URL: <http://forum.dvigatel.org/viewtopic.php?f=33&t=1396> (дата обращения 15.06.2020).

97. Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве / В. Н. Адрианов, Д. Н. Быстрицкий, А. В. Павлов, Е. М. Чебуркина; под ред. Д. Н. Быстрицкого. – М. : Энергия, 1975. – 400 с.

98. Рихтер, Р. Электрические машины: [в 5 т.]. Т. 4: Индукционные машины / Р. Рихтер; под ред. Ю. С. Чечета. – М., Л. : Редакция энергетической литературы, 1939. – 474 с.

99. Сафонов, А. С. Применение энергоэффективных электродвигателей в сельском хозяйстве / А. С. Сафронов // В сборнике научных трудов по итогам международной научно-практической конференции "Актуальные вопросы науки и техники". – Самара, 2015. – № 2. – С. 157-159.

100. Свидетельство 2020663515. Программа перерасчёта обмотки статора машины переменного тока со стандартной 6-зонной на совмещённую 12-зонную : программа для ЭВМ / К. В. Мартынов, В. А. Носков, И. А. Благодатских (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – № 2020662822 ; заявл. 22.10.2020 ; опубл. 28.10.2020, Бюл. № 11. – 48,7 Мб.

101. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев, С. Валтчев, Е. И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 116-126.

102. Справочник обмотчика асинхронных двигателей. Электродвигатели с совмещёнными обмотками [Электронный ресурс], URL: <http://sprav.dvigatel.org/sovmobm.html> (дата обращения 15.12.2019)

103. Стребков, Д. С. Инновационные направления развития систем и средств энергосбережения объектов животноводства / Д. С. Стребков, А. В. Тихомиров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2015. – № 2(18). – С. 81-89.
104. Стребков, Д. С. Направления надежного обеспечения энергией объектов животноводства / Д. С. Стребков, А. В. Тихомиров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 2(22). – С. 30-35.
105. Стребков, Д. С. Показатели потребления топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве и энергоёмкости сельхозпроизводства, их прогноз на период до 2030 года / Д. С. Стребков, Д. А. Тихомиров, А. В. Тихомиров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 4(32). – С. 4-12.
106. Титюк, В.К. Математична модель параметричного електродвигуна / В.К. Титюк, С.В. Кіковка // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: матер. конф. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 174-175.
107. Хорольский, В.Я. Эксплуатация электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Учебное пособие // В.Я. Хорольский: Ставрополь. – 1996. – 58 с.
108. Цылев, П. Н. Направления повышения коэффициента мощности асинхронных электроприводов механизмов предприятий нефтегазовой отрасли / П. Н. Цылев, И. Н. Щапова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 16. – С. 77-85.
109. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода: учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – 6-е изд., доп. И перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
110. Шенфер, К. И. Асинхронные машины / К. И. Шенфер. – 4-е изд., перераб. и доп. – М., Л.: Редакция энергетической литературы, 1938. – 412 с.
111. Экономика сельского хозяйства / [В. Т. Водяников и др.] ; под ред. В. Т. Водяникова. – М. : КолосС, 2007. – 390 с.

112. Экономические основы энергосбережения в животноводстве (КРС) : отчёт о НИР (заключ.) / БелГСХА ; рук. А. В. Турьянский ; исполн. А. В. Турьянский, В. Ф. Ужик, Д. Ю. Чугай, Ю. А. Китаев. – Белгород, 2009. – 165 с. – № ГР 01200956436.

Приложение А – Пример расчёта обмоточных данных программой

```
Выберете вид округления(1-по умолчанию/2-в большую сторону/3-в меньшую сторону): 1
Число пазов z: 24
Число пар полюсов: 2
Число эффективных проводников катушки в пазу wp:
Число эффективных витков в фазе w: 396
Число параллельных ветвей a: 1
Диаметр обмоточного провода без изоляции d, мм: 0.56
Число параллельных проводников в витке n: 1
Шаг обмотки у: 6
Вид стандартной обмотки(1-однослойная/2-двухслойная): 1
Вид совмещённой обмотки(1-однослойная/2-двухслойная): 1
Сопряжение фаз(1-звезда/2-треугольник): 1
Отгиб лобовых частей(1-в одну сторону):1
Вид катушки(1-равносекционная):1
```

Рисунок А.1 – Пример ввода данных в программе

| | <<звезда>> | <<треугольник>> |
|---|----------------|-----------------|
| Число пазов, приходящихся на полюс и фазу | [1.0] | [1.0] |
| Шаг катушек по пазам | 1-7.0 | 2.0-8.0 |
| Шаг обмотки | 6 | 6 |
| Число параллельных ветвей | [2.0, 1.0] | [2.0, 1.0] |
| Число эффективных витков в фазе | [383.0, 382.0] | [663.0, 662.0] |
| Число эффективных витков в пазу | [383.0, 191.0] | [663.0, 331.0] |

Диаметры неизолированного обмоточного провода, мм:

<<звезда>>

n = 1 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.3(+0.015, мм²) / 0.28(-0.005, мм²)', '0.425(+0.022, мм²) / 0.4(-0.003, мм²)']

n = 2 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.21(+0.009, мм²) / 0.2(-0.001, мм²)', '0.3(+0.015, мм²) / 0.28(-0.005, мм²)']

n = 3 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.18(+0.016, мм²) / 0.16(-0.004, мм²)', '0.236(+0.003, мм²) / 0.224(-0.009, мм²)']

n = 4 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.16(+0.018, мм²) / 0.14(-0.002, мм²)', '0.21(+0.008, мм²) / 0.2(-0.002, мм²)']

<<треугольник>>

n = 1 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.224(+0.008, мм²) / 0.21(-0.006, мм²)', '0.315(+0.009, мм²) / 0.3(-0.006, мм²)']

n = 2 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.16(+0.007, мм²) / 0.14(-0.013, мм²)', '0.224(+0.007, мм²) / 0.21(-0.007, мм²)']

n = 3 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.125(+0.0, мм²) / 0.12(-0.005, мм²)', '0.18(+0.003, мм²) / 0.16(-0.017, мм²)']

n = 4 при a = [2.0, 1.0]
 ['0.112(+0.004, мм²) / 0.1(-0.008, мм²)', '0.16(+0.007, мм²) / 0.14(-0.013, мм²)']

Рисунок А.2 – Пример вывода результатов в программе

Приложение Б – Патенты и свидетельства по теме исследования



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2735288

**ТРЕХФАЗНАЯ 12-ЗОННАЯ ДВУХСЛОЙНАЯ ОБМОТКА
СТАТОРА С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК В
СОСТАВЕ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевская государственная сельскохозяйственная академия" (RU)*

Авторы: *Мартынов Кирилл Владимирович (RU),
Носков Виталий Александрович (RU)*

Заявка № 2019140789

Приоритет изобретения 09 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 октября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 декабря 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020663515

**Программа перерасчёта обмотки статора машины
переменного тока со стандартной 6-зонной на совмещённую
12-зонную**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Ижевская
государственная сельскохозяйственная академия» (RU)*

Авторы: *Мартынов Кирилл Владимирович (RU), Носков Виталий
Александрович (RU), Благодатских Иван Александрович (RU)*

Заявка № 2020662822

Дата поступления 22 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 октября 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

