

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Аль-хасун Хуссейн Гени Абдулкарим

УДК 621.313.3.045

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК
МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

05.09.01 Электрические машины и аппараты

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент

Якимец Андрей Миронович

Одесса 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1. Причины возникновения несимметрии обмоток и особенности её проявления.....	13
1.2. Анализ внутренней несимметрии обмотки.....	14
1.3. Проблемы применения традиционных методов к гармоническому анализу несимметричных обмоток.....	16
1.4. Обоснование необходимости симметрирования.....	18
1.5. Система допущений.....	22
1.6. Выводы по разделу 1.....	23
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК	25
2.1. Обоснование необходимости применения метода симметричных составляющих.....	25
2.2. Алгоритм гармонического анализа.....	26
2.3. Выводы по разделу 2.....	30
РАЗДЕЛ 3. МЕТОДИКА СИММЕТРИРОВАНИЯ ОБМОТОК	32
3.1. Симметрирование изменением числового ряда обмотки.....	32
3.2. Симметрирование с применением неравновитковых катушек.....	37
3.3. Программная реализация алгоритма симметрирования.....	43
3.4. Примеры применения подсистемы при симметрировании обмоток...	53
3.4.1. Симметрирование шестиполусной обмотки в 48 пазах.....	54
3.4.2. Симметрирование шестиполусной обмотки в 42 пазах.....	62
3.5. Выводы по разделу 3.....	70

РАЗДЕЛ 4. РАСЧЕТ РАЗНОСТНЫХ ЭДС В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЯХ ОБМОТОК.....	72
4.1. Особенности проявления внутренней несимметрии в электрических машинах переменного тока.....	73
4.2. Разработка алгоритма расчета разностных ЭДС.....	73
4.3. Причины возникновения небаланса ЭДС параллельных ветвей.....	77
4.4. Выводы по разделу 4.....	78
РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	79
5.1. Выбор структуры базового двигателя.....	79
5.2. Основные параметры и обмоточные данные базового двигателя.....	81
5.3. Замена статорной обмотки базового двигателя и изготовление экспериментального образца.....	85
5.4. Результаты испытаний экспериментального образца.....	90
5.5. Сравнение расчетных рабочих характеристик серийного двигателя с числом пазов 54 с характеристиками двигателя с несимметричной обмоткой.....	95
5.6. Сравнение расчетных и экспериментальных показателей двигателя с новой несимметричной обмоткой.....	98
5.7. Выводы по разделу 5.....	99
Выводы.....	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	101
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	108
Приложение А. Расчетный пример применения алгоритма гармонического анализа ($Z=24$, $2p=6$, $y=3$).....	109
Приложение Б. Подсистема гармонического анализа двухфазных и трёх- фазных обмоток Symmetry - 23.....	112
Приложение В. Симметрирование шестиполусной обмотки в 30 пазах с помощью подсистемы Symmetry – 23.....	123
Приложение Д. Экспериментальное определение разностных ЭДС	

	4
в параллельных ветвях.....	130
Д.1. Исследование форм кривых генерирующей обмотки.....	131
Д.2. Исследование разностных ЭДС и уравнивающих токов в обмотке с тремя параллельными ветвями.....	134
Д.3. Исследование разностных ЭДС и уравнивающих токов в обмотке с двумя параллельными ветвями.....	138
Д.4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных.....	141
Приложение Е. Результаты электромагнитного расчета асинхронных двигателей.....	146
Е.1. Расчет двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT».....	146
Е.1.1 Файл исходных данных для расчета двигателя 4А112МА8 для программы «FLINT».....	146
Е.1.2 Результаты расчета характеристики холостого хода двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT».....	148
Е.1.3 Результаты расчета гармонического анализа двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT».....	149
Е.1.4. Результаты расчета рабочих характеристик двигателя 4А112МА8.....	150
Е.1.5. Результаты расчета пусковых характеристик двигателя 4А112МА8.....	150
Е.2. Результаты расчета двигателя 4А112МА6 с помощью программы «FLINT».....	151
Е.2.1 Файл исходных данных для расчета двигателя 4А112МА6 для программы «FLINT».....	151
Е. 2.2 Результаты расчета характеристики холостого хода двигателя 4А112МА6 с помощью программы «FLINT».....	153
Е. 2.3 Результаты расчета гармонического анализа двигателя 4А112МА6 с помощью программы «FLINT».....	154
Е. 2.4. Результаты расчета рабочих характеристик двигателя 4А112МА6.....	155

Е. 2.5. Результаты расчета пусковых характеристик двигателя	
4A112MA6.....	155
Приложение Ж. Акт изготовления и испытания опытного образца.....	156
Приложение З. Протокол испытаний экспериментального образца.....	157
Приложение К. Результаты обработки экспериментальных данных.....	167
Приложение Л. Материалы внедрения результатов диссертационной работы.....	169

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭМ	– электрическая машина;
ВД	– векторная диаграмма;
АД	– асинхронный двигатель;
АКС	– активная катушечная сторона;
ЧР	– числовой ряд;
МСС	– метод симметричных составляющих;
ППФ	– число пазов на полюс и фазу;
ЭДС	– электродвижущая сила;
МДС	– магнитодвижущая сила;
КПД	– коэффициент полезного действия;
ППО	– полюсопереключаемые обмотки;
КЗ	– короткое замыкание;
ХХ	– холостой ход;
РАКТ	– распределение активных катушечных сторон;
ГА	– гармонический анализ;
КС	– катушечная сторона;
ИД	– исходные данные;
НО	– нетрадиционная обмотка;
ОДО	– однокоординатные двухфазные обмотки;
НЦДО	– нетрадиционная двухфазная обмотка с целым q ;
СВК	– схема внешней коммутации;
СДО	– симметричная двухфазная обмотка;
ТДДО	– традиционная дробная двухфазная обмотка;
ТЦДО	– традиционная двухфазная обмотка с целым q ;
ДО	– двухфазные обмотки;
ДДО	– дробная двухфазная обмотка;
ДООД	– допустимая область обмоточных данных;

- ν – порядок гармоники;
- $T_{\Pi O}$ – число периодов повторяющихся частей обмотки;
- K, n_1, n_2 – произвольные целые числа;
- $\dot{F}_{dv}, \dot{F}_{rv}, \dot{F}_{0v}$ – симметричные составляющие МДС прямой (d), обратной (r) и нулевой (0) последовательностей ν -й гармоники;
- $k_{W\nu}$ – обмоточный коэффициент по гармонике ν ;
- k_{Wp} – обмоточный коэффициент по рабочей гармонике $\nu=p$;
- $k_{D\nu}$ – коэффициент распределения по гармонике ν ;
- $k_{Y\nu}$ – коэффициент укорочения;
- $k_{C\nu}$ – коэффициент скоса;
- k_{Ddv} – симметричные составляющие прямой последовательности коэффициента распределения;
- K_{rdv} – симметричные составляющие обратной последовательности коэффициента распределения;
- F_{vj}, φ_{vj} – модули и аргументы соответствующих векторов на полярной векторной диаграмме;
- w_k^* – относительное число элементарных проводников;
- $\dot{H}_{dv}, \dot{H}_{rv}, \dot{H}_{0v}$ – относительные амплитуды симметричных составляющих МДС прямой (d), обратной (r) и нулевой (0) последовательностей ν -й гармоники;
- $S_{(d,r)\nu}$ – частичные суммы для каждого значения порядка ν ;
- l – произвольное натуральное число, соответствующее порядку высшей зубцовой гармоники;
- τ_d – коэффициент дифференциального рассеяния;

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В процессе электромеханического преобразования энергии во вращающихся электрических машинах переменного тока важную роль играют трех- и двухфазные обмотки. Эксплуатационные и массо-стоимостные показатели электрических машин в значительной степени зависят как от электромагнитных свойств обмоток, так и от их конструктивных особенностей.

В последнее время, кроме задачи улучшения технических показателей самих электрических машин, наметилась тенденция разработки и производства двигателей и генераторов, ориентированных на технологические возможности предприятий-производителей. При этом подразумевается максимально возможная унификация частей и комплектующих, используемых при производстве электрических машин. Такая «технологическая оптимизация» позволяет сократить расходы при производстве и ремонте электрических машин. Ощутимый эффект может быть достигнут в случае расширения номенклатуры выпускаемых изделий, например при мелкосерийном выпуске отдельных специальных модификаций электрических машин.

Для успешного решения задач проектирования таких модификаций электрических машин, в некоторых случаях необходимо использовать нетрадиционные типы обмоток, что позволит практически не менять технологическую оснастку производственного оборудования. Такие обмотки могут существенно отличаться от обычных своими электромагнитными и конструктивными свойствами, но технологически они близки к серийным.

Необходимость применения нетрадиционных обмоток иллюстрируется простым перечислением направлений совершенствования электрических двигателей и генераторов:

- унификация производства электрических машин;
- повышение ресурса электрической машины;
- расширение возможностей при ремонте электрических машин;
- симметричность потребления энергии;

– косвенное энерго- и ресурсосбережение за счет отказа от специальной технологической оснастки и использования оборудования для производства крупных серий электромашин.

Существующие методы проектирования трёхфазных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу q электрических машин [1-13] не могут обеспечить эффективного решения задач синтеза обмоток с необходимыми свойствами.

Решение задач улучшения использования технологических мощностей при производстве и ремонте электрических машин [14-21], оперативное обеспечение требований потребителя при выпуске мелких серий в условиях рыночной экономики имеет большое значение.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Теоретические вопросы диссертации, связанные с разработкой несимметричных обмоток со слабым уровнем несимметрии, отражены в отчёте о научно-исследовательской работе «Разработка методики и структурное проектирование многофазных обмоток на базе обобщённой математической модели», номер государственной регистрации 0193U035066, выполненной на кафедре электрических машин Одесского государственного политехнического университета в рамках национальной энергетической программы Украины, приоритетного направления науки и техники «Экологически чистая энергетика и ресурсосберегающие технологии».

Структурные и математические модели, синтезированные на их основе трехфазные обмотки находят свое отражение в научно-исследовательских работах кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета:

– №625-51 «Разработка средств автоматизированного синтеза высокоэффективных электромагнитных и электромеханотронных устройств на основе инновационных технических решений», номер государственной регистрации 0106U013174;

– №56-51 «Разработка математических моделей и исследование процессов в электрических машинах и трансформаторах», номер государственной регистрации 0111U010457.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработкой метода симметрирования не-традиционных обмоток статора, позволяющего создавать электрические машины с приемлемыми технико-экономическими показателями.

Задачами исследования являются:

- анализ свойств несимметричных многофазных статорных обмоток переменного тока и влияния несимметрии обмоток на характеристики электрических машин;
- обзор существующих методов синтеза и симметрирования несимметричных обмоток, выявление недостатков этих методов;
- формирование новой математической модели критерия симметричности несимметричных многофазных обмоток, основанной на представлении обмоточных коэффициентов в виде симметричных составляющих;
- разработка нового метода симметрирования, основанного на предложенном критерии симметричности и комплексном использовании методов преобразования числового ряда обмотки и варьирования числа витков в отдельных катушках;
- синтез с использованием предложенного метода несимметричных обмоток с минимальным уровнем несимметрии магнитного поля и анализ их свойств;
- теоретическое и экспериментальное сравнение свойств электрических машин с серийными и разработанными обмотками; рассмотрение возможностей применения разработанных обмоток при производстве и ремонте электрических машин.

Объектом исследования являются многофазные статорные обмотки вращающихся электрических машин переменного тока.

Предметом исследования является синтез специальных несимметричных многофазных обмоток электрических машин переменного тока.

Методы исследований. Решение поставленных в работе задач обеспечено корректным использованием классической теории электрических машин, применением методов синтеза многофазных обмоток, гармонического анализа и метода симметричных составляющих.

Научная новизна полученных результатов. В диссертации лично соискателем получены следующие научные результаты, которые выносятся на защиту:

- усовершенствована методика анализа свойств несимметричных обмоток, позволившая разработать более адекватную математическую модель критерия симметричности;
- впервые предложен комплексный метод симметрирования обмоток, основанный на направленном синтезе их структуры и изменении параметров отдельных катушек, минимизирующий несимметрию магнитного поля и ЭДС обмоток в условиях технологических ограничений;
- впервые синтезирована математическая модель несимметричной трехфазной равновитковой многополюсной обмотки, с минимальным уровнем несимметрии по рабочей гармонике;
- впервые синтезирована математическая модель нетрадиционных трехфазных неравновитковых многополюсных обмоток, характеризующихся полной симметрией по рабочей гармонике;
- получила дальнейшее развитие методика анализа уравнительных ЭДС в параллельных ветвях обмоток, применимая для несимметричных равновитковых обмоток.

Научное значение полученных результатов состоит в дальнейшем развитии методики синтеза многофазных обмоток, за счет чего спроектированы оригинальные модификации несимметричных двух- и трехфазных обмоток с минимальным уровнем несимметрии.

Практическое значение выполненной работы заключается в разработке оригинальных модификаций несимметричных трехфазных статорных обмоток, позволяющих в ряде случаев сохранить потребительские свойства электрических машин и обеспечить конкурентоспособность, что особенно важно после ремонта электрических машин.

Персональный вклад соискателя. Все результаты и выводы, которые составляют основную часть диссертации, принадлежат диссертанту. Две работы [22, 27], в которых рассматривается исследование возможности приме-

нения несимметричных обмоток в асинхронных двигателях, опубликованы соискателем персонально. В печатных трудах, которые опубликованы в соавторстве, диссертанту принадлежат: [23] – участие в разработке алгоритма гармонического анализа многофазных несимметричных обмоток; [24] – методика симметрирования несимметричных обмоток электрических машин с малым уровнем несимметрии; [25] – программная реализация автоматизированного синтеза несимметричных многофазных обмоток; [26] – методика определения разностных электродвижущих сил произвольных обмоток.

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах АН Украины Одесского национального политехнического университета (Одесса, 2012, 2013, 2014 г.г.), на научно-прикладном семинаре Одесского областного отделения Всеукраинской ассоциации инженеров-электриков (Одесса, 2012 г.), на международном симпозиуме «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика» (SIEMA-2012, Харьков 2012 г.), на всеукраинской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием (Николаев 2013 г.), Міжнародній україно-японській конференції з питань науково-виробничого співробітництва, (Одеса, 2013 р.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 научных трудов, в том числе 5 статей в научных и специализированных изданиях и сборниках научных трудов, 4 доклада в материалах конференций, 1 тезис доклада. Без соавторов опубликованы 2 научные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа общим объемом 170 страницы состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников из 76 наименования, 7 приложений, содержит 107 страниц основного текста, 82 рисунков, 44 таблицы.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ
ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Причины возникновения несимметрии обмоток и особенности её проявления

Известно, что при условии кратности числа фаз m знаменателю дробности d выполнить многофазную обмотку симметричной невозможно

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = A \frac{c}{d} .$$

Подобные несимметричные обмотки не нашли применения в серийном производстве электрических машин [28-30] из-за резкого ухудшения таких технических показателей, как номинальная мощность, значения перегрева обмоток и коэффициента полезного действия. При использовании таких несимметричных обмоток резко ухудшается гармонический состав ЭДС и МДС обмотки. Возникают как прямо, так и обратно вращающиеся гармоники МДС, создавая в рабочем воздушном зазоре эллиптические магнитные поля. Особенно нежелательным оказывается их проявление в отношении рабочей гармоники. В результате растут добавочные потери, в кривой момента возникают провалы, возрастает несинусоидальность ЭДС на зажимах генераторов, снижаются энергетические и виброакустические показатели, что приводит к уменьшению мощности по сравнению с серийными машинами [31-34].

Однако, в практике ремонта асинхронных машин [35-38], а в некоторых случаях и при перемотке двигателей [39,40], встречаются ситуации, когда при заданном числе пазов Z_1 есть необходимость изменить число полюсов p , а это возможно только при использовании несимметричных обмоток.

При этом необходимо определить изменение технических показателей ремонтируемого двигателя по сравнению с серийным аналогом. Это может

быть реализовано путем выполнения электромагнитного расчета. Общепринятый подход к его выполнению, базирующийся на традиционном представлении обмоточных коэффициентов, в данном случае неприменим. Формальное определение этих коэффициентов для каждой из фаз [41-44] никакой полезной информации не содержит и не позволяет правильно определить даже обмоточные данные двигателя.

1.2. Анализ внутренней несимметрии обмотки

Известно, что в обмотках асинхронных двигателей серийного производства необходимо соблюдать условие симметрии, связывающее числа полюсов $2p$ и параллельных ветвей a , соотношением: $2p/a$ есть целое число. Вследствие особенностей исполнения некоторых электрических машин, например, крупных синхронных и асинхронных машин [45], а также машин специального назначения [46], приходится идти на нарушение данного условия. В таких ситуациях могут появиться уравнивающие токи вследствие небаланса ЭДС отдельных параллельных ветвей. Это приводит к дополнительным добавочным потерям, наличию шумов и вибраций. Достаточно часто подобный небаланс возникает в процессе ремонта электрических машин [41].

С ростом величины тока в обмотках возникает необходимость прибегать к параллельному соединению катушечных групп. В этом случае любое неравенство результирующих ЭДС параллельных ветвей, как по величине, так и по фазе, не приемлемо из-за возможности возникновения уравнивающих токов.

Внутренняя (внутрифазная) несимметрия обмоток может иметь пять разновидностей, векторные диаграммы которых представлены на рис. 1.1. Наиболее общий случай внутренней несимметрии, заключающийся в неравенстве амплитуд \dot{E}_i , \dot{E}_j , \dot{E}_k и угловых координат φ_i , φ_j , φ_k

результующих векторов ЭДС отдельных параллельных ветвей i, j и k одной фазы представлен на рис.1.1,а [47,48].

К частным видам несимметрии относится случай, когда один из результирующих векторов ЭДС ветвей совпадает с осью симметрии (рис. 1.1, б, а, д) в отношении двух других результирующих векторов. При этом возможны два варианта, когда угловые координаты результирующих векторов ЭДС ветвей отличаются друг от друга, а сами векторы или не равны (рис. 1.1, а, б) или равны (рис. 1.1, в) по модулю. Аналогично возможны варианты, когда результирующие векторы ЭДС не равны (рис. 1.1, г, д) или равны (рис. 1.1, е) по амплитуде при совпадающих значениях угловых координат.

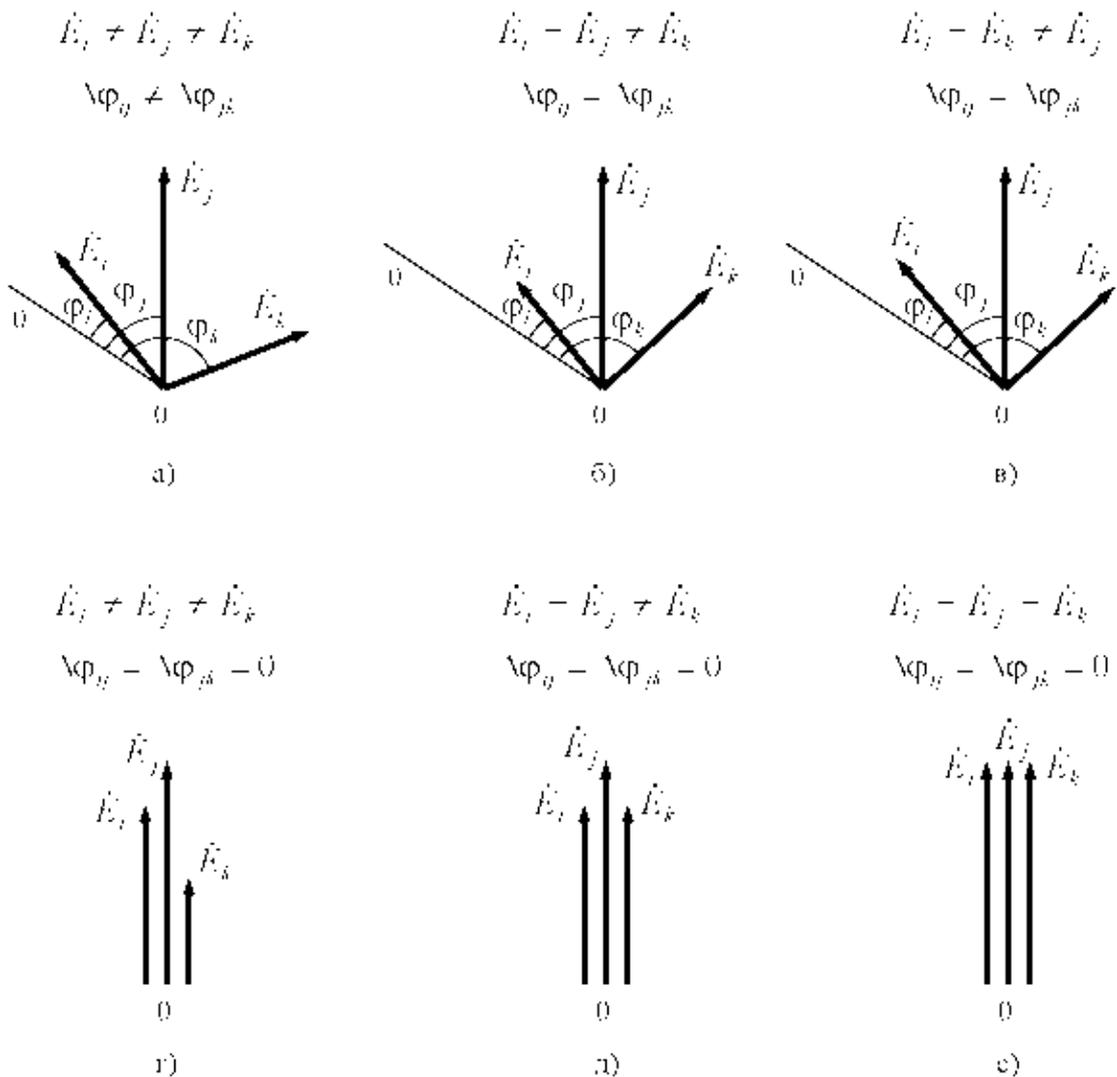


Рисунок 1.1. К определению видов внутренней несимметрии

Конечной целью симметрирования является полное устранение любых видов несимметрии, т.е. приведение результирующих векторов ЭДС ветвей к виду, изображенному на рис. 1.1, е.

1.3. Проблемы применения традиционных методов к гармоническому анализу несимметричных обмоток

Традиционное определение обмоточных коэффициентов для каждой из фаз содержит мало полезной информации и не позволяет корректно определить параметры несимметричной обмотки. Предположение, высказанное в [41-43], что определение исключительно обмоточного коэффициента нетрадиционных обмоток k_{wv} является достаточным для всесторонней оценки электромагнитных свойств любых многофазных обмоток, в некоторых случаях не является обоснованным. Также, не следует полностью отказываться от использования общепринятых понятий коэффициентов распределения k_{Dv} , укорочение k_{yv} и скоса k_{cv} для любых обмоток, число пазов на полюс и фазу q которых не является целым числом [49].

В таких случаях, независимо от конструкции обмотки, предлагается рассчитывать обмоточный коэффициент k_{wv} по распределению всех активных катушечных сторон (АКС). Нахождение геометрической суммы ЭДС активных катушечных сторон выполнены с использованием отражения соответствующих полярных векторов на комплексной плоскости. Суммирование выполняется с применением комплексных чисел.

Однако в изложенном выше традиционном алгоритме имеется ряд недостатков. Замена тригонометрической формы отображения комплексных чисел на алгебраическую затрудняет определение угловых координат результирующих векторов ЭДС фаз. Сам же расчет угловых координат векторов не предусмотрен разработчиком алгоритма, при этом предлагается

«убедиться, что ЭДС трехфазных обмоток сдвинуты между собой на угол 120° эл, двухфазных обмоток - на угол 90° эл.»[41-43].

Игнорируется и тот факт, что в несимметричных обмотках совместно проявляется как амплитудная, так и угловая несимметрия. Рекомендации по допустимому уровню ограничения несимметрии трехфазных обмоток, как по амплитудному (2 - 5%), так и по угловому (2° - 3°) рассогласованию векторов МДС (ЭДС) в масштабе рабочей гармоники [9,31-34].

Ничем не аргументированным является указание ограничить расчеты ЭДС фаз только рабочей гармоникой, поскольку существуют обмотки, несимметрия которых проявляется только в определенной части гармонического спектра и исключена в другой его части, содержит и рабочую гармонику.

Описанная в первом примере статьи [41] технология подготовки исходных данных отличается повышенной трудоемкостью по причине отказа от использования коэффициентов k_{yv} и k_{cv} . С учетом высокого быстродействия современной вычислительной техники, особенно при использовании относительно простых алгоритмов, время рабочего цикла определяется не столько собственно счетом, сколько подготовкой и вводом исходных данных.

Таким образом, в [41] анализ несимметричных обмоток ограничен расчетом обмоточных коэффициентов по рабочей гармонике, без расчета ЭДС фаз и без рекомендуемой проверки угловых смещений между ними. Информация, полученная проектировщиком в результате расчета по предложенному алгоритму, позволяет только констатировать факт, что данная обмотка несимметричная, а три значения обмоточных коэффициента для каждой из фаз, позволяют определить потокосцепления каждой из них с результирующим полем. Данная информация не отражает соотношение вращающихся магнитных полей в воздушном зазоре и не может быть использована при электромагнитном расчете машин с несимметричными обмотками [50,51].

Таким образом, существующие методы расчета несимметричных обмоток не дают полного представления об обмотке, и это обстоятельство вызывает необходимость разработки алгоритма, позволяющего устранить этот недостаток.

При проектировании двигателей с несимметричными обмотками одной из важнейших задач является снижение уровня эллиптичности вращающегося магнитного поля, хотя бы по рабочей гармонике. Известны примеры частичного решения данной задачи для отдельных случаев с использованием специальных приемов симметрирования [9,31-34]. Однако, в большинстве случаев поле, создаваемое обмотками, спроектированными с применением указанных средств, все же отличалось от кругового. Поэтому в данной работе поставлена задача обобщения известных приемов симметрирования и их дальнейшего совершенствования.

1.4. Обоснование необходимости симметрирования

Как было отмечено выше, несимметричные обмотки не нашли применения в серийном производстве электрических машин, однако, при проведении модернизации двигателей в процессе ремонта, подобные обмотки с дробными числами q приходится выполнять из-за ограниченного выбора статоров с необходимым числом пазов [52,56]. Например, при необходимости изменения частоты вращения привода технологического механизма, проблема может быть решена несколькими путями: использование дополнительных механических передач (зубчатых, клиноременных, цепных); использование полупроводникового преобразователя частоты; установка нового двигателя с соответствующим числом пар полюсов; модернизация имеющегося двигателя в ходе ремонта.

Все эти решения обеспечивают необходимый эффект, но при этом могут занимать достаточно много места в технологическом механизме и обходиться достаточно дорого для конечного потребителя. Так

преобразователь частоты, который при невозможности установки механической передачи представляется «идеальным» решением, стоит, примерно, в 4 раза дороже самого двигателя. В данной ситуации часто бывает выгодно просто заменить обмотку имеющегося двигателя на новую с необходимым числом пар полюсов, а это может привести к тому, что новая обмотка будет несимметричной.

Возникновение данной проблемы возможно и при производстве новых электрических машин. Например, при отсутствии пакетов статора с необходимым числом пазов. В случае, когда применение несимметричной обмотки будет обеспечивать двигателю приемлемые характеристики, возможно расширение номенклатуры двигателей, выпускаемых на базе одной геометрии активной части. Это позволит при минимальных изменениях в технологический процесс обеспечить гибкость производства при реагировании на потребности рынка. В результате использования одних и тех же штампов пакета статора для разных двигателей может быть получена ощутимая экономия времени и средств.

В качестве примера, с которым автор столкнулся на практике, рассмотрим перепроектирование серийного асинхронного двигателя, имеющего на статоре число пазов $z_1 = 48$, на число полюсов $2p = 6$ [22]. В этом случае число пазов на полюс и фазу в отремонтированной машине составит: $q = Z/(2pm) = 8/3$, где $m = 3$. При использовании известного алгоритма формирования числового ряда [9], уровень несимметрии таких обмоток оказывается недопустимо высоким.

При этих условиях появляется необходимость проектирования обмоток с одинаковыми числами витков в катушках [22,24], которые характеризуются следующими вариантами повторяющейся части числового ряда обмотки:

$$3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2;$$

Этому варианту соответствуют обмотки с возможным распределением фазных зон одного слоя на половине обмоточного пространства из 24 пазов (рис. 1.2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	№№ пазов			
A			z			B			x			C			y			A			z			B			Фазные зоны

Рисунок 1.2. Распределение фазных зон 1/2 обмотки с числом полюсов и пазов соответственно $2p = 6$, $Z_1 = 48$

Нетрудно убедиться, что обмотка характеризуется максимальной несимметрией, которая резко проявляется уже в отношении числа активных катушечных сторон (АКС) — фазные зоны *A* и *C* содержат по 18 АКС, а фаза *B* — 12 АКС.

Сопоставление вариантов по уровню симметрии в отношении рабочей гармоники ЭДС $\nu = p = 3$ на основе векторных диаграмм [24] приводит к следующим результатам.

Амплитуды ЭДС $E^*_A = E^*_C = 17,09$; $E^*_B = 11,77$; а их относительные сдвиги: $\varphi_{AB} = \varphi_{CB} = 123,75^\circ$; $\varphi_{AC} = 112,5^\circ$. Таким образом, амплитудное рассогласование

$$\Delta E^* = \frac{E^*_A - E^*_B}{E^*_A} = \frac{17,08 - 11,76}{17,08} = 0,31 .$$

Угловое рассогласование векторов ЭДС $\Delta\varphi = 123,75^\circ - 112,5^\circ = 11,5^\circ$, о чем свидетельствует векторная диаграмма (ВД), приведенная на рис. 1.3.

Результаты детального гармонического анализа, базирующегося на представлении симметричных составляющих обмоточных коэффициентов $k_{wd\nu}$, k_{wrv} [37,38], изложены в табл 1.1, где:

ν — порядок гармоники;

$k_{wd\nu}$ — соответственно обмоточный коэффициент прямой последовательности по гармонике ν -го порядка;

k_{wrv} — соответственно обмоточный коэффициент обратной последовательности по гармонике ν -го порядка;

$$H_{(d,r)v} = \frac{k_{wv} \cdot p}{k_{wp} \cdot v} - \text{относительная амплитуда МДС соответственно прямой и}$$

обратной последовательности по гармонике v -го порядка.

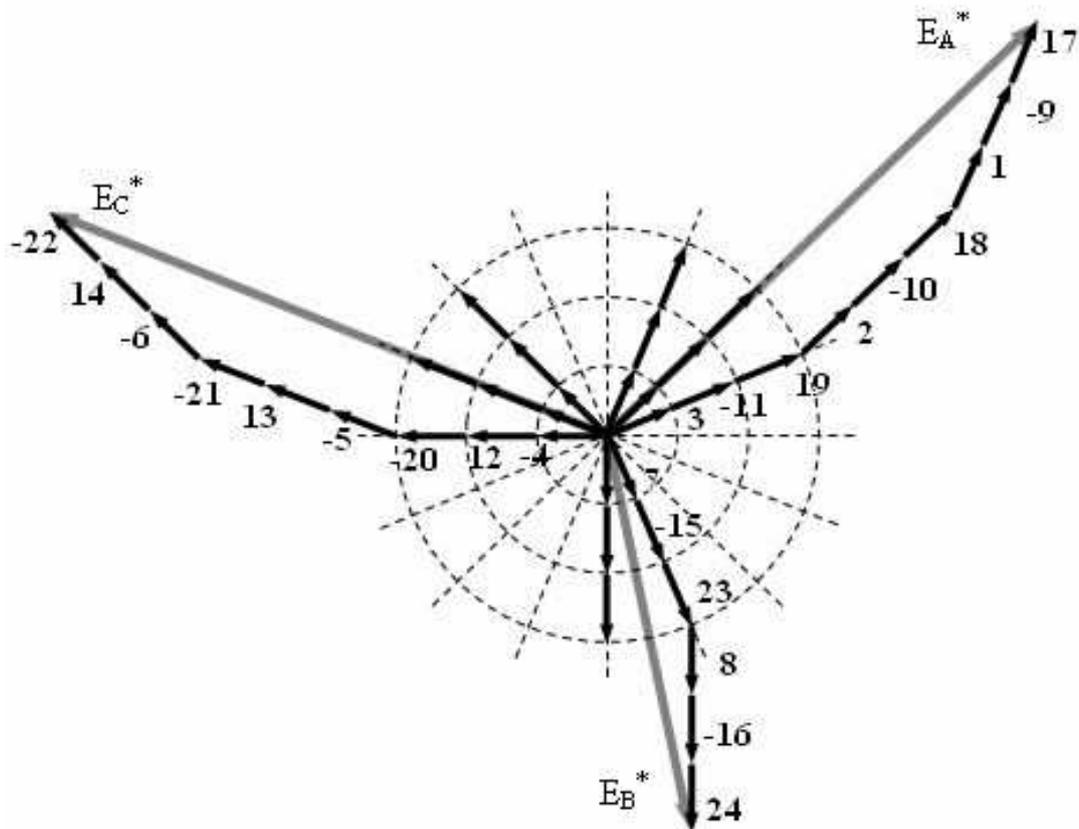


Рисунок 1.3 Векторная диаграмма до симметрирования с $z = 48$, $2p = 6$

Таблица 1.1. Гармонический анализ несимметричной обмотки

v	k_{wdv}	k_{wrv}	H_{dv}	H_{rv}
3	0,956	0,700	1,000	0,073
9	0,066	0,830	0,023	0,029
15	0,095	0,194	0,020	0,041
21	0,141	0,063	0,021	0,009

Из табл.1.1 видно, что применение обмоток с подобным гармоническим составом ЭДС (МДС), например, в асинхронных двигателях, может привести к ухудшению их электромагнитных, энергетических и виброшумовых показателей [55,57-60]. Таким образом, симметрирование таких обмоток является актуальной задачей.

Поэтому в настоящей работе поставлена задача обобщение известных приемов симметрирования и их дальнейшего совершенствования.

1.5. Система допущений

Качественному проектированию асинхронных двигателей с симметричными многофазными обмотками обязательно должен предшествовать гармонический анализ их ЭДС (МДС). Информация, содержащая значения обмоточного коэффициента $k_{w\rho}$ по рабочей гармонике $\nu=p$, относительных амплитуд H_ν наиболее опасных гармонических составляющих и их общее относительное содержание, определяемое коэффициентом дифференциального рассеяния τ_d , позволяет определить обмоточные данные проектируемого двигателя при заданных величинах напряжения и выбранном уровне электромагнитных нагрузок.

Для расчета одной из важнейших составляющих $k_{w\nu}$ – коэффициентов распределения $k_{R\nu}$ по гармоникам произвольных порядков ν – необходимо построить векторную диаграмму ЭДС, геометрически сложить векторы ЭДС катушек, принадлежащих одной из фаз, и разделить результат на число катушек в этой фазе. Для серийно применяемых на практике обмоток с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу используют известные аналитические выражения [45,50,61-65].

При проектировании двигателей с несимметричными обмотками одной из важнейших задач является снижение уровня эллиптичности вращающегося магнитного поля хотя бы по рабочей гармонике. Известны примеры частичного решения данной задачи для отдельных частных случаев с использованием специальных приемов симметрирования [9]. Однако, в большинстве случаев поле, создаваемое обмотками, спроектированными с применением указанных способов, все же отличалось от кругового. Поэтому в качестве критерия при проектировании обмоток со слабым уровнем несимметрии выбрано отсутствие, либо минимально возможный уровень

обратновращающейся составляющей магнитного поля рабочей гармоники. А ограничение на содержание высших гармоник поля следует рассматривать с точки зрения обеспечения возможности прямого пуска двигателя.

Как уже отмечалось, реальное применение машин с несимметричными обмотками возможно в тех случаях, когда в рабочем режиме обеспечивается практически симметричная система токов. В этой связи целесообразным будет принятие допущения о том, что анализ гармонического состава вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре будет производиться для случая питания обмоток двигателя равными по амплитуде токами – от условного трехфазного источника тока. В этом случае ЭДС и МДС обмоток, выраженные в относительных единицах, будут равны.

Однако если рассматривать электромагнитные процессы в реальном асинхронном двигателе, то на практике, даже в двигателях с симметричными обмотками, равенство токов в фазах далеко не всегда имеет место в рабочем режиме, не говоря уже о холостом ходе. Поэтому целесообразнее рассматривать гармонический состав ЭДС обмоток, наводимых магнитным полем основной (рабочей) гармоники. При этом принимается допущение о незначительном влиянии полей высших гармоник в рабочем режиме и на холостом ходу из-за сильного демпфирования их токами в клетке ротора.

1.6. Выводы по разделу 1

Задача проектирования и производства двигателей с несимметричными обмотками может возникнуть как при ремонте, так и при мелкосерийном производстве и модернизации новых электрических машин.

Использование известных схем несимметричных обмоток не обеспечивает приемлемых технико-экономических показателей электрических машин с такими обмотками из-за наличия эллиптических магнитных полей по рабочей гармонике и другим гармоникам магнитного поля.

Результаты гармонического анализа, включающего только значения обмоточных коэффициентов по гармоникам произвольных порядков недостаточны для исследования несимметричных обмоток, что связано с неполнотой информации по составляющим магнитных полей.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК

2.1. Обоснование необходимости применения метода симметричных составляющих

Для расчета электрических машин с несимметричными обмотками результаты гармонического анализа, включающего только значения обмоточных коэффициентов k_{wvj} каждой j -ой фазы по гармоникам произвольных v -ых порядков, в их традиционном понимании не позволяют определить соотношение амплитуд основного и обратно вращающегося полей, создаваемых этими МДС. Получить такую информацию можно только разложив ЭДС фаз на симметричные составляющие. При этом следует помнить, что значения соответствующих ЭДС и МДС, выраженные в относительных единицах, будут равны в случае равенства тока в обмотках. Также, в этом случае, будет одинаков и их гармонический состав. Опыт проектирования электрических машин с несимметричными обмотками [9,66-74] показывает, что реальное применение таких машин возможно лишь в тех случаях, когда в рабочем режиме обеспечивается практически симметричная система токов.

Таким образом, для разложения ЭДС фаз на симметричные составляющие сначала необходимо определить модули E_{vj} и аргументы φ_{vj} соответствующих векторов в полярных координатах, а затем рассчитать составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Однако, как и при традиционном гармоническом анализе, где сначала определяются результирующие векторы ЭДС, полученную информацию следует преобразовать к виду, удобному для дальнейших расчетов. Это приводит к необходимости использования понятия симметричных составляющих обмоточных коэффициентов и, в первую очередь, составляющих прямой k_{Ddv} , обратной k_{Drv} и нулевой k_{D0v} по-

следовательностей коэффициентов распределения.

Пусть m -фазная обмотка выполнена неравновитковой, т.е. произвольная k -я активная катушечная сторона (АКС) содержит относительное число w_k^* элементарных проводников

$$w_k^* = \frac{w_k}{w_{\max}},$$

где w_{\max} - максимальное число проводников в АКС; w_k^* - число проводников в k -ой АКС.

Тогда симметричные составляющие коэффициента распределения прямой K_{Ddv} , обратной K_{Drv} и нулевой K_{D0v} последовательностей обмотки, выполненной в числе пазов Z можно определить по выражению.

$$K_{D(d,r,0)v} = \frac{m \cdot |\dot{E}_{(d,r,0)v}|}{\sum_{i=1}^Z |w_k^*|}.$$

2.2. Алгоритм гармонического анализа

Пусть реальная $2p$ -полюсная обмотка уложена в числе пазов Z и состоит из $T_{по}$ периодов (повторяющихся частей). Тогда для выполнения гармонического анализа достаточно задать исходные данные на одном из этих периодов.

Исходные данные $2p$ -полюсной обмотки:

- число фаз обмотки – m ;
- число повторений обмотки – $T_{по}$;
- число пазов в периоде - Z_0 ;
- число пар полюсов в периоде - $p_0 = p / T_{по}$;
- шаг обмотки по пазам – y ;

- массивы номеров АКС каждой из m фаз на периоде повторения обмотки в числе пазов Z_0 задаются в виде знакопеременных рядов, причем в 2 m -фазных обмотках знак «-» соответствует номерам сопряженных АКС фаз

$$\{a_{jk}\} = \pm j1, \pm j2, \pm j3 \dots, \pm jN_j,$$

где N_j - число АКС в j -й фазе периода обмотки;

- массивы относительных чисел витков в АКС каждой из фаз

$$\{w_{jk}^*\} = w_{j1}^*, w_{j2}^*, w_{j3}^*, \dots, w_{jN_j}^*,$$

$$\alpha_z = \frac{2\pi}{Z_0}.$$

В связи с этим расчетный алгоритм изложен ниже:

- расчет угла α_z минимального смещения в магнитном поле.

- массивы $\{\alpha_{jkv}\}$ угловых координат элементарных векторов, отражающих ЭДС каждой АКС

$$\alpha_{jkv} = \begin{cases} \alpha_z \cdot v, & \text{если } \alpha_{jk} > 0; \\ \alpha_z \cdot v + \pi, & \text{если } \alpha_{jk} < 0. \end{cases}$$

Определение модуля и угловой координаты φ_{vj} результирующего полярного вектора ЭДС j -й фазы обмотки по гармонике v -го порядка:

- проекция результирующего вектора ЭДС на координатную ось x

$$\dot{E}_{vj}^* \Big|_y = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv});$$

- проекция результирующего вектора ЭДС на координатную ось y

$$\dot{E}_{vj}^* \Big|_x = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv});$$

- модуль E_{vj} результирующего вектора ЭДС

$$\begin{aligned}
|\mathbf{E}_{vj}^*| &= E_{vj}^* \sqrt{\left(\dot{\mathbf{E}}_{vj}^*|_x\right)^2 + \left(\dot{\mathbf{E}}_{vj}^*|_y\right)^2} = \\
&= \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv})\right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv})\right]^2};
\end{aligned}$$

- аргумент (угловая координата) φ_{vj} результирующего вектора ЭДС

$$\varphi_{vj} = \operatorname{arctg} \left[\frac{\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv})}{\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv})} \right].$$

Расчет симметричных составляющих коэффициента распределения трехфазных обмоток прямой k_{Ddv} , обратной k_{Drv} и нулевой k_{DOv} последовательностей по гармонике ν -го порядка:

$$\begin{aligned}
k_{Ddv} &= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* \cdot e^{-i2\pi/3} + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \cdot e^{-i4\pi/3} \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} = \\
&= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* \cdot e^{-i\varphi_{v1}} + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* \cdot e^{-i(\varphi_{v2}+2\pi/3)} + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \cdot e^{-i4\pi/3} \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*}; \\
k_{Drv} &= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* \cdot e^{-i4\pi/3} + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \cdot e^{-i2\pi/3} \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} = \\
&= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* \cdot e^{-i\varphi_{v1}} + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* \cdot e^{-i(\varphi_{v2}+4\pi/3)} + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \cdot e^{-i(\varphi_{v3}+2\pi/3)} \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*}; \\
k_{DOv} &= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} = \\
&= \frac{\left| \dot{\mathbf{E}}_{v1}^* \cdot e^{-i\varphi_{v1}} + \dot{\mathbf{E}}_{v2}^* \cdot e^{-i\varphi_{v2}} + \dot{\mathbf{E}}_{v3}^* \cdot e^{-i\varphi_{v3}} \right|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*}.
\end{aligned}$$

Коэффициента укорочения $k_{Y\nu}$ обмотки по гармонике ν -го порядка

$$k_{Y\nu} = \sin\left(\frac{y \cdot \pi \cdot \nu}{Z_1}\right).$$

Расчет симметричных составляющих обмоточного коэффициента $k_{W(d,r,o)\nu}$ по гармонике ν -го порядка

$$k_{W(d,r,o)\nu} = k_{D(d,r,o)} \cdot k_{Y\nu}.$$

Здесь следует заметить, что наличие второго слоя изменит угловые координаты результирующих векторов фаз ЭДС, их относительные сдвиги по фазе сохранятся и поэтому не скажутся на результатах применения МСС.

Расчет относительных амплитуд $H_{(d,r,o)\nu}$ симметричных составляющих МДС(ЭДС) по гармонике ν -го порядка

$$H_{(d,r,o)\nu} = \frac{k_{W(d,r,o)\nu} \cdot p}{k_{Wp} \cdot \nu},$$

где K_{Wp} - обмоточный коэффициент по рабочей гармонике $\nu = p$, численно равный наибольшему из значений симметричных составляющих прямой K_{Wdp} и обратной K_{Wrp} последовательностей.

Формирование порядков гармонических составляющих ЭДС обмотки.

В общем случае расчетные относительные порядки гармоник представляют собой натуральный ряд чисел в диапазоне от 1 до $Z_1 / 2$

$$\nu = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, Z_1/2.$$

Если в пределах обмотки её половины взаимно инверсны по фазом, то все четные гармонические составляющие ЭДС (МДС) станут равными нулю. Это дает возможность задавать исходную информацию только для половины обмотки, а порядки расчетных гармоник определять как ряд положительных нечетных чисел в таком же диапазоне

$$\nu = 1, 3, 5, 7, \dots, Z_1/2.$$

Если реальная обмотка состоит из T периодов, то абсолютные порядки гармонических составляющих МДС определяются по выражению

$$v_a = v \cdot T.$$

При определении коэффициента дифференциального рассеяния в первую очередь следует принять во внимание тот факт, что системы ЭДС (МДС) нулевой последовательности не создают вращающихся магнитных полей.

Кроме того, следует использовать свойство периодичности модулей обмоточных коэффициентов

$$|k_{Wv}| = |k_{W(lz \pm v)}|,$$

здесь и далее l - произвольное натуральное число.

Это позволяет для каждого значения гармоники порядка v рассчитать частичные суммы $S_{(d,r)v}$ согласно выражения

$$S_{(d,r)v} = \frac{k_{W(d,r)v}^2 \cdot p^2}{k_{Wp}^2} \cdot \sum_{l=1}^L \left[\frac{1}{(lZ + v)^2} + \frac{1}{(lZ - v)^2} \right],$$

где $l = 5$ достаточно для практических расчетов.

Тогда результирующий коэффициент дифференциального рассеяния определяется следующим образом

$$\tau_d = S_{dr} + S_{rv} - 1.$$

Расчетный пример применения алгоритма гармонического анализа приведен в приложении А.

2.3. Выводы к разделу 2

Использование в методике гармонического анализ понятий симметричных составляющих относительных величин ЭДС (МДС) дает возможность получить всю недостающую информацию о прямо- и обратно- вращающихся

магнитных полях, создаваемых любыми обмотками с любым уровнем несимметрии.

Предложенный алгоритм гармонического анализа обмоток может быть положен в основу универсальной методики анализа двух- и трехфазных обмоток с любым уровнем несимметрии и произвольным числом витков в катушках.

Разработана программа автоматизации симметрирования обмоток с последующим гармоническим анализом, что существенно упрощает труд проектировщика и ускоряет решение самой задачи.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДИКА СИММЕТРИРОВАНИЯ ОБМОТОК

3.1. Симметрирование изменением числового ряда обмотки

При использовании известного алгоритма формирования числового ряда [9], уровень несимметрии таких обмоток оказывается недопустимо высоким. Применение таких обмоток, например в асинхронных двигателях, приводит к резкому снижению их технико-экономических показателей.

Для уменьшения уровня несимметрии таких обмоток требуется так переформировать распределение активных катушечных сторон (АКС), чтобы уменьшить или полностью исключить несимметрию, хотя бы по рабочей гармонике. Подобное преобразование принято называть симметрированием.

Рассмотрим в качестве примера исходную трехфазную ($m=3$) шестиполюсную обмотку ($2p=6$), выполненную в тридцати пазах ($Z_1=30$). Тогда число пазов на полюс и фазу составит: $q=Z_1/(2pm)=5/3$, а повторяющаяся часть числового ряда – 2,2,1. Полному числовому ряду – 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1 – соответствует распределение фазных зон одного слоя обмотки, представленное на рис. 3.1.

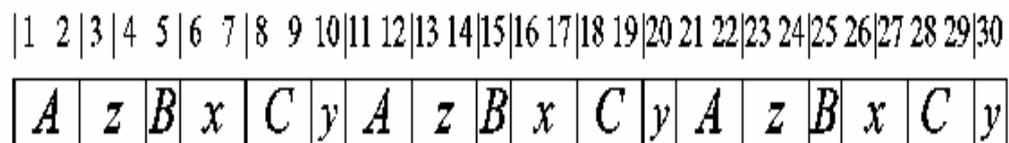


Рисунок 3.1 – Исходное распределение фазных зон слоя обмотки ($Z = 30, q = 5/3$)

Очевидно, что исходная обмотка несимметрична даже по числу катушек в фазе (число катушек в фазе $A = 12$, в фазе $B = 6$, в фазе $C = 12$). Распределению, представленному на рис.3.1, соответствует векторная диаграмма в масштабе рабочей гармонике ($\nu = p = 3$), приведенная на рис 3.2.

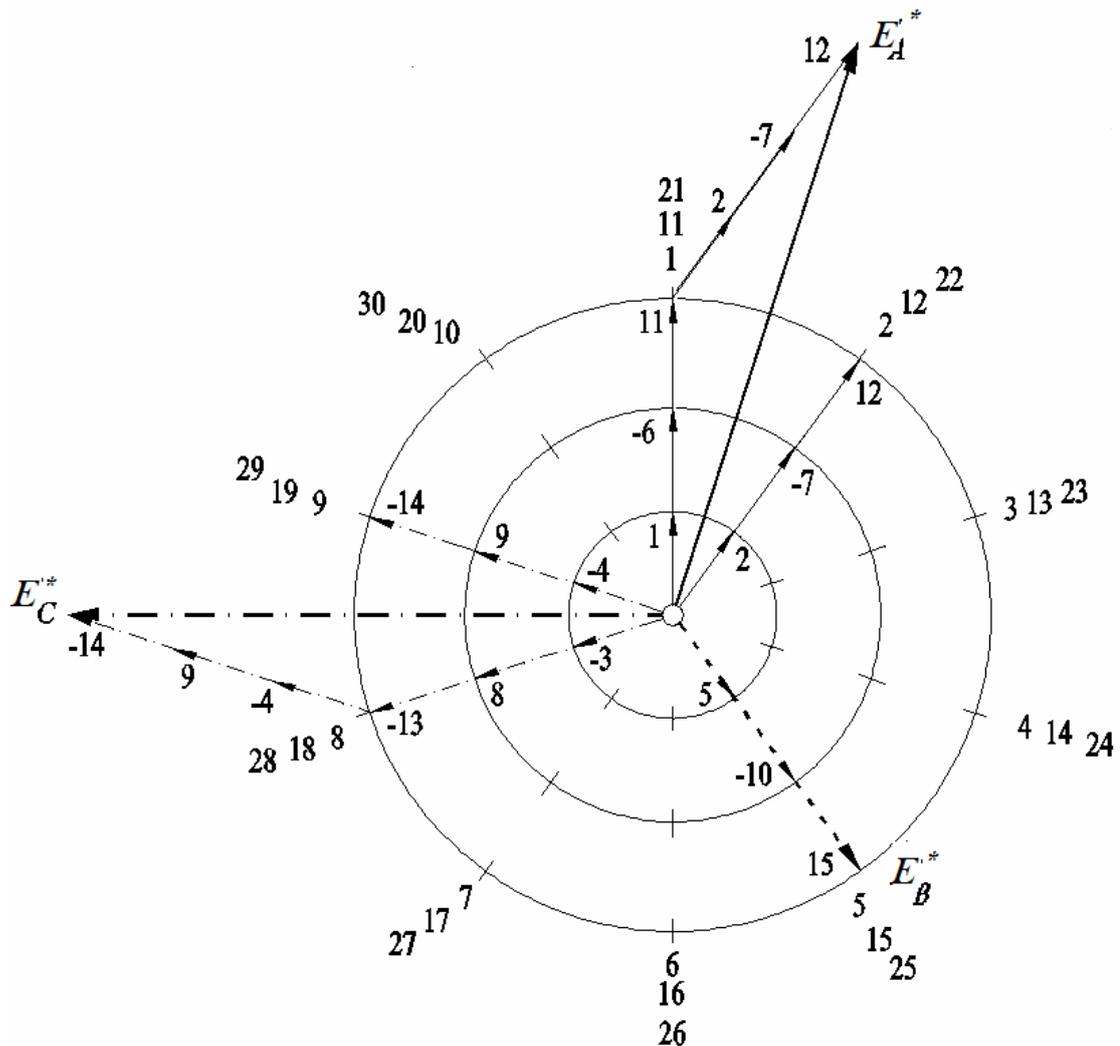


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма ЭДС исходной трехфазной обмотки ($Z=30$, $q=5/3$, $v=p=3$)

Здесь на диаграмме векторы элементарных ЭДС изображены тонкими линиями со стрелками, причем векторы фазы А – сплошными, фазы В – пунктирными, а фазы С – штрихпунктирными линиями. Цифры около стрелок соответствуют номеру паза, в котором расположена АКС, создающая данную элементарную ЭДС. Знак минус указывает на принадлежность к инверсным фазам (х, у, z). На диаграмме показаны векторы элементарных ЭДС первых половин рассматриваемых обмоток, т. к. аналогичные векторы, создаваемые АКС смещены на половину числа пазов совпадают с исходными. Результирующие векторы ЭДС фаз E_A^* , E_B^* , E_C^* , отображены на диаграммах утолщенными линиями.

Для исходной обмотки (рис. 3.2) относительные амплитуды результирующих ЭДС равны: $E_A^* = E_C^* = 11,4$; $E_B^* = 6$. Угловые координаты соответствующих векторов фаз составляют: $\varphi_A = 54^\circ$, $\varphi_C = -54^\circ$, $\varphi_B = 180^\circ$, а их относительные сдвиги: $\varphi_{AB} = \varphi_{CB} = 126^\circ$; $\varphi_{AC} = 108^\circ$.

Таким образом, в исходной обмотке проявляется как амплитудная, так и угловая несимметрия результирующих векторов ЭДС по рабочей гармонике. Так, относительная разница амплитуд результирующих векторов фаз составляет

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_B^*}{E_A^*} = \frac{11,4 - 6}{11,4} = 0,474.$$

Максимальное отклонение относительного сдвига результирующих векторов ЭДС от 120° достигает 12° . Это приводит к неравенству сопротивлений фаз и несимметрии фазных токов, что полностью исключает практическое применение такой обмотки.

Известный способ симметрирования подобных обмоток [9] ограничивается изменением числового ряда обмотки, что в первую очередь обеспечивает равенство чисел АКС в фазах обмотки. Указанное преобразование заключается в выполнении циклических перестановок в каждой из последующих повторяющихся частей числового ряда. В случае, если перестановка будет не циклична, а, предположим, будет иметь место зеркальное отображение повторяющейся части числового ряда, то симметрия по числу АКС в фазах обмотки не будет достигнута. Рассмотрим этот случай, так теперь полный числовой ряд имеет вид:

$$2,2,1, 1,2,2, 2,2,1, 1,2,2, 2,2,1, 1,2,2.$$

Распределение фазных зон, соответствующее данному распределению, представлено на рис.3.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y

Рисунок 3.3 – Распределение фазных зон слоя обмотки при симметрировании числового ряда путем зеркального отражения

Число катушек в фазе A $N_a = 9$, в фазе B $N_b = 9$, в фазе C $N_c = 12$, т.е. равенства чисел АКС, как было заявлено ранее, таким образом достигнуть невозможно.

Рассмотрим следующий вариант перестановки числового ряда, который используется при симметрировании несимметричных обмоток. После такого преобразования числовой ряд рассматриваемой на рис. 3.4 обмотки будет иметь вид:

$$2,2,1, 2,1,2, 1,2,2, \quad 2,2,1, 2,1,2, 1,2,2.$$

Соответствующее этому числовому ряду распределение фазных зон представлено на рис. 3.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y

Рисунок 3.4 – Распределение фазных зон слоя обмотки после первого этапа симметрирования ($Z=30$, $q=5/3$)

Проведенное преобразование приводит к уменьшению уровня несимметрии. Это наглядно иллюстрирует векторная диаграмма ЭДС по рабочей гармонике, приведенная на рис. 3.5. Диаграмма свидетельствует, что первый этап симметрирования позволил резко уменьшить как амплитудную, так и угловую несимметрию.

Действительно, амплитуды результирующих векторов ЭДС стали равными: $E_A^* = E_B^* = 9,53$; $E_C^* = 9,24$. Угловые координаты соответствующих векторов фаз теперь составляют: $\varphi_A = 50,28^\circ$, $\varphi_C = -72^\circ$, $\varphi_B = 165,72^\circ$, а их относительные сдвиги: $\varphi_{AC} = \varphi_{CB} = 122,28^\circ$; $\varphi_{AB} = 115,44^\circ$.

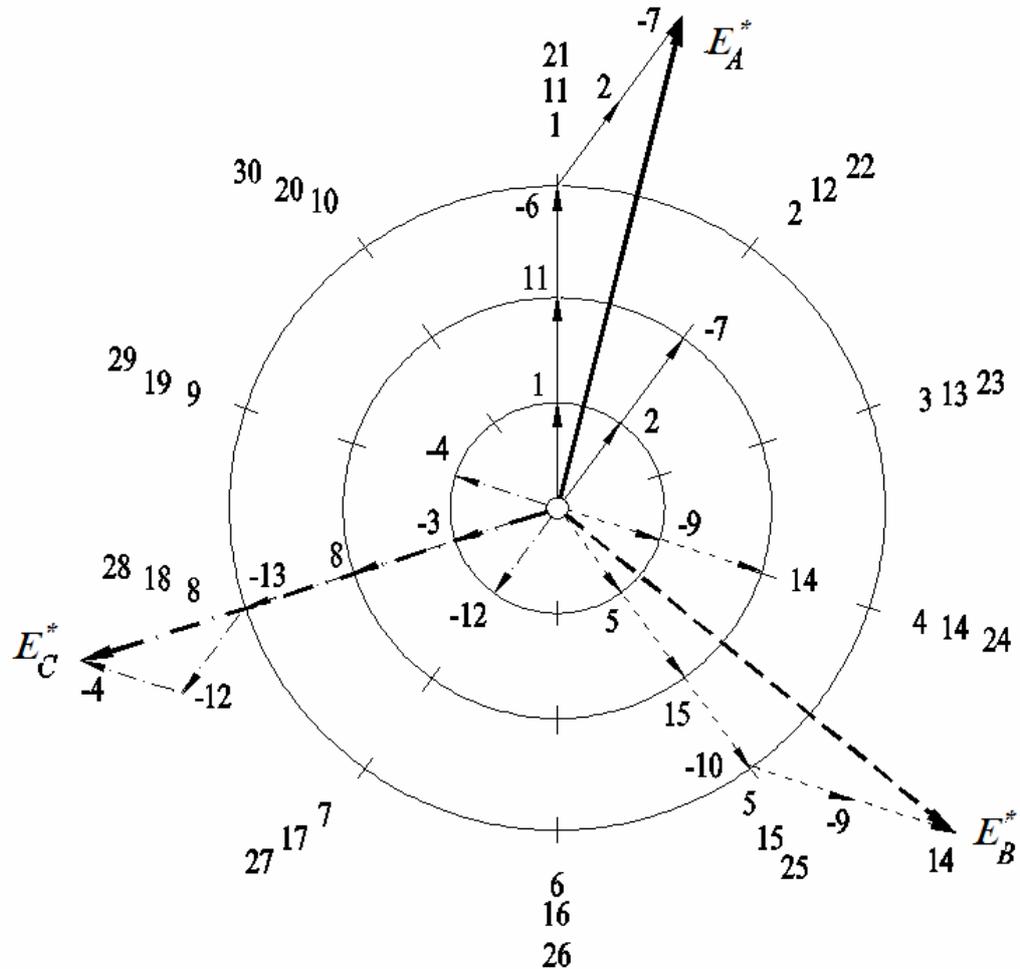


Рисунок 3.5 – Векторная диаграмма ЭДС трехфазной несимметричной обмотки после преобразования числового ряда

Таким образом, относительная разница амплитуд результирующих векторов ЭДС уменьшилась до значения

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_C^*}{E_A^*} = \frac{9,53 - 9,24}{9,53} = 0,03 ,$$

а максимальное отклонение относительного сдвига результирующих векторов ЭДС от 120° уменьшилось с 12° до $4,56^\circ$.

Как мы видим полученные после симметрирования результаты выходят за границы допустимых значений по амплитудной и угловой несимметрии.

На векторных диаграммах ЭДС перемещению катушечной стороны соответствует поворот векторов пазовых ЭДС на углы, кратные углу минимального сдвига в магнитном поле. Дискретный характер поворота векторов пазовых ЭДС, являющихся составляющими результирующего

вектора ЭДС, не может обеспечить непрерывного изменения фазы и амплитуды векторов ЭДС. Поэтому такой подход к симметрированию принципиально исключает возможность достигнуть в любых случаях полного устранения несимметрии или небаланса ЭДС, то есть равенства амплитудных и фазовых характеристик результирующих ЭДС.

3.2. Симметрирование с применением неравновитковых катушек

Для повышения эффективности симметрирования необходимо было разработать такие средства, которые обеспечили бы возможность плавного изменения, как амплитуд, так и угловых координат результирующих векторов ветвей. Только в таком случае возможно достижение как амплитудной, так и фазовой симметрии.

В качестве подобного средства при симметрировании предлагается использовать подразделение АКС на составные части в сочетании с их перемещением вдоль расточки. На векторных диаграммах этой операции будет соответствовать поворот пропорциональной части соответствующего вектора фазовой ЭДС. Поскольку теоретически на соотношения подразделенных частей вектора \dot{e}_i ограничений не накладывается, то они могут быть сколь угодно малы. Поэтому даже дискретный поворот такой части может обеспечить изменение амплитуды и угловых координат результирующих векторов на бесконечно малую величину.

При подобном симметрировании необходимо соблюдать следующие общие рекомендации.

Выбор базового результирующего вектора. В качестве базового следует выбирать вектор, амплитуда которого имеет промежуточное значение среди остальных, или вектор, занимающий симметричное относительно остальных положение. Как правило, подразделение и перемещение АКС, образующих базовый вектор, не производится.

Процесс симметрирования следует производить поэтапно, устраняя сначала фазовую, а затем амплитудную несимметрии.

При устранении фазовой несимметрии в первую очередь выбирается необходимое угловое положение φ_s симметризуемого результирующего вектора фазы или ветви с угловой координатой φ_i . Это положение фиксируется как на векторной диаграмме, так и на распределении АКС. Затем определяется угол рассогласования $\Delta\varphi (\varphi_i - \varphi_s)$ и выбор подразделяемых АКС. Одна или несколько из произвольно выбранных подразделённых частей смещается на распределении АКС в направлении оси с угловой координатой φ_s . Следует помнить, что при произвольном выборе подразделяемых АКС одновременно изменяются как угловые координаты, так и амплитуды преобразуемых результирующих векторов.

Если это необходимо, то после окончания фазового симметрирования переходят к амплитудному. Для того чтобы фазовая координата φ_{is} не менялась, подразделению подвергают попарно чётное число АКС, симметрично расположенных относительно результирующего вектора. Подразделённые части одновременно смещают во взаимно противоположных направлениях. В случае необходимости увеличения амплитуды, смещение производят в направлении результирующего вектора, а в случае необходимости уменьшения – в противоположном направлении.

Рассмотрим предложенный алгоритм на примере все той же, но уже отсимметрированной с помощью числового ряда обмотки.

Из диаграммы следует (рис. 3.5), что вектор E_C^* расположен симметрично относительно векторов E_A^* и E_B^* , поэтому для достижения равенства $\varphi_{AC} = \varphi_{CB} = 120^\circ$ необходимо выполнить взаимно противоположное перемещение этих векторов в сторону E_C^* . Необходимое смещение вектора E_A^* против часовой стрелки обеспечивает уменьшение на 23,4% числа витков

катушках 2 и –7, а смещение E_B^* по часовой стрелке – такое же уменьшение числа витков катушек –9 и 14 (рис. 3.5).

Фрагмент исходных данных с изменением числа витков в катушках приведен на рис. 3.6.

	“А”	“В”	“С”		w_A^*	w_B^*	w_C^*
mm =	1	-6	-9	-3	1	0.7667	1
	2	-7	-10	-4	0.7667	1	1
	3	1	5	-12	1	1	1
	4	2	14	-13	0.7667	0.7667	1
	5	11	15	8	1	1	1
	6	21	24	18	1	0.7667	1
	7	22	25	19	0.7667	1	1
	8	-16	-20	27	1	1	1
	9	-17	-29	28	0.7667	0.7667	1
	10	-26	-30	-23	1	1	1

Рисунок 3.6 – Фрагмент ввода данных

При этом угловые координаты векторов E_A^* и E_B^* станут равными $\varphi_A=48^\circ$ и $\varphi_B=168^\circ$, а амплитуды $E_A^*=E_B^*=8,66$. В результате полностью устранена угловая несимметрия, но при этом несколько возросла относительная разница амплитуд

$$\Delta E^* = \frac{E_C^* - E_A^*}{E_C^*} = \frac{9,24 - 8,66}{9,24} = 0,063.$$

Для равенства амплитуд результирующих векторов ЭДС фаз E_A^*, E_B^*, E_C^* следует уменьшить величину E_C^* , что может быть выполнено, например, уменьшением на 6% числа проводников в АКС с номерами: 3, 4, 8, 12, 13, 18, 19, 23, 27, 28 (рис. 3.7).

Таблица 3.2 – Результат расчета по фазовому симметрированию

ν	φ_A	φ_B	φ_C	E_A^*	E_B^*	E_C^*
3	47,9994	168,0006	-72	8,67	8,67	9,2361

	“A”	“B”	“C”		w_A^*	w_B^*	w_C^*
mm =	1	-6	-9	-3	1	0.7667	0.9388
	2	-7	-10	-4	0.7667	1	0.9388
	3	1	5	-12	1	1	0.9388
	4	2	14	-13	0.7667	0.7667	0.9388
	5	11	15	8	1	1	0.9388
	6	21	24	18	1	0.7667	0.9388
	7	22	25	19	0.7667	1	0.9388
	8	-16	-20	27	1	1	0.9388
	9	-17	-29	28	0.7667	0.7667	0.9388
	10	-26	-30	-23	1	1	0.9388
ww =							

Рисунок 3.7 – Фрагмент ввода данных при амплитудном симметрировании

В итоге несимметрия по рабочей гармонике практически полностью устранена (табл. 3.2)

$$\Delta E^* = \frac{E_C^* - E_A^*}{E_C^*} = \frac{8,6708 - 8,6705}{8,6708} = 3,5 \cdot 10^{-5}$$

Таблица 3.2 – Результат расчета по амплитудному симметрированию

ν	φ_A	φ_B	φ_C	E_A^*	E_B^*	E_C^*
3	47,9994	168,0006	-72	8,6705	8,6705	8,6708

В итоге несимметрия по рабочей гармонике полностью устранена, о чем свидетельствует векторная диаграмма, приведенная на рис. 3.8.

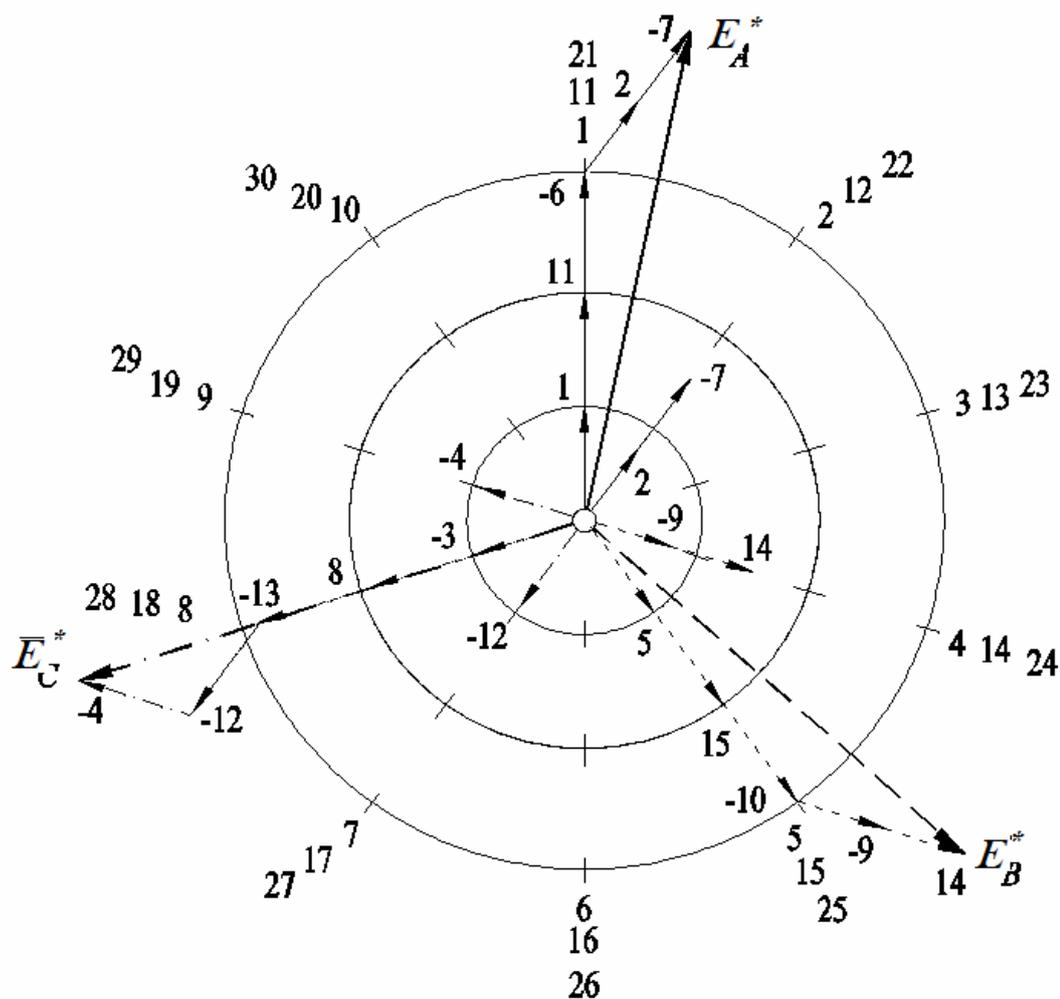


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма ЭДС трехфазной неравновитковой обмотки после завершения симметрирования

Следует отметить, что в данном случае характер распределения АКС с разными числами проводников позволяет реализовать симметрированную обмотку только в двухслойном варианте. При этом заполнение пазов оказывается неравномерным, как это показано на рис. 3.9. На рисунке полное заполнение пазов условно обозначено штрих-пунктирной линией, а ломаной линии соответствует фактическое их заполнение. Использование обмоточного пространства по сравнению с равнокатушечными обмотками уменьшается на 8,3%.

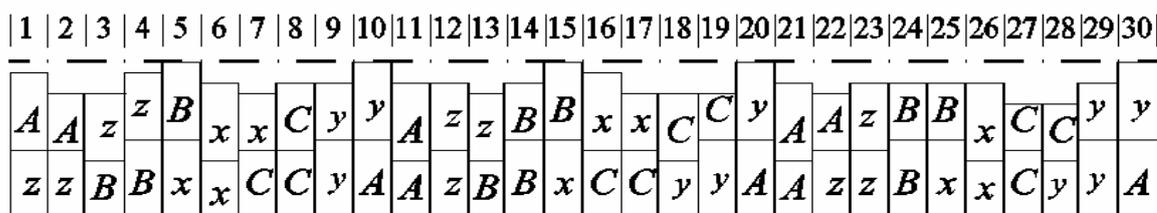


Рисунок 3.9 – Распределение АКС трехфазной двухслойной симметрированной обмотки

Как видно из результатов полного гармонического анализа (табл. 3.3) синтезированная обмотка обладает преимущественным потокоцеплением с полем рабочей гармоники $k_{wd}=0,8989$ и незначительным потокоцеплением с полями гармоник нечетных порядков и не имеет потокоцепления с гармониками, кратными двум (прочерк соответствует 0). Также видно проявление несимметрии по нерабочим гармоникам, но оно незначительно и им можно пренебречь. Также представленные данные свидетельствуют о том, что обмотка полностью симметрична по рабочей гармонике.

Таблица 3.3 – Полный гармонический анализ обмотки

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0.0675	0.0511	0.0072	0.2252	0.1707	0.0240
2	-	-	-	-	-	-
3	-	0.8989	-	-	1.0000	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0.1073	0.1073	0.0374	0.0716	0.0716	0.0250
6	-	-	-	-	-	-
7	0.0471	0.0072	0.0235	0.0224	0.0034	0.0112
8	-	-	-	-	-	-
9	0.3433	-0.051	0.0058	0.1273	0.0189	0.0022
10	-	-	-	-	-	-
11	0.2411	0.0586	0.0985	0.0732	0.0178	0.0299
12	-	-	-	-	-	-
13	0.0193	0.0776	0.0651	0.0049	0.0199	0.0167
14	-	-	-	-	-	-
15	0.2833	0.041	0.0048	0.0163	0.0912	0.0011

3.3. Программная реализация алгоритма симметрирования

Симметрирование обмоток связано с многократными графическими построениями векторных диаграмм, а выполнение гармонического анализа – с большим объемом расчетов. Поэтому создание специального программного обеспечения, автоматизирующего эти процессы, актуально.

Одной из задач данной работы является создание подсистемы автоматизированного синтеза симметрированных двух- и трехфазных обмоток и детального гармонического анализа их ЭДС.

Первый этап симметрирования заключается в выполнении циклических перестановок в каждой из последующих повторяющихся частей числового ряда обмотки и обеспечивает равенство чисел АКС в фазах обмотки. В силу своей простоты его можно выполнять вручную еще на стадии подготовки исходных данных.

Второй этап симметрирования заключается в использовании метода перебора вариантов соотношения чисел витков в катушках. Это предопределяют необходимость использования интерактивной технологии. Такой программный модуль должен включать в себя, как минимум, два связанных между собой блока: блок оценки уровня несимметрии и блок оперативной корректировки исходных данных. В первом из них, помимо численной информации о величинах и угловых координатах результирующих ЭДС каждой из фаз, необходима визуализация полной векторной диаграммы.

После успешного завершения интерактивного симметрирования становится возможным корректное использование методики гармонического анализа, основанного на методе симметричных составляющих, т. е. включение расчетного модуля.

Вышесказанное позволяет составить блок-схему программы проектируемой подсистемы, представленной на рис. 3.10.

В состав исходных данных (1) включены:

- число фаз – m ;
- число пар полюсов – p ;
- шаг обмотки по пазам u ;
- числа n_j АКС в каждой из фаз;
- m массивов $\{N_j\}$ номеров пазов, в которых располагаются АКС каждой из фаз.

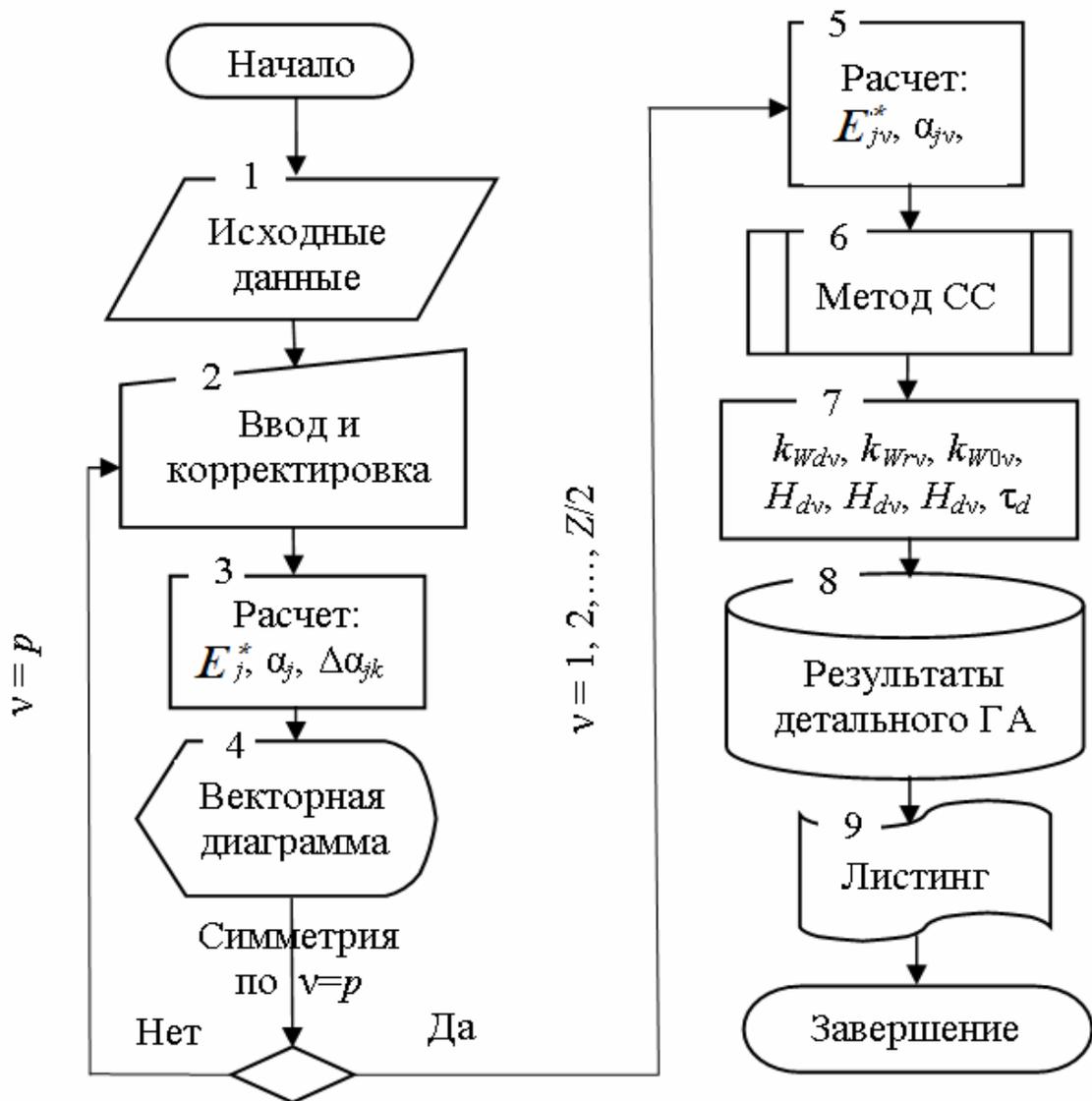


Рисунок 3.10 – Блок-схема программы

Соответствующие $\{N_j\}$ массивы $\{w_j\}$ относительных чисел витков предварительно заданы при условии $w_j=1$. Число пазов z определяется по

выражению $Z = \sum_{j=1}^m n_j$

Ввод исходных данных (блок 2) выполняется вручную замещением начальных значений в ячейках всплывающей панели.

Блок 3 осуществляет расчет относительных величин результирующих ЭДС E^*_j каждой из фаз, соответствующих угловых координат α_j и угловых смещений $\Delta\alpha_{jk}$ векторов E^*_j друг относительно друга.

Блок 4 выводит эти данные и визуализирует векторную диаграмму ЭДС, что позволяет на основании анализа текущего уровня несимметрии выполнить симметрирование обмотки путем корректировки чисел витков (блок 2).

После завершения симметрирования включается расчетный модуль (блоки 5-9), использующий алгоритм гармонического анализа [23]. Сначала блоком 5 осуществляется расчет амплитуд E^*_{jv} и угловых координат α_{jv} каждой из фаз. Затем в блоке 6 эти данные обрабатываются с применением метода симметричных составляющих.

В результате определяются симметричные составляющие обмоточного коэффициента k_{Wv} : k_{Wrv} , k_{Wdv} и k_{W0v} . Расчеты выполняются в блоке 7 при изменении порядков v гармоник в диапазоне от 1 до $Z/2$.

Результаты запоминаются в блоке 8 и при необходимости выводятся на печать (блок 9).

В качестве примера рассмотрим симметрирование и гармонический анализ шестиполусной ($2p=6$) обмотки, которую необходимо выполнить в 24 пазах статора.

Формальное определение числового ряда (ЧР) по [9] такой обмотки приводит к такому результату

$$2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1.$$

Однако при этом число АКС в каждой из фаз окажется неодинаковым (12 – в первой фазе и по 6 – в остальных), что вызовет недопустимо высокий

уровень несимметрии.

Поэтому выполним симметрирование ЧР, для чего выполним циклические перестановки в повторяющейся части исходного. Тогда получим

$$2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2.$$

В результате каждая из фаз теперь содержит по 8 АКС. Симметрированному ЧР соответствует распределение АКС, приведенное на рис.3.11.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	№№ пазов
A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	Фазные зоны

Рисунок 3.11 – Распределение активных катушечных сторон

Это дает возможность завершить формирование исходных данных подготовкой трех массивов $\{N_j\}$ номеров пазов:

$\{N_1\}=$	1, 2, -5, 9, -13, -14, 17, -21;	
$\{N_2\}=$	4, -8, 11, 12, -16, 20, -23, -24;	(1)
$\{N_3\}=$	-3, 6, 7, -10, 15, -18, -19, 22.	

Занесение исходных данных иллюстрирует панель программы, приведенная на рис. 3.12. Число фаз $m=3$ задается простановкой метки в соответствующем круглом окошке в верхней части панели. Ниже в соответствующих окнах заносятся числа полюсов $p=3$ и шаг обмотки по пазам, выбранный в данном случае диаметральный ($y=4$).

Числа АКС n_j в каждой из фаз, массивы номеров пазов $\{N_j\}$ и относительных чисел витков $\{w_j\}$ могут быть подготовлены заранее в виде таблиц Excel и введены нажатием кнопки «Загрузить данные».

Допускается занесение перечисленных выше данных вручную после ввода чисел АКС n_j в каждой из фаз после нажатия кнопки с соответствующим названием, после чего активизируются два или три окна (в соответствие с числом фаз) с ячейками для ввода номеров пазов $\{N_j\}$ в соответствии с предыдущим (1). Ячейки массивов $\{w_j\}$ относительных чисел витков в этом случае автоматически заполняются значениями, равными 1.

В нижней части панели выбираем режим «Отладка» и нажимом кнопки «Вывести результат» активируем появление окна отладки (рис. 3.13) с векторной диаграммой и координатами результирующих векторов ЭДС каждой из фаз.

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки: 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов:

Шаг обмотки по пазам:

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
8	8	8

для 1-ой фазы: **Z0=24**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
1	2	-5	9	-13	-14	-21	17
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
4	11	12	-8	-16	-23	-24	20
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
6	7	-3	-10	-18	-19	15	22
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.12 – Панель ввода данных

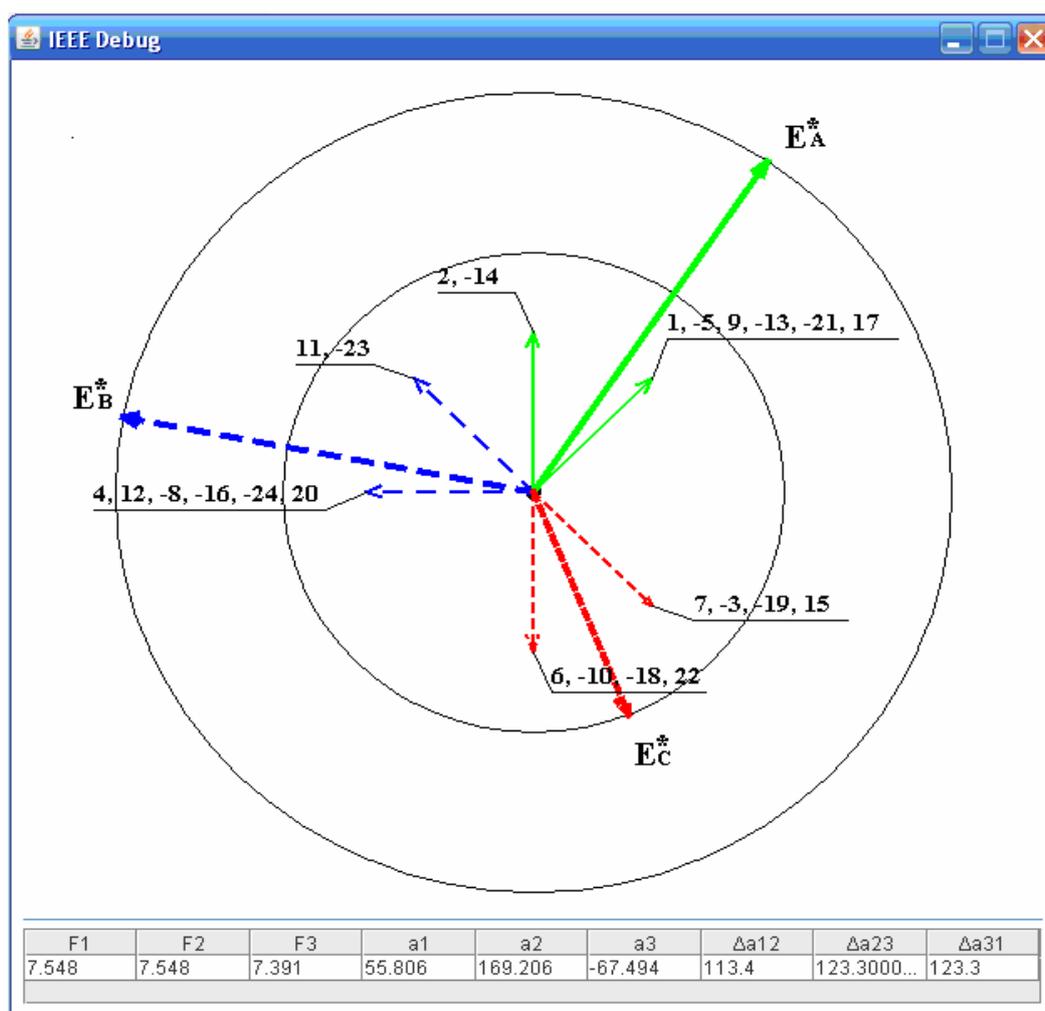


Рисунок 3.13 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки после выравнивания угловых координат

В таблицах подсистемы, где есть окно с векторной диаграммой использована цифровая нумерация фаз ($E_1=E_A^*$; $E_2=E_B^*$; $E_3=E_C^*$).

Выполним анализ полученных результатов. Из диаграммы и данных, приведенных в таблице (рис. 3.13, под диаграммой) следует, что результирующие векторы E_A^* и E_B^* равны и располагаются симметрично относительно вектора E_C^* , имеющего меньшую амплитуду. Кроме того, табличные данные свидетельствуют о том, что $\Delta\alpha_{13}=\Delta\alpha_{23}=123,3^\circ$, а $\Delta\alpha_{12}=113,4^\circ$, т.е. отличаются от необходимых для выполнения угловой

симметрии угла 120° . Понятно, что для устранения указанного углового рассогласования необходимо векторы E_A^* и E_B^* повернуть на $3,3^\circ$ в направлении вектора E_C^* . Выполнить такой поворот можно, уменьшив величину единичных векторов с номерами 2, 14, 11 и 23. Реализация такого преобразования осуществляется путем уменьшения относительного числа витков w^* в АКС с соответствующими номерами.

Необходимые значения относительных чисел витков указанных АКС определяются методом последовательных приближений в интерактивном режиме вплоть до достижения требуемой точности. После нескольких циклов последовательных приближений при $w^*=0,642$ получаем практически одинаковые углы $\Delta\alpha_{ij} \approx 120^\circ$ между результирующими векторами, приведенные на рис 3.14.

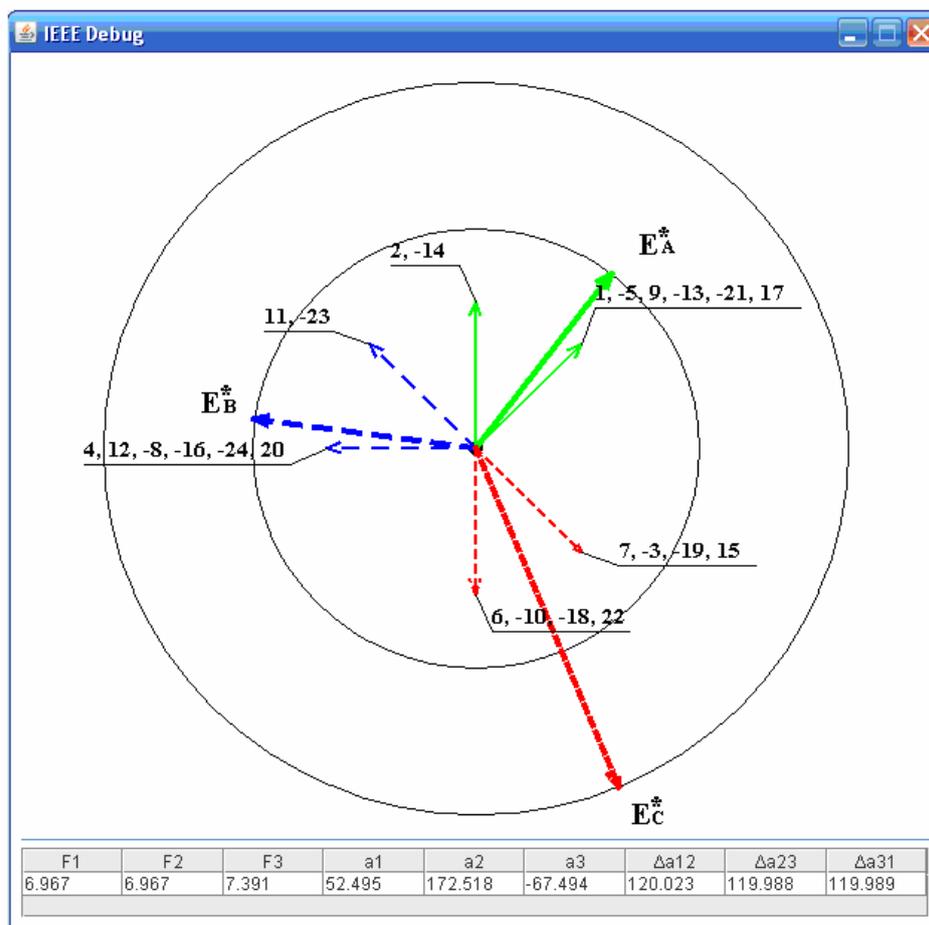


Рисунок 3.14 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки после выравнивания амплитудных координат

Из этой же таблицы следует, что амплитуда ЭДС третьей симметрирующей фазы составляет 7,391 и превышает величины ЭДС остальных двух фаз на 0,422.

Приступим к амплитудному симметрированию, которое, очевидно, должно заключаться в уменьшении E_A^* . Такое уменьшение можно выполнить разными способами, но при соблюдении одного важного условия – сохранении угловой симметрии.

Проще всего обеспечить это условие при одновременном уменьшении величин всех единичных векторов указанной фазы. Степень такого уменьшения определяется как отношение амплитуд ЭДС:

$$w^* = E_{A(B)}^* / E_C^* = 6,97/7,391 = 0,943.$$

После занесения этих значений получаем окна программы, приведенные на рис. 3.15 и рис. 3.16.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
8	8	8

для 1-ой фазы: **Z0=24**

1 n/w	2 n/w	3 n/w	4 n/w	5 n/w	6 n/w	7 n/w	8 n/w
1	2	-5	9	-13	-14	-21	17
1.000	0.642	1.000	1.000	1.000	0.642	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1 n/w	2 n/w	3 n/w	4 n/w	5 n/w	6 n/w	7 n/w	8 n/w
4	11	12	-8	-16	-23	-24	20
1.000	0.642	1.000	1.000	1.000	0.642	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1 n/w	2 n/w	3 n/w	4 n/w	5 n/w	6 n/w	7 n/w	8 n/w
6	7	-3	-10	-18	-19	15	22
0.943	0.943	0.943	0.943	0.943	0.943	0.943	0.943

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.15 – Окно программы после занесения значений степени уменьшения

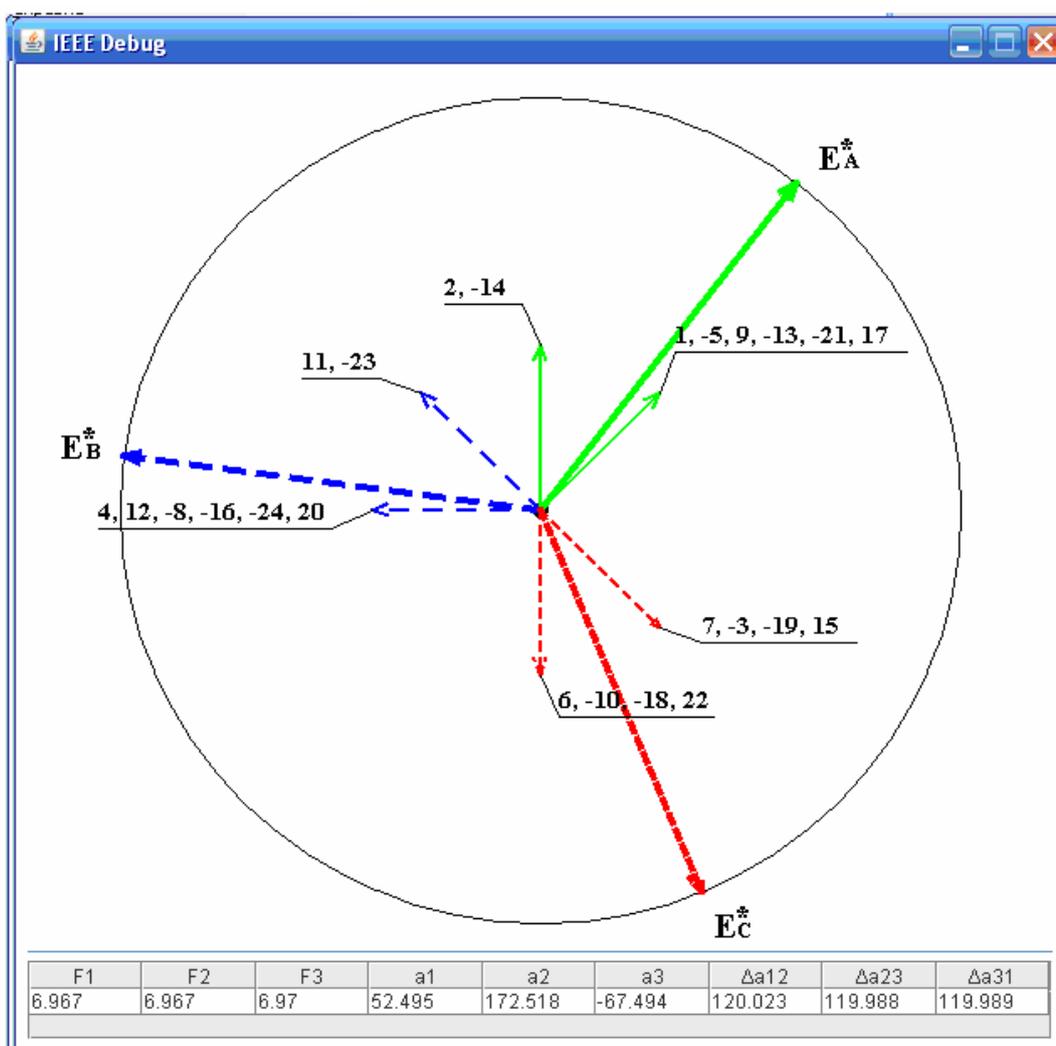


Рисунок 3.16 – Вид окна программы после завершения симметрирования

Полученные результаты свидетельствуют о достижении практически полной симметрии в отношении рабочей гармоники и завершении процесса симметрирования обмотки.

Далее, посредством активации кнопки «Расчет» программа выполняет детальный гармонический анализ симметрированной обмотки, результаты которого могут быть просмотрены и проанализированы в соответствующем окне программы или сохранены на диске в виде файла Excel, после чего могут быть распечатаны. Результаты полного гармонического анализа исходной и симметрированной обмоток приведены ниже в табл. 3.4 и 3.5 соответственно.

Таблица 3.4 – Результаты гармонического анализа исходной обмотки

(z=24, 2p=6)

v	k_{Yv}	k_{D0v}	k_{Drv}	k_{Ddv}	k_{W0v}	H_{0v}	k_{Wrv}	H_{rv}	k_{Wdv}	H_{dv}
1	0,5	0,128	0,102	0,165	0,064	0,204	0,051	0,163	0,083	0,265
3	1,0	0,034	0,936	0,025	0,037	0,040	0,936	1,0	0,025	0,027
5	0,5	0,308	0,132	0,022	0,154	0,099	0,066	0,042	0,011	0,007
7	0,5	0,128	0,165	0,102	0,064	0,029	0,083	0,038	0,051	0,023
9	1,0	0,526	0,104	0,039	0,526	0,187	0,104	0,037	0,039	0,014
11	0,5	0,308	0,022	0,132	0,154	0,045	0,011	0,003	0,066	0,019
$S_D=0,10986$		$S_R=1,06067$		$S_0=0,07276$		$\tau_d=0,24330$		$\tau_{da}=0,17054$		

В приведенных таблицах выделены жирным шрифтом две строки, отображающие важнейшие показатели сопоставляемых обмоток.

Во первых, это составляющие обмоточных коэффициентов k_{Y3} , k_{D03} , k_{Dr3} , k_{Dd3} , k_{W03} , k_{Wr3} , k_{Wd3} и их относительных амплитуд H_{03} , H_{d3} , H_{r3} по рабочей гармонике $v=p=3$. Сопоставление этих строк наглядно демонстрирует преимущество симметрированной обмотки по сравнению с исходной. Действительно, величина обмоточного коэффициента k_{Wr3} увеличилась с 0,939 до 0,945, а симметричные составляющие k_{W03} и k_{Wd3} отсутствуют, что гарантирует создание практически кругового вращающегося поля в зазоре электрической машины и лучшее использование ее активной части.

Таблица 3.5 – Результаты гармонического анализа симметрированной

обмотки (z=24, 2p=6)

v	k_{Yv}	k_{D0v}	k_{Drv}	k_{Ddv}	k_{W0v}	H_{0v}	k_{Wrv}	H_{rv}	k_{Wdv}	H_{dv}
1	0,5	0,110	0,136	0,050	0,068	0,216	0,025	0,079	0,055	0,174
3	1,0	0,000	0,000	0,945	0,000	0,000	0,945	1,000	0,000	0,000
5	0,5	0,265	0,065	0,142	0,033	0,021	0,071	0,045	0,132	0,084
7	0,5	0,110	0,050	0,136	0,025	0,011	0,068	0,031	0,055	0,025
9	1,0	0,588	0,011	0,185	0,011	0,004	0,185	0,065	0,588	0,207
11	0,5	0,265	0,142	0,065	0,071	0,021	0,033	0,009	0,132	0,038
$S_D=0,103849$		$S_R=1,04444$		$S_0=0,048106$		$\tau_d=0,19640$		$\tau_{da}=0,14829$		

Во вторых, в последней строке выделены интегральные показатели гармонического состава ЭДС (МДС) обмоток, включающие в себя S_D , S_R , S_0 , представляющие собой суммы квадратов относительных амплитуд H_{0v} , H_{dv} , H_{rv} добавочных гармоник и коэффициенты дифференциального рассеяния τ_d и τ_{da} . Первый из них τ_d трактуется традиционно [71] и оценивает относительные затраты энергии на создание полей этих гармоник, которые вызывают только увеличение добавочных потерь. Второй показатель τ_{da} представляет собой интерпретацию первого с учетом того факта, что в асинхронных машинах симметричные составляющие нулевой последовательности соответствующих магнитных полей не генерируют. Как следует из сопоставления указанных данных все перечисленные показатели последних строк таблиц 3.4 и 3.5 в обмотке, симметрированной с применением разработанного программного обеспечения уменьшились.

Аналогичным образом программное обеспечение позволяет осуществлять синтез симметрированных двухфазных обмоток.

Можно прийти к выводу что разработанная подсистема автоматизированного синтеза слабо несимметричных многофазных обмоток, основанная на методике симметрирования [24] по рабочей гармонике и использовании метода симметричных составляющих [23], характеризуется высоким уровнем наглядности, простотой использования и глубиной анализа основных электромагнитных свойств проектируемых обмоток, что, как подтверждает приведенный пример, может существенно повысить эффективность их синтеза. Подробнее работа подсистемы симметрирования рассмотрена в приложении Б.

3.4. Примеры применения подсистемы при симметрировании обмоток

Рассмотрим примеры симметрирования с применением подсистемы для чисел пазов $z = 48$ и $z = 42$ при $2p = 6$. Пример симметрирования обмотки с $z = 30$ при $2p = 6$ вынесен в приложение В.

3.4.1. Симметрирование шестиполюсной обмотки в 48 пазов

Рассмотрим в первую очередь обмотку с $z=48$, $2p=6$, $y=8$. В связи с тем, что машины с таким числом пазов на статоре широко распространены и часто встречаются в ремонте, рассмотрим процесс симметрирования обмотке подробнее.

Исходной числовой ряд имеет вид: 3, 3, 2. Тогда распределение АКС по пазам и фазам имеем такой:

Фаза *A*: 1, 2, 3, -9, -10, -11, 17, 18, 19, -25, -26, -27, 33, 34, 35, -41, -42, -43;

Фаза *B*: 7, 8, -15, -16, 23, 24, -31, -32, 39, 40, -47, -48;

Фаза *C*: 12, 13, 14, -20, -21, -22, 28, 29, 30, -36, -37, -38, 44, 45, 46, -4, -5, -6.

На рис. 3.17 представлено панель ввода данных до симметрирования.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы			АКС для 2-ой фазы			АКС для 3-ей фазы		
18	12	18						

для 1-ой фазы: Z0=48

1n/w	2n...	3n/w	4n...	5n/w	6n...	7n/w	8n...	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...	17...	18...
1	2	3	-9	-10	-11	17	18	19	-25	-26	-27	33	34	35	-41	-42	-43
1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w	
7	8	-15	-16	23	24	-31	-32	39	40	-47	-48	▲
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	▼

для 3-ей фазы:

1n...	2n...	3n...	4n...	5n...	6n...	7n...	8n...	9n...	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...	17...	18...
12	13	14	-20	-21	-22	28	29	30	-36	-37	-38	44	45	46	-4	-5	-6
1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...	1...

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.17 – Панель ввода данных до симметрирования

После ввода исходных данных в программу, угловые координаты соответствующих векторов фаз составляют: $\varphi_A=45^\circ$, $\varphi_C=-67,5^\circ$, $\varphi_B=168,75^\circ$ (рис. 3.18), а их относительные сдвиги: $\varphi_{AB}=\varphi_{CB}=123,75^\circ$; $\varphi_{AC}=112,5^\circ$.

При этом амплитудное рассогласование составляет

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_B^*}{E_A^*} = \frac{17,0866 - 11,7694}{17,0866} = 0,31$$

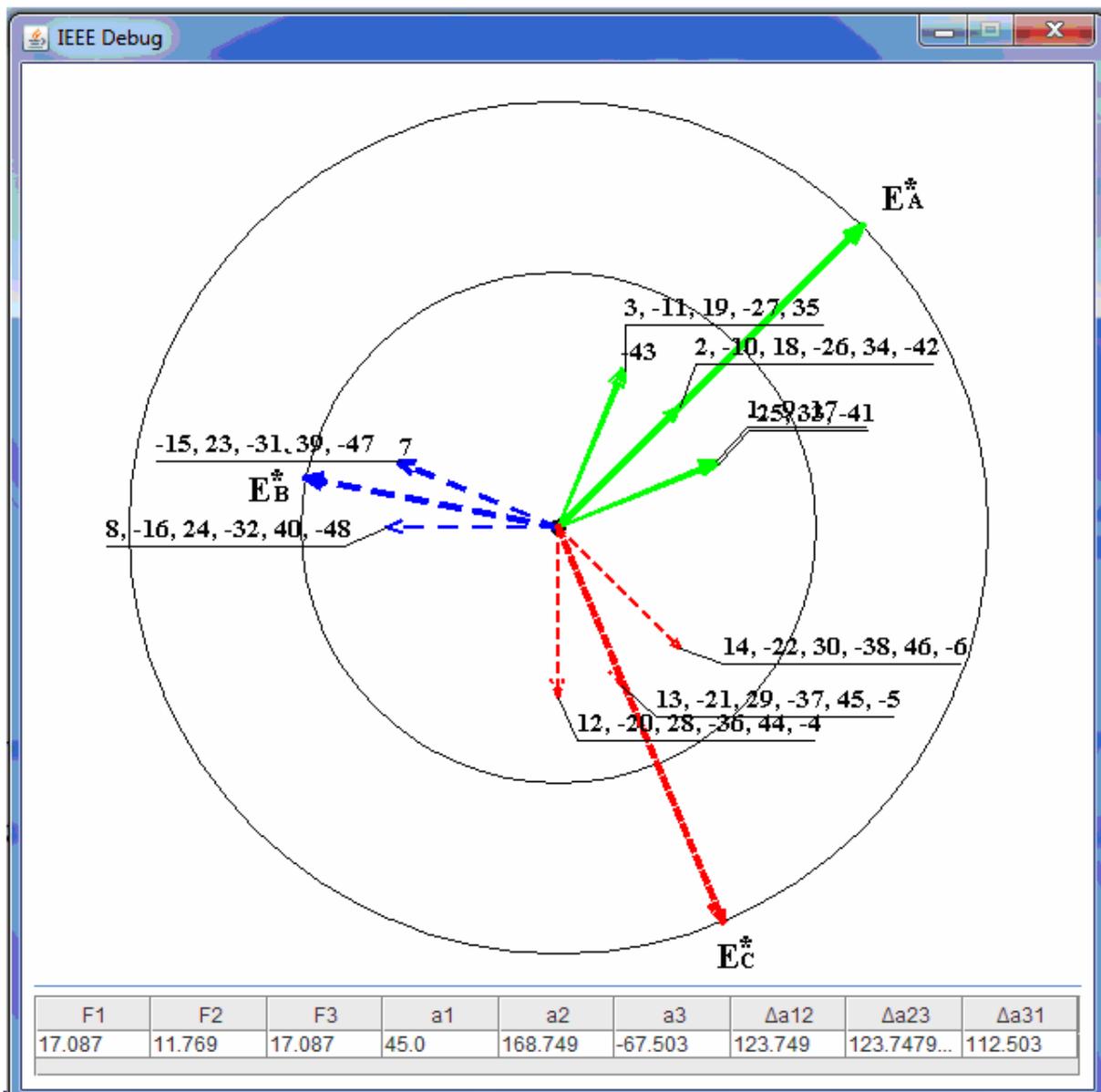


Рисунок 3.18 – Векторная диаграмма до симметрирования

$$c z = 48, 2p = 6$$

Полный гармонический анализ магнитного поля обмотки представлен в табл. 3.6 (прочерк соответствует нулевому значению).

Таблица 3.6 – Полный гармонический анализ обмотки
с ЧР = 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2 ($z=48$, $2p=6$) до симметрирования

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0.0549	0.0409	0.0134	0.1735	0.129	0.0423
2	-	-	-	-	-	-
3	0.1503	0.9556	0.0697	0.1573	1.0000	0.0729
4	-	-	-	-	-	-
5	0.0369	0.0416	0.0231	0.0233	0.0263	0.0146
6	-	-	-	-	-	-
7	0.0789	0.0081	0.0313	0.0356	0.0037	0.0141
8	-	-	-	-	-	-
9	0.6407	0.0660	0.0831	0.2235	0.0230	0.0290
10	-	-	-	-	-	-
11	0.0832	0.0184	0.0231	0.0239	0.0053	0.0066
12	-	-	-	-	-	-
13	0.0055	0.0346	0.0374	0.0013	0.0084	0.0091
14	-	-	-	-	-	-
15	0.1274	0.0948	0.1944	0.0267	0.0198	0.0407
16	-	-	-	-	-	-
17	0.0268	0.0275	0.0409	0.005	0.0051	0.0076
18	-	-	-	-	-	-
19	0.0747	0.0346	0.0027	0.0124	0.0058	0.0005
20	-	-	-	-	-	-
21	0.2250	0.1413	0.0626	0.0336	0.0211	0.0094
22	-	-	-	-	-	-
23	0.0627	0.0395	0.0081	0.0086	0.0054	0.0011
24	-	-	-	-	-	-

Эта обмотка несимметричная и имеет как угловую так и амплитудную несимметрии, которая выходит за допустимые границы. Необходимо выполнить симметрирование.

После выполнения симметрирования числового ряда

3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2,3 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2,3

имеем следующее распределение АКС по пазам и фазам:

Фаза *A*: 1, 2, 3, -9, -10, -11, 17, 18, -25, -26, -27, 33, 34, 35, -41, -42.

Фаза *B*: 7, 8, -14, -15, -16, 22, 23, 24, -31, -32, 38, 39, 40, -46, -47, -48.

Фаза *C*: -4, -5, -6, 12, 13, -19, -20, -21, 28, 29, 30, -36, -37, 43, 44, 45.

На рис. 3.19 представлено распределение активных катушечных сторон исследуемой обмотки.

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>	<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>				
<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>	<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>				
25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	
<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>	<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>				
<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>	<i>A</i>	<i>z</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>C</i>	<i>y</i>				

Рисунок 3.19 – Распределение АКС исследуемой обмотки

После ввода исходных данных в программу получаем угловые координаты и амплитуды векторов фаз, результаты расчета которых для рабочей гармоники представлены на рис. 3.20, а ВД на рис. 3.21.

Рисунок 3.20 – Панель ввода данных при симметрировании после распределения АКС

Угловая несимметрия после симметрирования числового ряда практически полностью устранена.

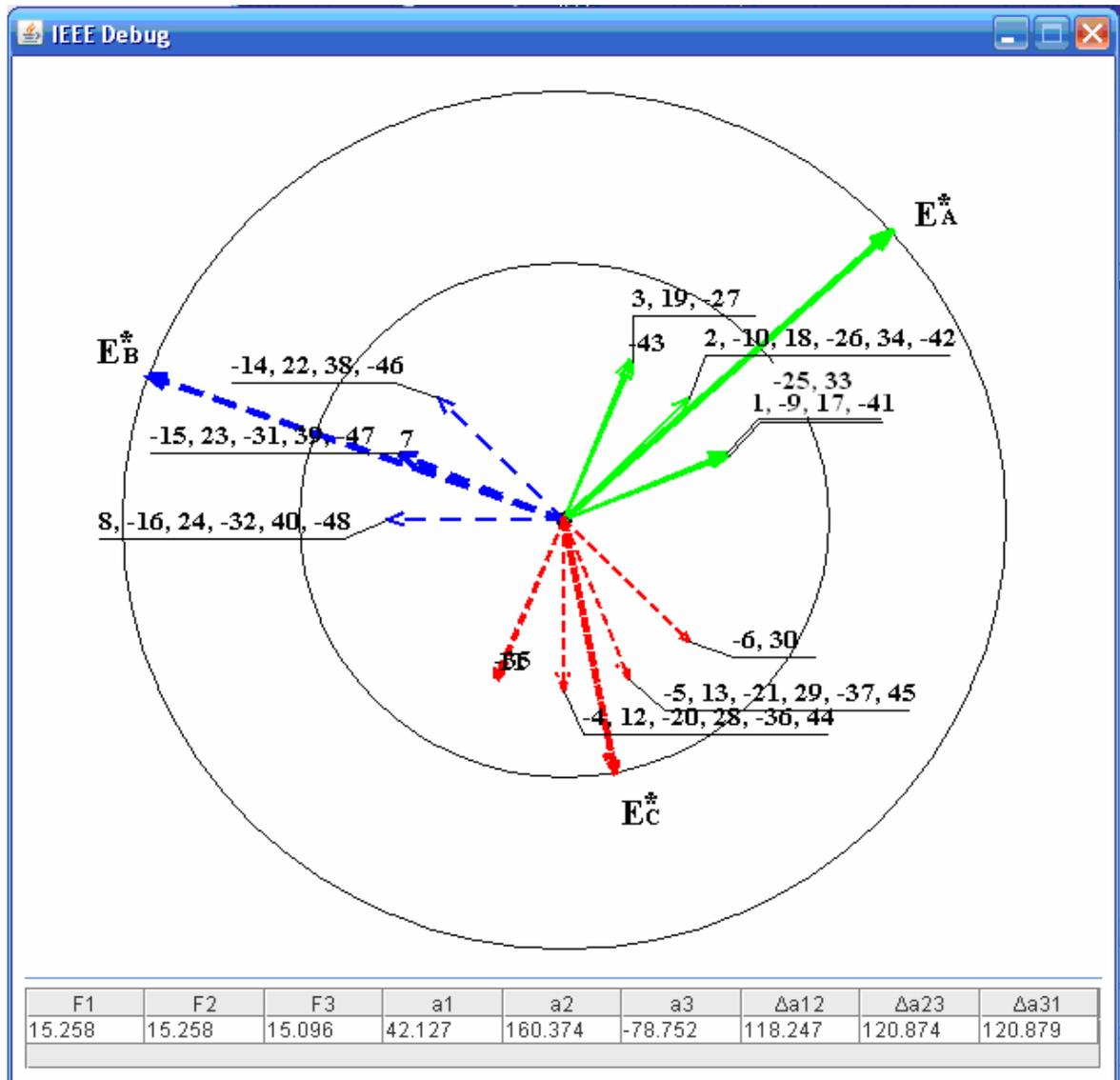


Рисунок 3.21 – Векторная диаграмма после завершения симметрирования с $z=48$, $2p=6$, $y=8$ без изменения числа витков катушек

Амплитуды результирующих векторов ЭДС стали равными: $E_A^* = E_B^* = 15,258$; $E_C^* = 15,0953$. Несимметрия по рабочей гармонике представляет составляет

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_B^*}{E_A^*} = \frac{15,0953 - 15,258}{15,0953} = 0,01 =$$

Таким образом, синтезированная методом оптимизации ЧР обмотка является практически симметричной по рабочей гармонике, что подтверждается результатом её полного гармонического анализа: $k_{wd} = 0,9502$; $k_{wr} = 0,0051$ (см табл.3.7.). Отсутствие симметрии по другим гармоникам и незначительное потокосцепление с полями гармоник нечетных порядков не должны оказывать сильного отрицательного влияния на работу двигателя с такой обмоткой. Четные гармоники магнитного поля полностью отсутствуют.

В данном случае преимуществом синтезированной обмотки является возможность использования равновитковых катушек, т.е. трудоемкость изготовления и укладки данной обмотки намного ниже рассмотренных неравновитковых обмоток.

Таблица 3.7 – Полный гармонический анализ обмотки

ЧР = 3, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 3 ($z=48$, $2p=6$) до изменения числа витков катушек

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0,0549	0,0409	0,0134	0,1735	0,129	0,0423
2	-	-	-	-	-	-
3	0,0118	0,9502	0,0051	0,0124	1	0,0053
4	-	-	-	-	-	-
5	0,0369	0,0416	0,0231	0,0233	0,0263	0,0146
6	-	-	-	-	-	-
7	0,0789	0,0081	0,0313	0,0356	0,0037	0,0141
8	-	-	-	-	-	-
9	0,6082	0,0129	0,0205	0,2134	0,0045	0,0072
10	-	-	-	-	-	-
11	0,0832	0,0184	0,0231	0,0239	0,0053	0,0066
12	-	-	-	-	-	-
13	0,0055	0,0346	0,0374	0,0013	0,0084	0,0091
14	-	-	-	-	-	-
15	0,036	0,0398	0,1677	0,0076	0,0084	0,0353
16	-	-	-	-	-	-
17	0,0268	0,0275	0,0409	0,005	0,0051	0,0076
18	-	-	-	-	-	-
19	0,0747	0,0346	0,0027	0,0124	0,0058	0,0005
20	-	-	-	-	-	-

Таблица 3.7 – (Продолжение)

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
21	0,1324	0,1045	0,0205	0,0199	0,0157	0,0031
22	-	-	-	-	-	-
23	0,0627	0,0395	0,0081	0,0086	0,0054	0,0011
24	-	-	-	-	-	-

Дальнейшим развитием рассматриваемой трехфазной обмотки ($z = 48$, $2p = 6$) является более симметричная обмотка, синтезированная применением второго метода симметрирования с изменением числа витков катушек. Расчет нового относительного числа витков в катушках проводится на основании данных о фазном и амплитудном рассогласовании ЭДС отдельных фаз в соответствии с рекомендациями в подразделе 3.2.

На рис. 3.22 и 3.23 представлены фрагмент ввода данных в подсистему с фазным и амплитудным симметрированием обмотки и результат симметрирования (векторные диаграммы ЭДС обмоток).

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
16	16	16

для 1-ой фазы: Z0=48

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
1	2	3	-9	-10	-11	17	18	-25	-26	-27	33	34	35	-41	-42
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
7	8	-14	-15	-16	22	23	24	-31	-32	38	39	40	-46	-47	-48
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
-4	-5	-6	12	13	-19	-20	-21	28	29	30	-36	-37	43	44	45
0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...	0.9...

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.22 – Панель ввода данных с фазным и амплитудным симметрированием ($z=48$, $2p=6$)

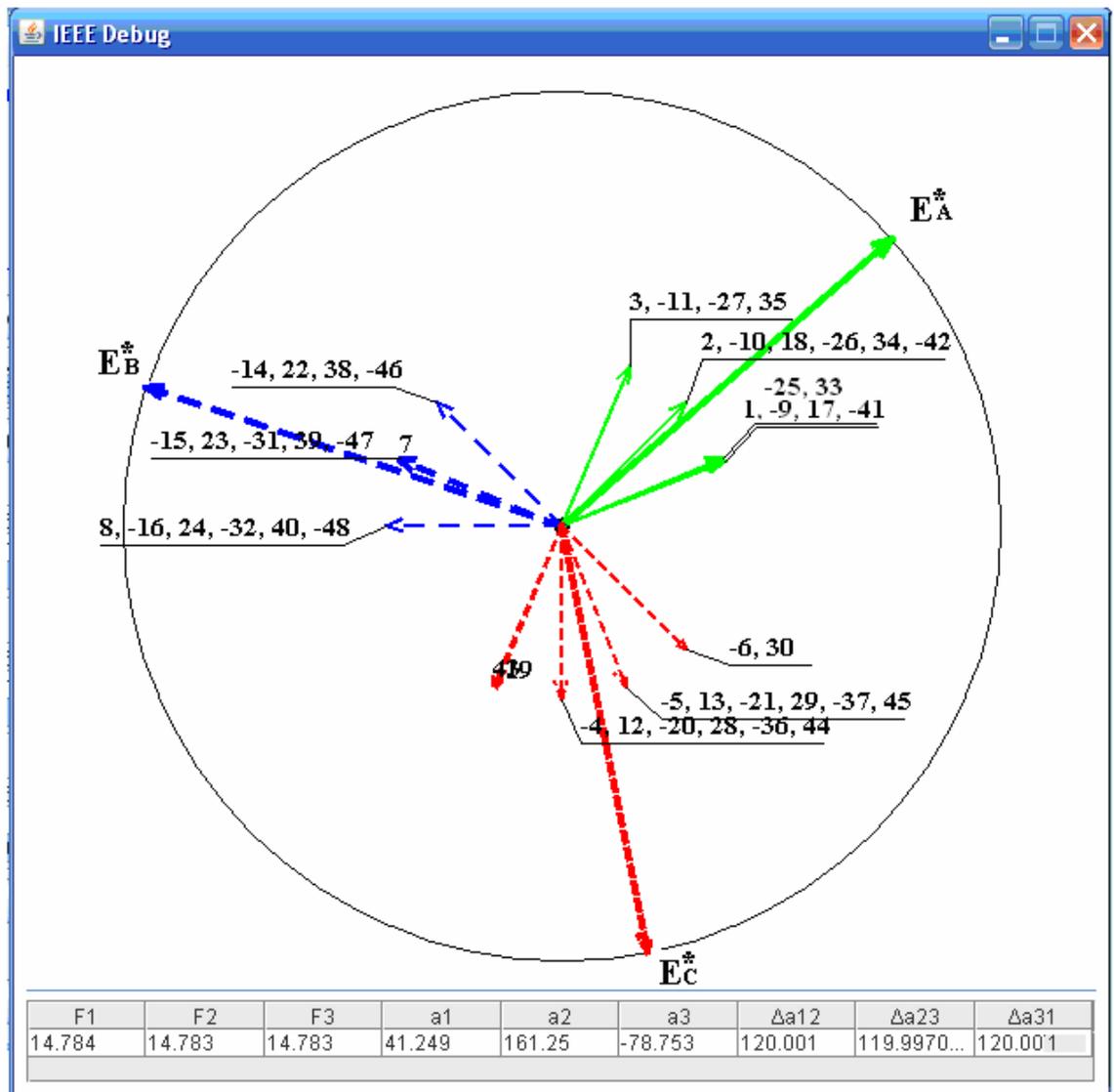


Рисунок 3.23 – Векторная диаграмма после завершения симметрирования с $z = 48$, $2p = 6$, $y = 8$ с изменением числа витков катушек

В табл. 3.8. представлен результат полного гармонического анализа несимметричной обмотки с неравновитковыми катушками, из которого видно, что синтезированная по рабочей (третьей) гармонике обмотка обладает полной симметрией $k_{wr} = 0$ и более высоким обмоточным коэффициентом $k_{wd} = 0,9514$. Как и ранее полностью отсутствуют гармоники, кратные двум.

Следует отметить, что общее количество проводников в статоре с

данной обмоткой уменьшится на 2,9 %. Этот фактор необходимо учитывать при выборе номинальной мощности двигателя с такой обмоткой.

Таблица 3.8 – Полный гармонический анализ обмотки с ЧР=3,3,2,3,2,3,2,3,3 ($z=48$, $2p=6$) после изменения числа витков катушек

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0,0523	0,0397	0,0088	0,1649	0,1253	0,0278
2	-	-	-	-	-	-
3	0	0,9514	0	0	1	0
4	-	-	-	-	-	-
5	0,0351	0,0393	0,0186	0,0221	0,0248	0,0117
6	-	-	-	-	-	-
7	0,0751	0,0118	0,0325	0,0336	0,0053	0,1466
8	-	-	-	-	-	-
9	0,6178	0,0344	0,0037	0,2164	0,0121	0,0134
10	-	-	-	-	-	-
11	0,0791	0,0212	0,0255	0,0226	0,0061	0,0073
12	-	-	-	-	-	-
13	0,0052	0,0307	0,0337	0,0012	0,0075	0,0082
14	-	-	-	-	-	-
15	0,0605	0,0471	0,1863	0,0127	0,0114	0,0452
16	-	-	-	-	-	-
17	0,0255	0,0230	0,0381	0,0047	0,0056	0,0093
18	-	-	-	-	-	-
19	0,0711	0,0352	0,0067	0,0117	0,0085	0,0016
20	-	-	-	-	-	-
21	0,1237	0,0850	0,0312	0,0185	0,0206	0,0076
22	-	-	-	-	-	-
23	0,0596	0,0389	0,0037	0,0081	0,0094	0,0009
24	-	-	-	-	-	-

3.4.2. Симметрирование шестиполусной обмотки в 42 пазах

Рассмотрим обмотку с $z=42$, $2p=6$, $y=7$.

Исходный числовой ряд имеет вид: 2, 3, 2. Тогда соответствующее распределение АКС по пазам и фазам имеет вид:

Фаза *A*: 1, 2, -8, -9, 15, 16, -22, -23, 29, 30, -36, -37.

Фаза *B*: 6, 7, -13, -14, 20, 21, -27, -28, 34, 35, -41, -42.

Фаза *C*: -3, -4, -5, 10, 11, 12, -17, -18, -19, 24, 25, 26, -31, -32, -33, 38, 39, 40.

Панель ввода исходных данных представлена на рис. 3.24.

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
12	12	18

для 1-ой фазы: **z=42**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w
1	2	-8	-9	15	16	-22	-23	29	30	-36	-37
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w
6	7	-13	-14	20	21	-27	-28	34	35	-41	-42
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1n...	2n...	3n...	4n...	5n...	6n...	7n...	8n...	9n...	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...	17...	18...
-3	-4	-5	10	11	12	-17	-18	-19	24	25	26	-31	-32	-33	38	39	40
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.24 – Панель ввода данных ($z=42$, $2p=6$)

После ввода исходных данных в программу получаем угловые координаты и амплитуды векторов фаз, результаты расчета которых для рабочей гармоники представлены в рис. 3.25.

При этом амплитудное рассогласование составляет

$$\Delta E^* = \frac{E_C^* - E_A^*}{E_C^*} = \frac{16,81 - 11,69}{16,81} = 0,43 =$$

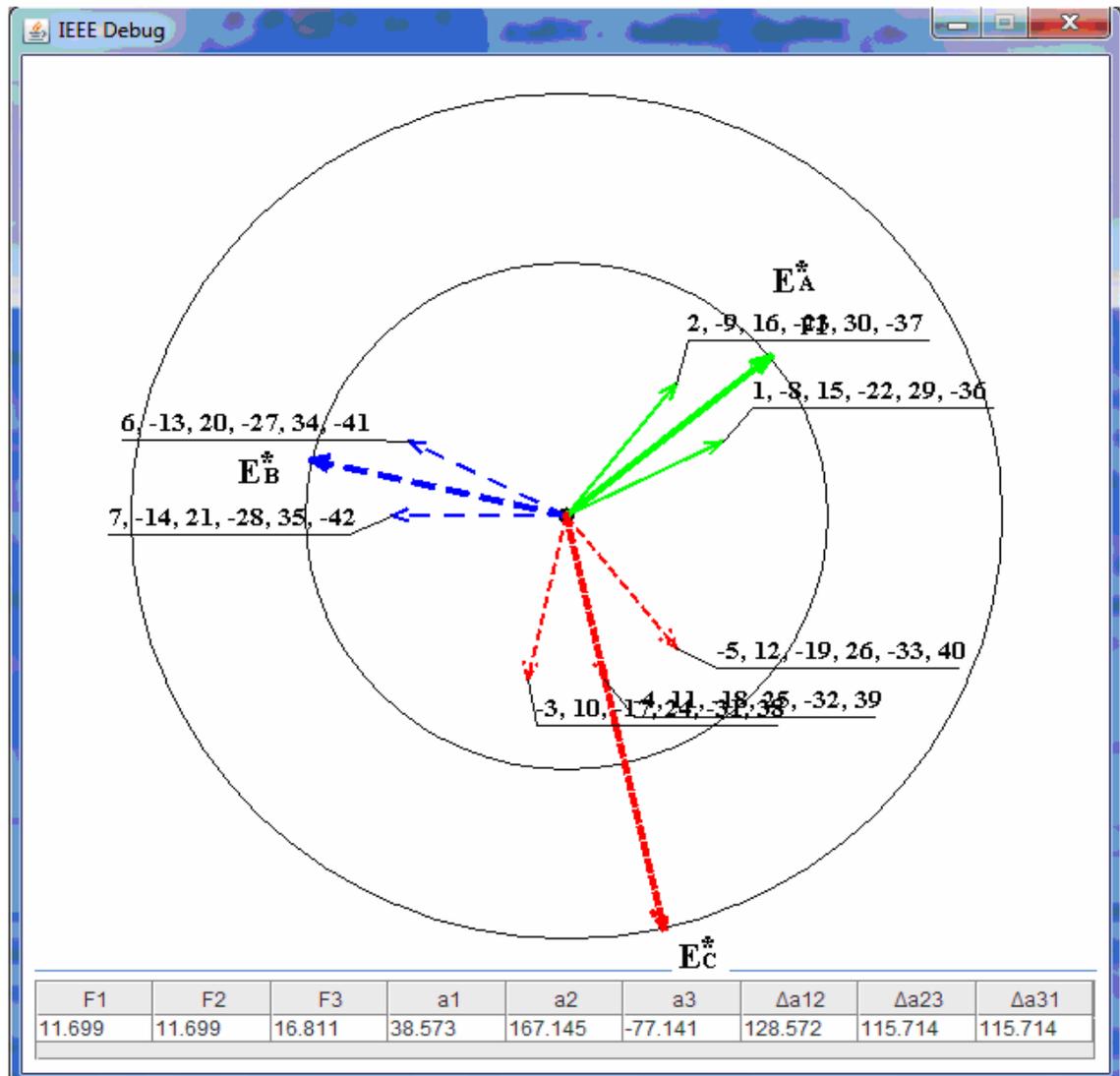


Рисунок 3.25 – Векторная диаграмма до симметрирования с $Z_1=42$, $2p=6$

Эта обмотка несимметричная и имеет как угловую так и амплитудную несимметрию, которая выхоте допустимой границы. Необходимо выполнить симметрирование.

После выполнения симметрирования числового ряда 2, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 2 имеем следующее распределение АКС по пазам и фазам:

Фаза *A*: 1, 2, -8, -9, 15, 16, 17, -22, -23, 29, 30, -36, -37, -38.

Фаза *B*: 5, 6, 7, -13, -14, 20, 21, -26, -27, -28, 34, 35, -41, -42.

Фаза *C*: -3, -4, 10, 11, 12, -18, -19, 24, 25, -31, -32, -33, 39, 40.

На рис. 3.26 указано распределение АКС исследуемой обмотки $Z_1 = 42$.

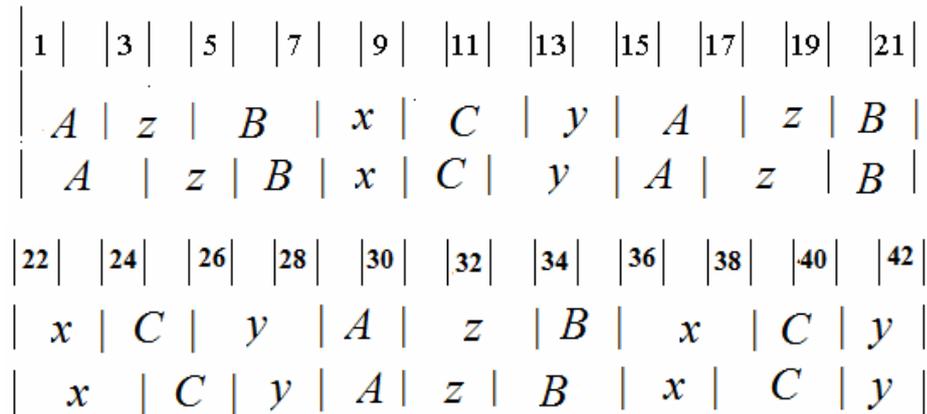


Рисунок 3.26 – Распределение АКС исследуемой обмотки $Z_1 = 42$

После ввода исходных данных в программу получаем угловые координаты и амплитуды векторов фаз, результаты расчета которых для рабочей гармоники представлены в рис. 3.27.

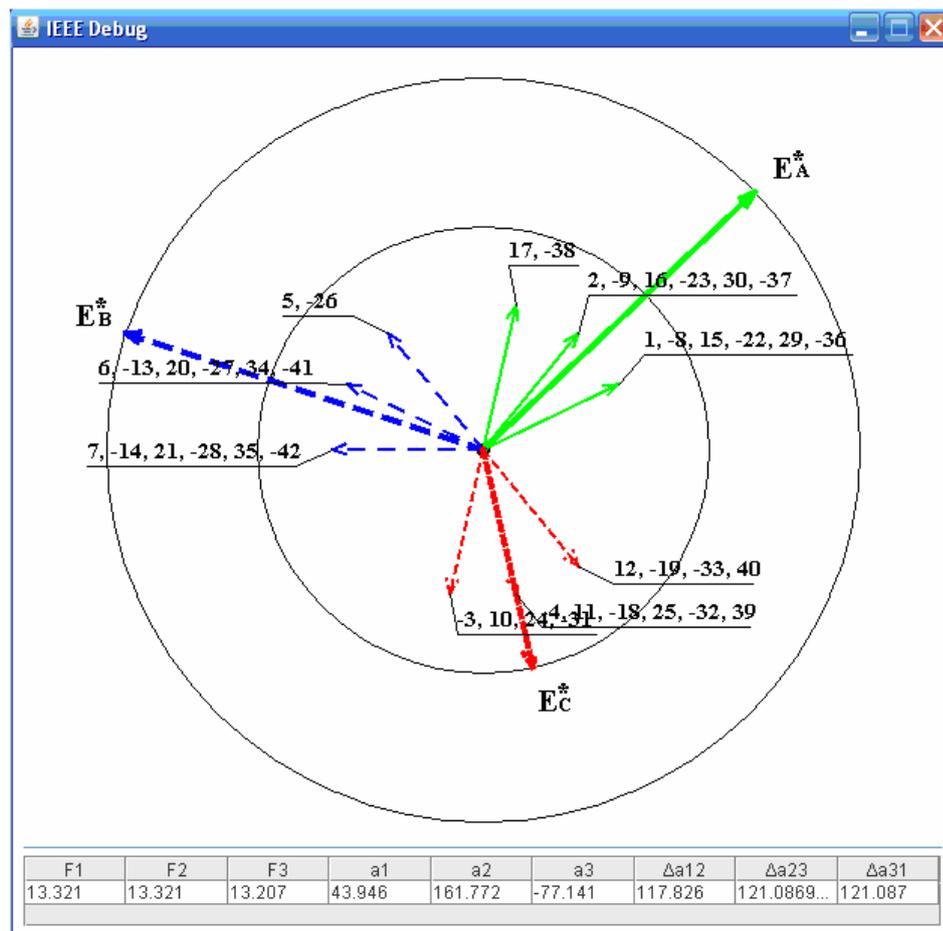


Рисунок 3.27 – Векторная диаграмма после распределения АКС

с $z=42$, $2p=6$, $y=7$

Угловые координаты соответствующих векторов фаз теперь составляют:

$$\varphi_A = 43,94^\circ; \varphi_C = -77,142^\circ; \varphi_B = 161,77^\circ;$$

а их относительные сдвиги:

$$\varphi_{AC} = \varphi_{CB} = 121,08^\circ; \varphi_{AB} = 117,83.$$

Угловая и амплитудная несимметрия после симметрирования числового ряда не устранена. Можно получить более симметричную обмотку путём применением второго метода - изменением числа витков катушек.

На рис. 3.28 приведена панель ввода данных при фазном симметрировании исследуемой обмотки $Z_1 = 42$. Соответствующая ей ВД приведена на рис. 3.29.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
14	14	14

для 1-ой фазы: **Z0=42**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w	13n/w	14n/w
1	2	-8	-9	15	16	17	-22	-23	29	30	-36	-37	-38
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.55...	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w	13n/w	14n/w
5	6	7	-13	-14	20	21	-26	-27	-28	34	35	-41	-42
0.5...	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w	13n/w	14n/w
-3	-4	10	11	12	-18	-19	24	25	-31	-32	-33	39	40
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.28 – Панель ввода данных

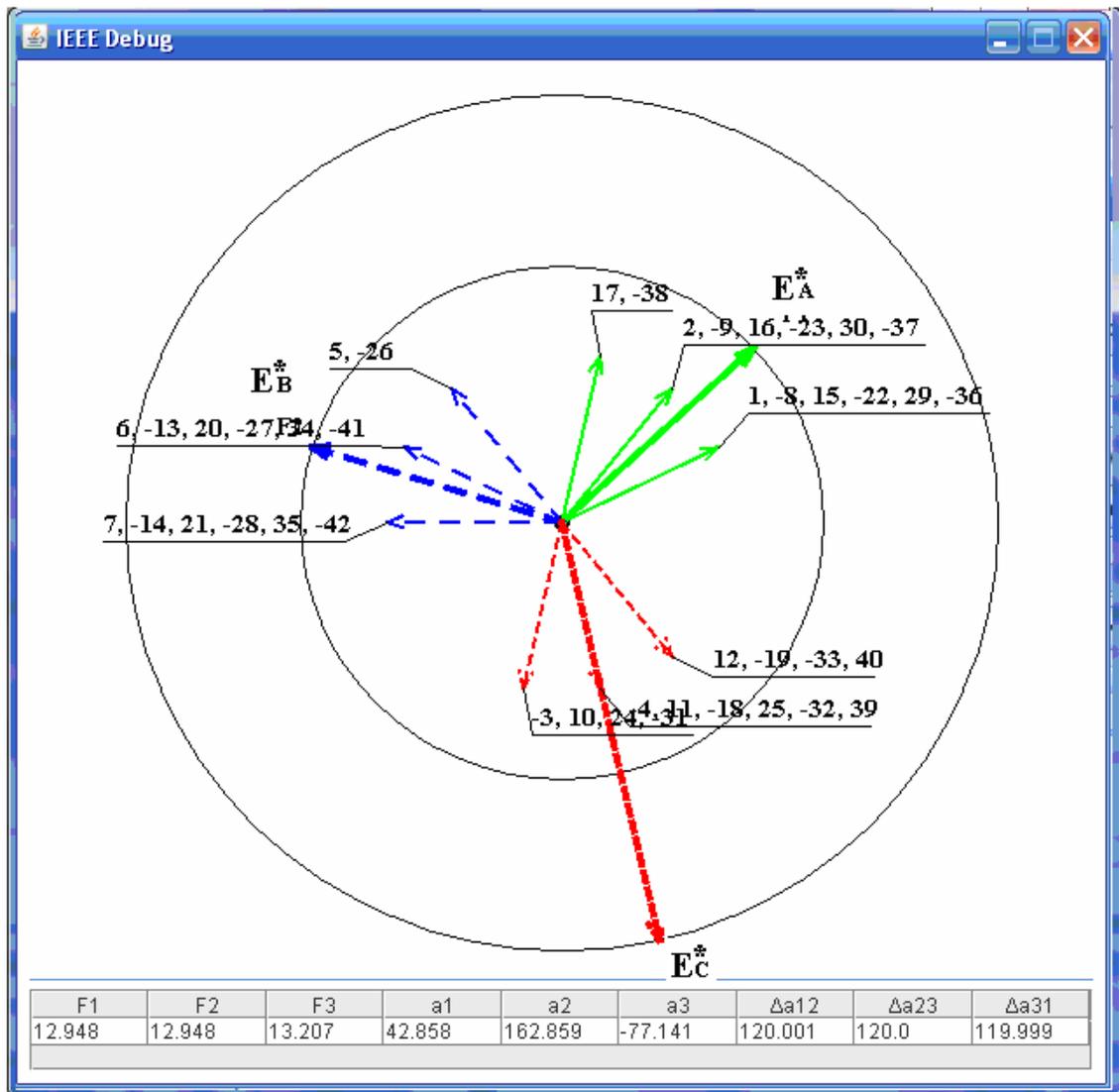


Рисунок 3.29 – Векторная диаграмма ЭДС трехфазной неравновитковой обмотки с фазовым симметрированием с $Z_1 = 42$, $2p = 6$

Относительные сдвиги: $\varphi_{AC} = \varphi_{CB} = \varphi_{AB} = 120,00$.

Амплитуды результирующих векторов ЭДС составляют:

$E_A^* = E_B^* = 12,94$; $E_C^* = 13,207$. А несимметрия по рабочей гармонике составляет

$$\Delta E = \frac{E_C^* - E_A^*}{E_C^*} = \frac{6,6 - 6,47}{6,6} = 0,02.$$

Для амплитудной симметрии, нужно одновременно уменьшить числа витков всех катушек в фазе С на 2%. Панель исходных данных для обмотки с уменьшенным числом витков в фазе С представлена на рис. 3.30, а ВД - рис. 3.31.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
14	14	14

для 1-ой фазы: **Z0=42**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w	11n/w	12n/w	13n/w	14n/w
1	2	-8	-9	15	16	17	-22	-23	29	30	-36	-37	-38
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.55...	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n...	11n/w	12n...	13n/w	14n...
5	6	7	-13	-14	20	21	-26	-27	-28	34	35	-41	-42
0.5...	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n...	11n/w	12n...	13n/w	14n...
-3	-4	10	11	12	-18	-19	24	25	-31	-32	-33	39	40
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок 3.30 – Панель ввода данных при амплитудном симметрировании

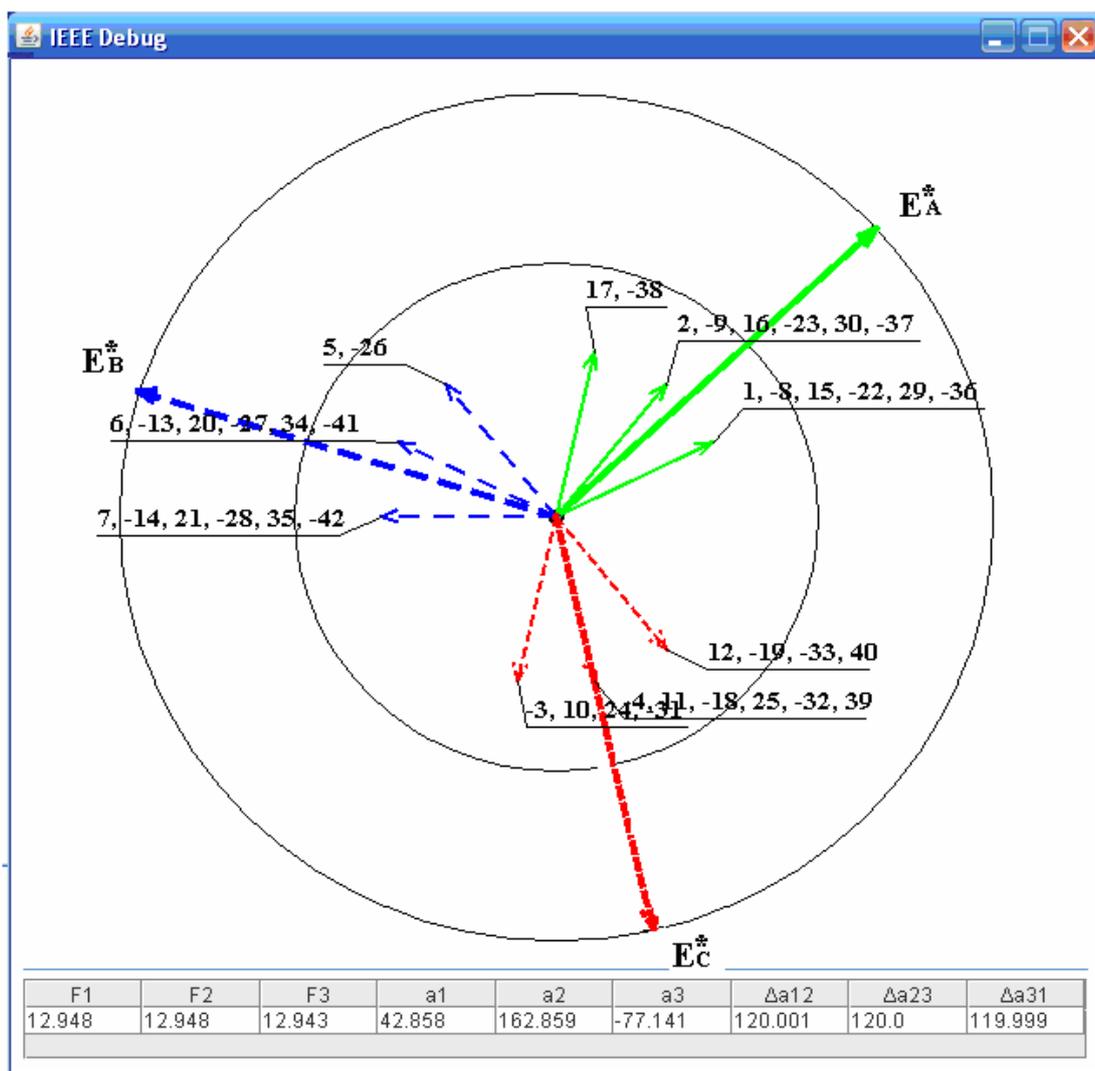


Рисунок 3.31 – Векторная диаграмма после завершения симметрирования с $z = 42$, $2p = 6$

Таким образом, полученная обмотка более симметричная по рабочей гармонике.

Как видно из результатов полного гармонического анализа (табл. 3.9.) синтезированная обмотка обладает преимущественным обмоточным коэффициентом по рабочей гармонике $k_{wd} = 0,9511$ и незначительным потокосцеплением с полями гармоник нечетных порядков. Полностью отсутствуют гармоники, которые кратны двум. Рабочая гармоника практически полностью симметрична, по другим гармоникам симметрия

отсутствует, но это не оказывает большого влияния на работу двигателя с такой обмоткой.

Таблица 3.9 – Полный гармонический анализ обмотки

ЧР=2, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 2 ($Z_1 = 42$, $2p = 6$)

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0,1078	0,0883	0,0140	0,1133	0,0928	0,0147
2	-	-	-	-	-	-
3	0,0063	0,9511	0,9514	0,0066	1,0000	0,0066
4	-	-	-	-	-	-
5	0,0194	0,0393	0,0263	0,0242	0,0485	0,0318
6	-	-	-	-	-	-
7	0,0874	0,0291	0,0291	0,0778	0,0268	0,0268
8	-	-	-	-	-	-
9	0,6175	0,0491	0,0006	0,2163	0,0172	0,0002
10	-	-	-	-	-	-
11	0,0787	0,0408	0,0116	0,0446	0,0235	0,0072
12	-	-	-	-	-	-
13	0,0545	0,0081	0,0445	0,0261	0,0033	0,0214
14	-	-	-	-	-	-
15	0,1246	0,0154	0,1858	0,0261	0,0030	0,0390
16	-	-	-	-	-	-
17	0,0787	0,0116	0,0408	0,0288	0,0046	0,0152
18	-	-	-	-	-	-
19	0,0194	0,0393	0,0263	0,0063	0,0127	0,0083
20	-	-	-	-	-	-
21	0,0291	0,0864	0,0864	0,0040	0,0129	0,0129

3.5. Выводы по разделу 3.

Предложен алгоритм симметрирования обмоток с равновитковыми катушками за счет оптимизации числового ряда, что позволяет значительно улучшить их гармонический состав.

Дополнительное изменение числа витков в самих катушках дает возможность добиться полной симметрии синтезируемых обмоток по рабочей гармонике.

Приведены примеры симметрирования обмоток с последующим их

гармоническим анализом, что подтверждает возможность существенного улучшения электромагнитных свойств несимметричных обмоток.

Рекомендованы для промышленного производства мелких серий электрических машин малой мощности равновитковые обмотки со слабым уровнем несимметрии, что позволяет не менять технологический процесс изготовления обмоток.

Предложены несимметричные обмотки с неравновитковыми катушками для ремонта двигателей, что позволяет в отдельных случаях изменить число полюсов обмотки без изменения числа пазов.

РАЗДЕЛ 4

РАСЧЕТ РАЗНОСТНЫХ ЭДС В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЯХ ОБМОТОК

При не выполнении условия равенства $2p/a$ целому числу в параллельных ветвях обмотки возникают разностные ЭДС и протекают уравнивающие токи.

Значительные уравнивающие токи ведут к увеличению потерь и быстрому выходу из строя обмоток. Значительные разностные ЭДС вызывают ухудшение энергетических показателей асинхронного двигателя и вызывают побочные шумовые и вибрационные эффекты, приводящие к недопустимости использования данных асинхронных двигателей в промышленных помещениях [31-34].

Таким образом, анализ величин разностных ЭДС и возникающих при этом уравнивающих токов в асинхронных двигателях является актуальной задачей, требующей решения.

Расчеты разностных ЭДС и уравнивающих токов являются очень трудоемкой работой, поэтому на расчет разностных ЭДС и уравнивающих токов тратится много времени. Для оптимизации работы целесообразно использовать вычислительную технику и специализированное программное обеспечение, которое увеличит скорость расчета.

В данном разделе рассматриваются возможности определения разностных ЭДС при любых вариантах образования параллельных ветвей произвольных многофазных обмоток и возможность возникновения разностных ЭДС при традиционных условиях с учетом особенностей их проявления в машинах переменного тока с учетом добавочных гармоник магнитного поля.

4.1. Особенности проявления внутренней несимметрии в электрических машинах переменного тока

С ростом величины тока в обмотках возникает необходимость прибегать к параллельному соединению катушечных групп. Одной из причиной роста тока обмотки может быть необходимость исполнения двигателя на низкое (безопасное) напряжение, например 42 В или 36 В. В этом случае любое неравенство результирующих ЭДС параллельных ветвей, как по величине, так и по фазе, опасно из-за возможности возникновения уравнивающих токов. Более широкому распространению обмоток с несколькими параллельными ветвями препятствует возникновение внутренней несимметрии на числе полюсов, некратном числу параллельных ветвей, которая проявляется в виде небаланса ЭДС отдельных параллельных ветвей внутри одной фазы. Это приводит к возникновению уравнивающих токов, протекающих по внутренним короткозамкнутым контурам статорной обмотки. В свою очередь, уравнивающие токи, относительная величина которых возрастает с увеличением габарита двигателей, вызывают появление дополнительных электрических потерь обмотки статора и добавочных гармонических составляющих в результирующем магнитном поле, неблагоприятно сказываясь на виброакустических характеристиках. Таким образом, внутренняя несимметрия при определенном сочетании величины небаланса ЭДС параллельных ветвей и габарита машины может явиться причиной существенного ухудшения энергетических и эксплуатационных показателей асинхронных короткозамкнутых двигателей [45].

4.2. Разработка алгоритма расчета разностных ЭДС

В известной литературе расчет разностных ЭДС обычно ограничивается определением этих значений только по рабочей гармонике [45,46] и применительно только к равновитковым обмоткам, что не всегда оправдано.

В общем случае катушки обмотки могут содержать неодинаковые числа витков, а ЭДС параллельных ветвей $\dot{E}_{P_{ik}}^*$ отличаться как по амплитуде $E_{P_{ik}}^*$, так и по фазе $\alpha_{P_{jk}}$, поэтому расчет разностных ЭДС $\Delta \dot{E}_{P_{ik}}^*$ рекомендуется выполнять с применением предлагаемой методики, алгоритм которой приводится ниже.

Исходными данными для расчета по данному алгоритму являются:

- число Z пазов сердечника, в котором уложена исследуемая обмотка;
- рабочее число пар полюсов p ;
- число рассматриваемых параллельных ветвей a ;
- числа N_j АКС в каждой из параллельных ветвей;
- знакопеременные массивы номеров пазов P_N , в которых уложены АКС каждой i -ой параллельной ветви $P_{Ni} = \{n_{1i}, n_{2i}, n_{3i}, \dots, n_{ij}, \dots, n_{Ni}\}$;
- массивы $W_{N_j}^*$ относительных чисел проводников (витков), соответствующих каждой АКС в i -ой параллельной ветви $W_{Ni}^* = \{w_{1i}^*, w_{2i}^*, \dots, w_{ij}^*, \dots, w_{Ni}^*\}$.

При необходимости указываются также шаг обмотки по пазам u и величина скоса b_{ck} .

1. Расчет угла α_Z минимального сдвига в магнитном поле $\alpha_Z = 2\pi/Z$.

2. Формирование массивов $A_{N_{ik}}$ угловых координат АКС в каждой из a параллельных ветвей по гармоникам k -го порядка в диапазоне изменения последних от 1 до $Z/2$ по выражению $A_{N_{ik}} = \{\alpha_{1ik}, \alpha_{2ik}, \dots, \alpha_{ijk}, \dots, \alpha_{N_{ik}}\}$;

$$\text{где } \alpha_{ijk} = \begin{cases} kn_{ij}\alpha_Z, \text{ если } n_{ij} > 0 \\ kn_{ij}abc(\alpha_Z) + \pi, \text{ если } n_{ij} < 0 \end{cases}$$

3. Определение абсолютных величин векторов $V_{P_{ik}}$ ЭДС каждой из a параллельных ветвей по гармоникам k -го порядка в диапазоне изменения

$$\text{последних от 1 до } Z/2 \quad V_{P_{ij}} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \sin[k\alpha_{ik}] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N_i} w_i^* \cos[k\alpha_{ik}] \right\}^2}.$$

4. Расчет обмоточных коэффициентов k_{wik} параллельных ветвей электрической машины:

– коэффициент распределения i -ой ветви k_{Dik} по гармонике порядка k

$$k_{Dij} = \frac{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^{N_j} w_i^* \sin[k\alpha_{ik}] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N_j} w_i^* \cos[k\alpha_{ik}] \right\}^2}}{N_i};$$

– обмоточный коэффициент $k_{wik} = k_{Dik} k_{Yk} k_{CKk}$

где

k_{Yk} – коэффициент укорочения;

k_{CKk} – коэффициент скоса по гармонике порядка k .

5. Определение угловых координат $A_{i(j)k}$ векторов результирующих ЭДС $\dot{V}_{i(j)k}$ каждой из a параллельных ветвей.

$$A_{Pi(j)k} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{i=1}^{N_j} w_{i(j)}^* \sin[k\alpha_{i(j)}]}{\sum_{i=1}^{N_j} w_{i(j)}^* \cos[k\alpha_{i(j)}]}.$$

6. Определение величины вектора ЭДС фазы V_{Php} , по рабочей гармонике $k=p$, равного среднему значению результирующих векторов ЭДС ветвей.

$$V_{Php} = \frac{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^a V_{Pip} \sin(A_{Pip}) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^a V_{Pip} \cos(A_{Pip}) \right]^2}}{a}.$$

7. Определение величин векторов ΔV_{Pijk} разностных ЭДС, равных относительной геометрической разности векторов ЭДС для всех возможных парных сочетаний (i и j) параллельных ветвей по гармоникам k -го порядка

$$\Delta V_{Pip} = \sqrt{\left[V_{Pijk} \sin(A_{Pijk}) - V_{Pijk} \sin(A_{Pijk}) \right]^2 + \left[V_{Pijk} \cos(A_{Pijk}) - V_{Pijk} \cos(A_{Pijk}) \right]^2}.$$

8. Определение относительных значений векторов ΔV_{Pijk}^* разностных ЭДС

$$\Delta V_{Pijk}^* = \frac{\Delta V_{Pijk}}{V_{Php}}.$$

Реальное значение разностной ЭДС ΔE параллельных ветвей зависит не только от коэффициента неуравновешенности f_{ijk} , но и от условий создания генерирующего магнитного поля в том или ином типе электрических машин.

В синхронных машинах все пространственные гармоники поля возбуждения вращаются с одинаковой скоростью. Но число полюсов k -ой гармоники в k раз больше, чем у первой, поэтому частота $f_k = f_1 \cdot k$.

При известном соотношении гармоник индукции B_k / B_p относительное значение разностной ЭДС E_{Pjk}^* по k -ой гармонике можно определить по выражению

$$\Delta E_{Pijk}^* = \frac{E_{Pijk} f_{ijk}}{E_{Pijk}} = \frac{2\sqrt{2} f w k_{Pw_{ik}} k_{CKk} B_k l_{\delta} \tau}{2\sqrt{2} f w k_{Pw_p} k_{CKp} B_p l_{\delta} \tau} f_{ijk} = \frac{k_{Pw_{ik}} k_{CKk} B_k}{k_{Pw_p} k_{CKp} B_p} f_{ijk}.$$

Если рассматриваются параллельные ветви в неявнополюсном синхронном генераторе, то можно полагать, что в первом приближении отношение индукций B_k / B_p можно заменить отношением МДС F_k / F_p ,

$$\text{поэтому } \Delta E_{Pijk}^* = \frac{k_{Pw_{ik}} k_{CKk} k_{OBw_k} p}{k_{Pw_p} k_{CKp} k_{OBw_p} k} f_{ijk}.$$

В асинхронных машинах все пространственные гармоники вращаются со скоростью в k раз меньшей, чем у первой. Поэтому $f_k = f_1$ и

$$\Delta E_{APK}^* = \frac{E_{PK} f_K}{E_{Php}} = \frac{1}{k} \frac{2\sqrt{2} f w k_{w_{ik}} k_{CKk} l_{\delta} \tau B_k}{2\sqrt{2} f w k_{w_p} k_{CKp} l_{\delta} \tau B_p} f_k = \frac{p}{k^2} \frac{k_{w_k}^2 k_{CKk}}{k_{w_p}^2 k_{CKp}} f_k.$$

4.3. Причины возникновения небаланса ЭДС параллельных ветвей

Отдельные катушки, последовательно соединенные с другими катушками или катушечными группами, образуют параллельную ветвь обмотки, ЭДС E_{PK} которой определяется по выражению

$$E_{PK} = k_{YK} e_{qK} = 2k_{YK} k_{DK} w_P E_{mk},$$

где w_P – число последовательно соединенных витков параллельной ветви.

Число параллельных ветвей a обмотки обычно выбирается из условий проектирования конкретной электрической машины и может быть принято равным любому простому сомножителю числа полюсов $2p$ или произведению таких сомножителей. Таким образом, в серийно применяемых обмотках максимальное число параллельных ветвей ограничивается числом полюсов: $a_{max} = 2p$.

Условие корректного формирования параллельных ветвей заключается в том, что для всех ветвей должно быть обеспечено равенство результирующих ЭДС \dot{E}_{rijk}^* по величине и фазе. В первую очередь это касается рабочей гармоники $k=r$, на чем обычно анализ состояния параллельных ветвей и заканчивается. Выше было показано, что отказ от учета возможности возникновения разностных ЭДС по нерабочим гармоникам не всегда является оправданным.

ЭДС в отдельных ветвях могут отличаться или по фазе, или по амплитуде, либо по обоим этим параметрам.

Если хотя бы одно из этих отличий имеет место, то возникает небаланс ЭДС параллельных ветвей. Степень этого небаланса оценивается разностными ЭДС \dot{E}_{rijk}^* , определяемыми как геометрическая разность результирующих ЭДС параллельных ветвей по указанным гармоникам

$$\dot{E}_{rijk}^* = \dot{E}_{Pik} - \dot{E}_{Pjk}$$

Результаты экспериментальной проверки предлагаемой методики анализа внутренней несимметрии изложены в работе [26,27] и в развернутом виде представлены в приложении Д.

4.4. Выводы по разделу 4

Предложена методика анализа внутренней несимметрии предлагаемых слабонесимметричных обмоток с несколькими параллельными ветвями, что дает возможность уже на стадии проектирования определиться со структурой обмотки и использовании необходимого числа параллельных ветвей.

Указанный алгоритм достаточно просто реализуется на любом из алгоритмических языков и может быть эффективно использован для оперативного контроля при любых вариантах образования параллельных ветвей произвольных многофазных обмоток.

РАЗДЕЛ 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

О целесообразности применения несимметричных обмоток, создаваемых на базе предлагаемой методики, можно судить только по результатам сопоставления основных технико-экономических данных электрических машин с традиционными симметричными и предлагаемыми обмотками. В настоящем разделе приведены результаты проектирования, изготовления и испытания экспериментального образца с последующим сравнительным анализом эксплуатационных показателей.

В предыдущих разделах выполнен синтез несимметричных трехфазных обмоток и исследованы их свойства. Основным требованием при выборе обмоток в этих условиях являлось минимальное отклонение от стандартного технологического процесса изготовления и укладки обмоток.

Возможные отклонения от типового технологического процесса при изготовлении и ручной укладке несимметричных обмоток заключаются в следующем:

- изготовление специальных намоточных шаблонов или использование шаблонов для механизированной раздельной укладки;
- наличие станков для намотки катушек с неодинаковыми числами витков;
- составление новой технологической инструкции для изготовления и укладки неравновитковых обмоток и обучение исполнителей.

Анализ особенностей предлагаемых несимметричных трехфазных обмоток показал, что их изготовление и укладка сопряжены с минимальными отклонениями от типовых техпроцессов обмоточно-изолирующего цикла.

5.1. Выбор структуры базового двигателя

Для экспериментальной реализации выбираем двигатель с числом пазов статора Z_1 равно 48 пазов. Этому условию удовлетворяет целый ряд

электрических машин, из которых (с целью упрощения условий проведения эксперимента) целесообразно выбрать наименьшую по габариту. Этому условию удовлетворяет двигатель 4A112MA8 [75].

Рассмотрим перепроектирование данной машины на шестиполусное исполнение $2p = 6$, $y = 8$. Числовой ряд обмотки, схема обмотки представлены на рис. 5.1. Данные о гармоническом составе этой обмотки представлены в 3-м разделе (табл. 3.11).

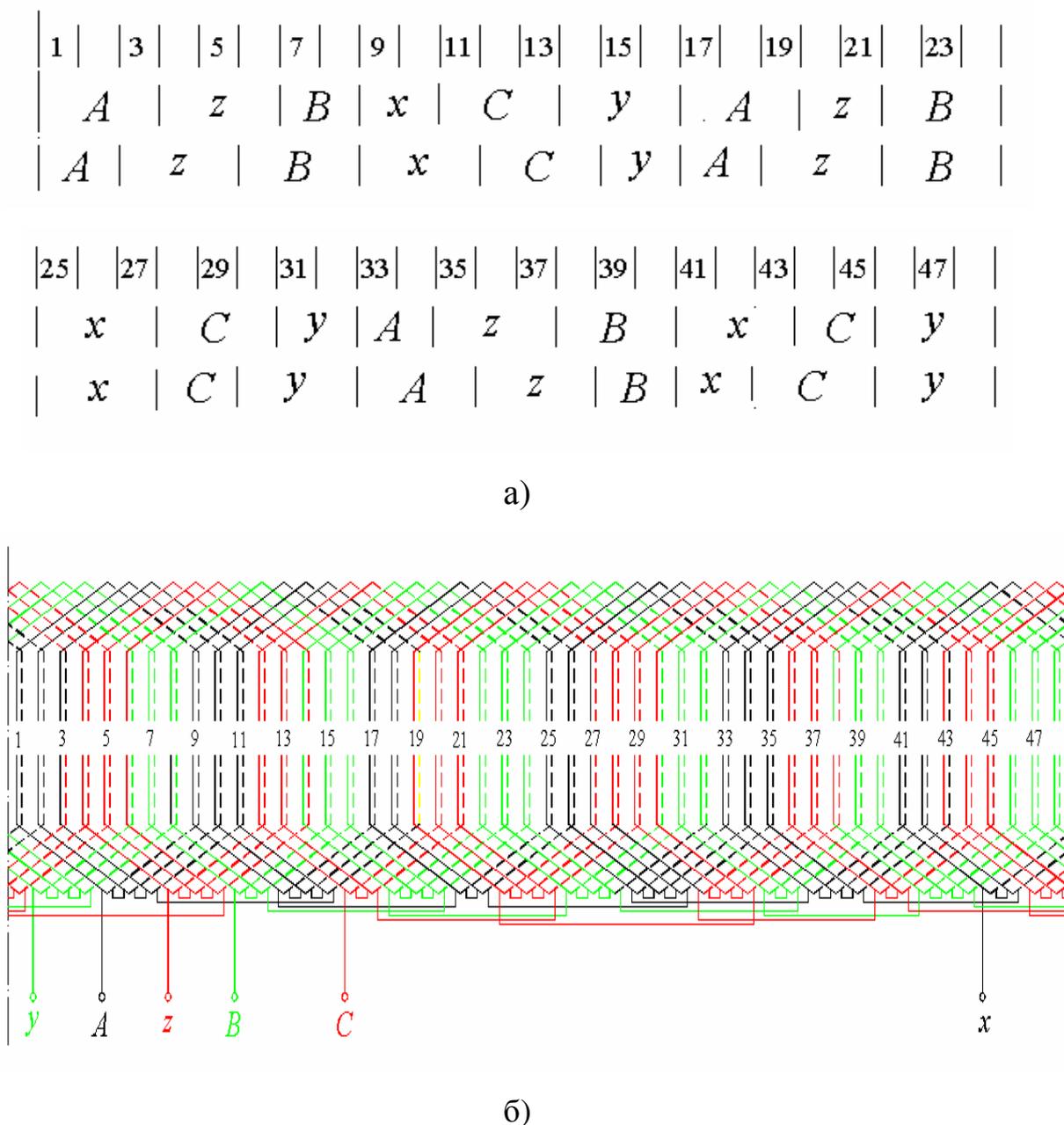


Рисунок 5.1 – Схема расположения активных катушечных сторон в пазах (а) и схема-развертка обмотки экспериментального двигателя (б)
($z = 48$, $2p = 6$, $y = 8$)

5.2. Основные параметры и обмоточные данные базового двигателя

Для изготовления двигателя с несимметричной обмоткой планировалось взять за основу асинхронный двигатель серии 4А112МА8 либо его аналоги серий АМУ или АИР с близкой геометрией активной части. Однако, в силу определенных причин, для этих целей удалось приобрести лишь асинхронный двигатель АИР112МА8У3 китайского производства, поставляемый в Украину фирмой «Магнум». После вскрытия выяснилось, что эта электрическая машина является аналогом АИР112МА8 лишь по числу зубцов статора, схеме обмотки (рис. 5.1) и высоте оси вращения. Вся остальная геометрия, включая форму паза статора, длину, внешний и внутренний диаметры пакета статора, число пазов ротора – отличались от известных данных АИР112МА8 [75]. Очевидно, что в этой машине была использована и электротехническая сталь, характеристики которой тоже могут существенно отличаться от известных характеристик отечественных сталей, данные которых использовались в этой работе при электромагнитных расчетах двигателей.

Поэтому, кроме снятия геометрических данных этой «неизвестной» машины, необходимых для проведения поверочных электромагнитных расчетов, требуется еще и проведение опытов холостого хода и короткого замыкания для оценки параметров и показателей базового двигателя.

Первичная информация о двигателе АИР112МА8 («Магнум»), намеченного к замене обмотки была взята с его заводской таблички.

В табл. 5.1. приведены сравнительные данные этой машины и серийной [76].

Таблица 5.1 – Сравнение данных базового двигателя

Данные двигателя АИР112МА8	параметр	ед.изм.	АИР Справ.[76]	АИР Магнум
Номинальная мощность двигателя	$P_{2н}$	кВт	2,2	2,2
Фазный ток	$I_{I\phi}$	А	6,14	6,3
Частота вращения двигателя	n_n	об/мин	707	710
Коэффициент полезного действия	η	%	76,5	76
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	о.е.	0,71	0,69
Кратность максимального момента	k_M	о.е.	2,2	2,2
Кратность пускового момента	$k_{П}$	о.е.	1,8	1,8

Результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, рассчитанные по [76] и двигателя «Магнум», представлены в табл. 5.2 и 5.3.

Из табл. 5.1, 5.3 видно, что двигатель АИР112МА8 «Магнум» в целом достаточно близок по своим показателям к серийной машине кроме суммарных потерь в стали и механических, которые оказались выше на 65% (на 132 Вт).

Поэтому, при сравнении технико-экономических показателей уже нового, перемотанного на $2p = 6$, двигателя с серийным общепромышленным аналогом, например АИР112МА6, следует обязательно учитывать завышенный уровень этих потерь экспериментального двигателя.

Таблица 5.2 – Данные опыта холостого хода базового двигателя АИР112МА8

Параметр	параметр	ед.изм.	АИР Справ.[76]	АИР Магнум
Фазное напряжение в опыте ХХ	$U_{0\phi}$	В	215,9	215,9
Фазный ток статора при $U_{0\phi}$	$I_{0\phi}$	А	3,81	3,15
Потребляемая мощность на ХХ	P_{01}	Вт	330	410
Коэффициент мощности	$\cos\varphi_0$	о.е.	0,14	0,20
Потери в обмотке статора	P_{e10}	Вт	127	75
Потери в стали и механические	$P_{мех} + P_{ст}$	Вт	203	335

Таблица 5.3 – Данные опыта короткого замыкания базового двигателя АИР112МА8

Параметр	параметр	ед.изм.	АИР Справ.[76]	АИР Магнум
Фазное напряжение в опыте КЗ	$U_{кф}$	В	65,8	65,8
Фазный ток статора при $U_{кф}$	$I_{1кф}$	А	6,31	6,34
Потери короткого замыкания	$P_{1к}$	Вт	813	810
Коэффициент мощности	$\cos\varphi_k$	о.е.	0,64	0,64
Полное сопротивление КЗ	z_k	Ом	10,42	10,38
Активное сопротивление КЗ	r_k	Ом	6,812	6,72
Индуктивное сопротивление КЗ	x_k	Ом	7,887	7,91

Кроме сравнения экспериментальных данных, для устранения случайных факторов, следует провести еще и расчетное сравнение двигателя с предлагаемой несимметричной обмоткой и серийного двигателя по результатам электромагнитного расчета. Это позволит провести параллельное сравнение экспериментальных показателей со справочными [68] и расчетных с расчетными.

Методика электромагнитного расчета должна позволять рассчитывать двигатели, как с традиционными, так и с предлагаемыми несимметричными обмотками. Данным условиям удовлетворяет программа «FLINT», разработанная на кафедре электрических машин Одесского политехнического института. В этой программе расположение катушечных групп обмотки в пазах статора задается в виде числового ряда с указанием числа эффективных проводников в каждом пазу.

Это дает возможность рассчитывать двигатели с обмотками любых конфигураций. О корректности выбора указанной программы можно судить по небольшой разнице между справочными и расчетными данными двигателей приведенными, по результатам «тестирования» серийных

асинхронных двигателей: 4А112МА8 (табл. 5.4) и 4А112МА6 (табл. 5.5). Результаты расчетов, на основании которых составлены указанные таблицы, представлены в приложении Е-1 и Е-2 .

Таблица 5.4 – Номинальные данные базового двигателя АИР112МА8

Данные двигателя АИР112МА8	z_1	$P_{2н},$ кВт	$I_{1ф},$ А	$\eta,$ %	$\cos\varphi,$ о.е.	$n_n,$ об/мин	$k_M,$ о.е.	$k_D,$ о.е.
Справочные [76]	48	2,2	6,14	76,5	0,71	707	2,2	1,90
Расчетные	48	2,2	6,27	76,6	0,693	712	2,22	1,89
Относительное расхождение, Δ %		0	2,1%	0	2,4%	0,7%	1%	0,1%

Таблица 5.5 – Номинальные данные базового двигателя АИР112МА6

Данные двигателя АИР112МА6	z_1	$P_{2н},$ кВт	$I_{1ф},$ А	$\eta,$ %	$\cos\varphi,$ о.е.	$n_n,$ об/мин	$k_M,$ о.е.	$k_D,$ о.е.
Справочные [76]	54	3,0	7,38	81,0	0,76	950	2,2	2,0
Расчетные	54	3,0	7,25	81,2	0,77	958	2,4	1,9
Относительное расхождение, Δ %	-	-	1%	0,2%	1%	0,5%	4%	5%

Расчетные и справочные значения параметров двигателей, приведенные в табл. 5.4 и 5.5, практически совпадают, что говорит о высокой адекватности математических моделей электромагнитных расчетов, заложенных в программу «FLINT». Вероятно, такой же высокой будет сходимость результатов расчетов двигателя и с несимметричной обмоткой.

5.3. Замена статорной обмотки базового двигателя и изготовление экспериментального образца

Двигатель с предлагаемой обмоткой на базе машины АИР112МА8, был изготовлен на Одесском электроремонтном предприятии “Контакт”. Для удобства новому перепроектированному двигателю с несимметричной обмоткой было присвоено обозначение АИР112МА6Н, внешний вид которого представлен на рис. 5.2. Копии Акта изготовления двигателя представлены в приложении Ж.



Рисунок 5.2 – Внешний вид двигателя АИР112МА6Н

Обмоточные данные базового двигателя приведены в табл. 5.6, где

- $d_{\text{гол}}$ – диаметр неизолированного провода;
- $d_{\text{из}}$ – диаметр изолированного провода;
- $S_{\text{п}}$ – число эффективных проводников в пазу;
- n – число элементарных проводников в эффективном ;

- k_3 – технологический коэффициент заполнения паза;
 k_{w1} – обмоточный коэффициент по рабочей гармонике;
 y – шаг обмотки по пазам;
 L_w – средняя длина витка.

Таблица 5.6 – Обмоточные данные двигателя АИР112МА6Н

Обозначение	$d_{гол}$	$d_{из}$	$S_{п}$	n	k_3	a	w	k_{w1}	y	L_w
Размерность	мм	мм	–	–	–	–	–	–	–	мм
Обмоточная записка	1,3	1,38	12+12	1	0,74	1	192	0,95	1-9	519

В табл. 5.7 приведены данные о геометрии активной части двигателя (обозначения параметров взяты из программы «FLINT»).

Таблица 5.7 – Геометрия двигателя АИР112МА6Н

Наименование параметров	обозн.	ед.изм.	знач.
Число пазов статора	Z	-	48
Длина пакета статора	$LT1$	мм	130
Внешний диаметр статора	DA	мм	170
Диаметр расточки статора	D	мм	121
ширина паза статора	$D3 / D4$	мм	5 / 6,3
высота паза статора	$HZ1$	мм	15
Воздушный зазор	δ	мм	0,5
Длина пакета ротора	$LT2$	мм	130
Диаметр ротора	DR	мм	120
Число пазов ротора	z_k	-	44
Диаметр вала	DB	мм	32
Вес двигателя	$m_{дв}$	кг	46

Пересчет числа витков обмотки осуществляется по приведенным ниже формулам. ЭДС (напряжение) фазы обмотки

$$U \approx E = 4,44 f w_{\phi} k_w \Phi \quad (5.1)$$

Для восьмиполюсной машины с учетом того, что $\tau = \pi \cdot D / 2p$

$$U = 4,44 f w_{\phi 8} k_{w8} B_{\delta} \frac{\pi D}{8}, \quad (5.2)$$

где

$w_{\phi 8}$ – число витков в пазу для $2p=8$;

k_{w8} – обмоточный коэффициент для $2p=8$;

B_{δ} – индукция в воздушном зазоре;

D – внутренний диаметр статора.

Тогда при условии сохранения индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{8U}{4,44 f w_{\phi 8} k_{w8} \pi D} = \frac{6U}{4,44 f w_{\phi 6} k_{w6} \pi D}. \quad (5.3)$$

где

$w_{\phi 6}$ – число витков в пазу для $2p=6$;

k_{w6} – обмоточный коэффициент для $2p=6$.

После сокращения получим

$$3w_{\phi 8} k_{w8} = 4w_{\phi 6} k_{w6}. \quad (5.4)$$

В результате число витков в фазе шестиполюсной обмотки

$$w_{\phi 6} = \frac{3}{4} \cdot \frac{w_{\phi 8} \cdot k_{w8}}{k_{w6}} = w_{\phi 8} \cdot \frac{3 \cdot 0,966}{4 \cdot 0,95} = 0,7626 \cdot w_{\phi 8}. \quad (5.5)$$

Учитывая, что число проводников в пазу $N_n = 6 \cdot a \cdot w / z_1$ пропорционально числу витков обмотки, то число проводников в пазу с новой обмоткой будет

$$N_{n6} = 0,7626 \cdot N_{n8} \quad 0,7626 \cdot 31 \quad 23,64.$$

Учитывая, что новая несимметричная обмотка двухслойная – округляем число проводников в пазу до 24, по 12 в каждом слое.

Данные новой несимметричной обмотки и геометрия активной части были использованы при электромагнитном расчете двигателя АИР112МА6Н с помощью программы «FLINT». Результаты расчета приведены в приложении. К особенностям расчета следует отнести использование в магнитопроводе электротехнической стали марки 2212, из-за отсутствия информации о материалах, использованных в реальном двигателе.

На рис. 5.3 и 5.4 представлены фотоматериалы, иллюстрирующие различные этапы изготовления экспериментального образца.



Рисунок 5.3 – Статор в процессе одного из этапов укладки



Рисунок 5.4 – Окончательный вид статора после окончания укладки обмотки

Кроме Одесского электроремонтного предприятия “Контакт” другой двигатель с подобной обмоткой был изготовлен и испытан в Ираке, в Багдадском университете (рис.5.5).



Рисунок 5.5 – Этапы изготовления и испытания экспериментального образца в Багдадском университете

5.4. Результаты испытаний экспериментального образца

Перед проведением испытаний и последующим анализом полученных характеристик следует определиться с новой номинальной мощностью для двигателя АИР112МА6Н.

Номинальная мощность электрических машин, выпускаемых в одном габарите (высота оси вращения, длина), может изменяться в достаточно широких пределах. Например, для асинхронных двигателей с высотой оси вращения 112 мм и средней длины (типоразмеры «М», «МА») она составляет от 7,5 до 2,2 кВт в зависимости от числа полюсов. Поэтому при выборе номинальной мощности перепроектированного двигателя с измененной полюсностью следует исходить из номинального вращающего момента исходной базовой машины АИР112МА8, который составляет 29,8 Н·м. Следовательно, номинальный момент двигателя АИР112МА6Н должен оставаться на том же уровне. С учетом предполагаемого скольжения в 5% (как у АИР112МА6) номинальная мощность двигателя с новой обмоткой составляет 2974 Вт, что с погрешностью менее 1% можно округлить до стандартной мощности 3 кВт.

Двигатель АИР112МА6Н был испытан на Ново-Каховском электромашиностроительном заводе. При проведении испытаний, в качестве номинальной, была ошибочно принята мощность двигателя 3,5 кВт. Поэтому данные двигателя, соответствующие номинальной мощности 3 кВт, были определены по экспериментальным рабочим характеристикам. Копии Актов испытаний приведены в приложении Ж.

Ниже представлены экспериментальные данные опытов холостого хода (табл. 5.8) двигатель АИР112МА6Н, короткого замыкания (табл. 5.9) и рабочие характеристики (табл. 5.10) двигателя АИР112МА6Н. Развернутые результаты обработки экспериментальных данных также приведены в приложении З.

Таблица 5.8 – Результаты опыта холостого хода

$U_{10},$ B	$I_A,$ A	$I_B,$ A	$I_C,$ A	$I_{\text{ср}},$ A	$P_{10},$ Bm	$\cos\varphi,$ $o.e$	ΔP_{el} Bm	$\Delta P_{cm} + \Delta P_{mex},$ Bm
500	16,25	16,35	15,05	15,88	2482,5	0,180	1273,3	1209,2
460	12,06	12,08	11,06	11,73	1566,0	0,168	695,0	871,0
420	9,04	9,04	8,14	8,74	972,0	0,153	385,9	586,1
380	6,90	6,78	6,13	6,60	599,1	0,138	220,3	378,8
340	5,36	5,21	4,68	5,08	381,6	0,127	130,7	250,9
300	4,22	4,07	3,68	3,99	249,2	0,120	80,5	168,7
260	3,38	3,21	2,96	3,19	174,3	0,121	51,4	122,9
220	2,71	2,54	2,36	2,54	127,1	0,131	32,6	94,5
180	2,14	1,98	1,62	1,91	96,9	0,162	18,7	78,2
140	1,65	1,49	1,41	1,52	75,0	0,203	11,7	63,3

Таблица 5.9 – Обработанные результаты опыта короткого замыкания

$U_{кз}, B$	I_a, A	I_b, A	I_c, A	$I_{\text{ср}}, A$	$P_{I_{кз}}, Bm$	$\cos\varphi, o.e$	$Mn, H.m$
368	45,50	45,40	45,6	45,50	10434,09	0,360	94
324	38,20	38,00	38,4	38,20	7354,70	0,343	70
284	32,25	32,15	32,6	32,33	5269,22	0,331	52
247	27,75	27,65	27,9	27,77	3885,83	0,327	39
202	22,10	22,35	21,8	22,08	2458,13	0,318	24
127	14,14	14,02	14,4	14,21	1017,86	0,326	9
100	10,95	10,87	11,2	11,01	611,05	0,320	5
76	8,32	8,31	8,58	8,41	356,1233	0,322	2,5

Таблица 5.10 – Экспериментальные рабочие характеристики двигателя

АИР112МА6Н

$n,$ $об/мин$	$s,$ $\%$	$P_1,$ $кВт$	$P_2,$ $кВт$	$I_1,$ A	$\cos\varphi,$ $o.e.$	$\eta,$ $\%$	$M_2,$ $H.m$
997,0	0,30	0,599	0,000	6,603	0,138	0,00	0,00
977,4	2,26	2,079	1,391	6,750	0,468	66,89	13,59
969,4	3,06	2,610	1,869	7,035	0,563	71,61	18,41
961,9	3,81	3,105	2,288	7,525	0,626	73,69	22,71
947,4	5,26	3,974	2,987	8,490	0,711	75,17	30,10
935,4	6,46	4,730	3,552	9,515	0,755	75,10	36,26
923,1	7,69	5,432	4,056	10,390	0,794	74,67	41,95
902,8	9,72	6,525	4,764	11,955	0,829	73,02	50,39

Для оценки технических показателей на рис 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 приведены сравнения экспериментальных и расчетных рабочих характеристик двигателя с новой несимметричной обмоткой АИР112МА6Н. На рис. 5.6 представлены рабочие характеристики токов статора каждой из фаз. Из графиков видно, что максимальная разница между токами разных фаз составляет 7% в режиме частичной нагрузки и около 4% при номинальной мощности, что является допустимой величиной. Таким образом, новая симметрированная обмотка обеспечивает неплохую симметрию по токам статора, потребляемым из сети. Далее на рис. 5.7 и 5.8 приведены экспериментальные и расчетные рабочие характеристики $\cos\varphi$ и КПД. Расчетная и экспериментальная характеристики коэффициента мощности имеют хорошую сходимость (рис. 5.7), в то время разница в КПД объясняется повышенными потерями холостого хода экспериментального образца (рис. 5.8).

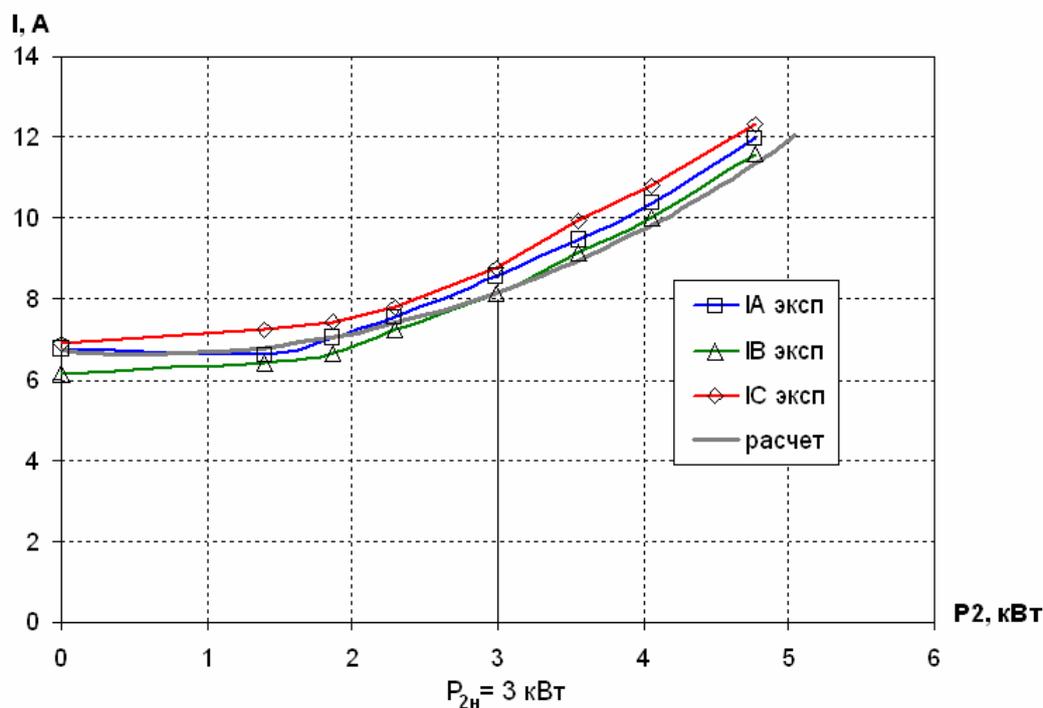


Рисунок 5.6 – Сравнение экспериментальных и расчетных рабочих характеристик двигателя АИР112МА6Н для тока статора I_1

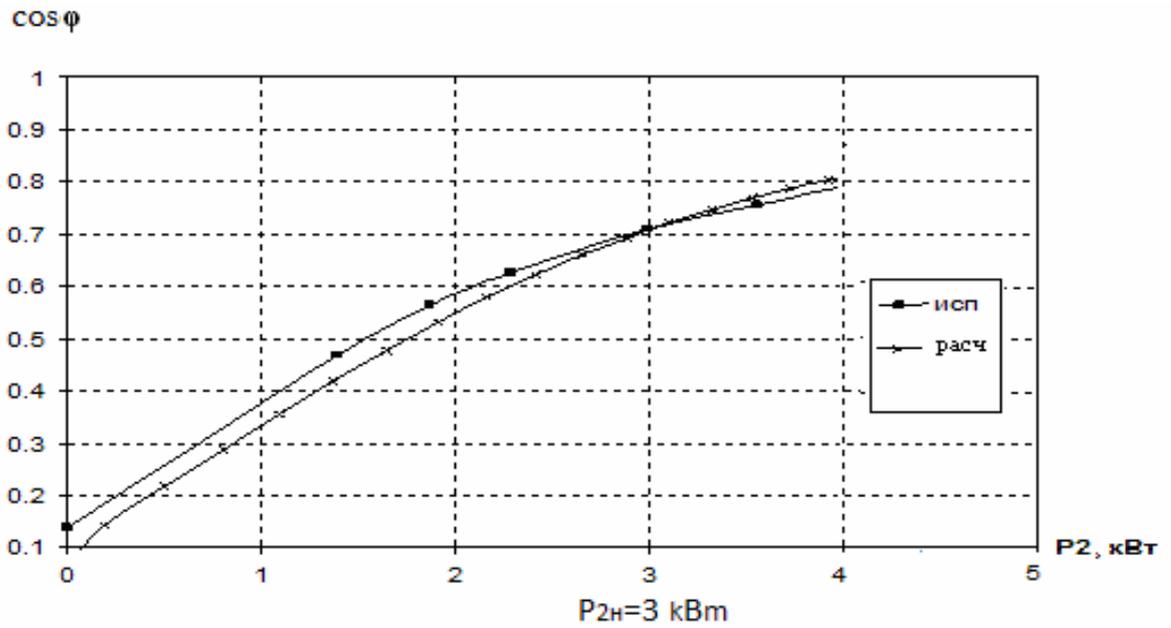


Рисунок 5.7 – Сравнение рабочих характеристик $\cos \varphi$ двигателя АИР112МА6Н

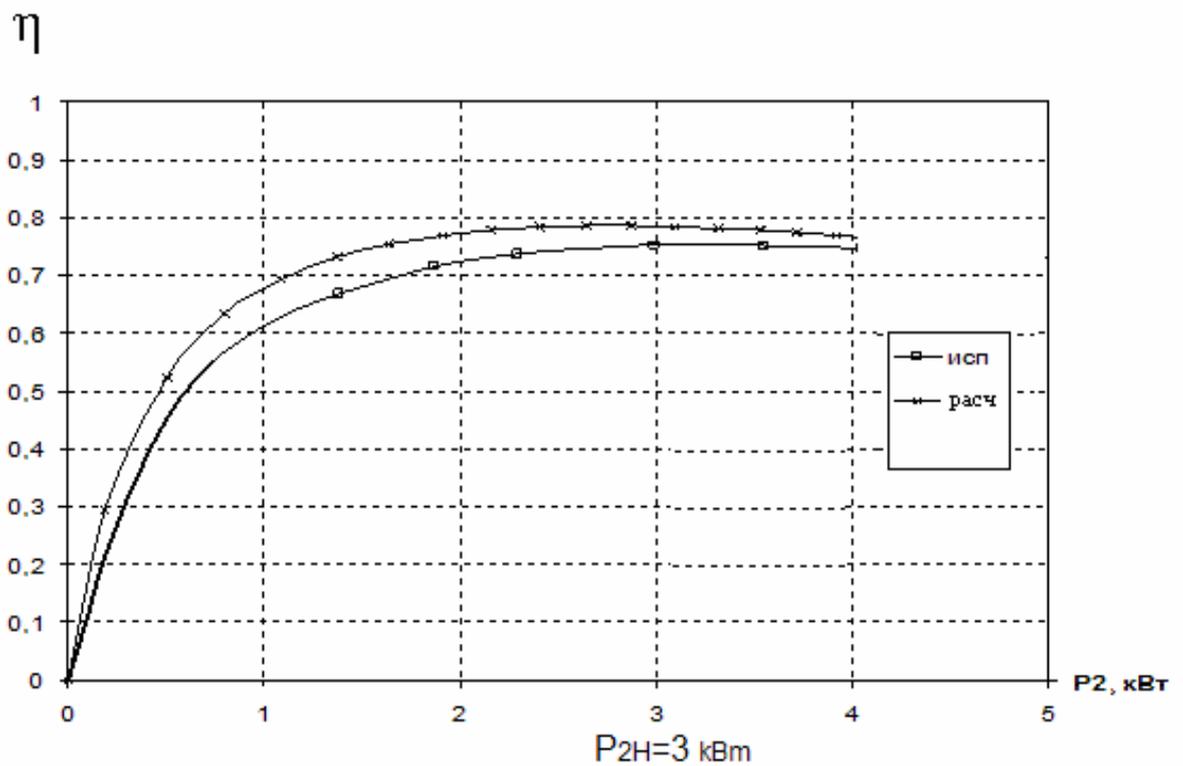


Рисунок 5.8 – Сравнение рабочих характеристик КПД двигателя АИР112МА6Н

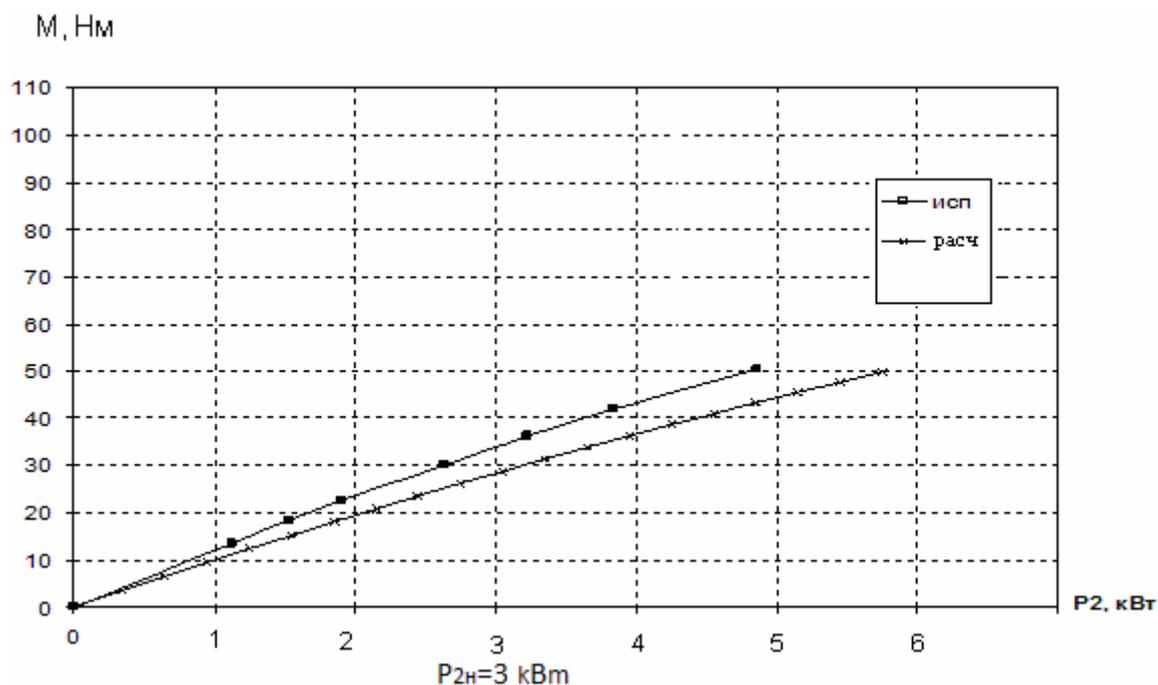


Рисунок 5.9 – Сравнение рабочих характеристик $M(P_2)$ двигателя АИР112МА6Н

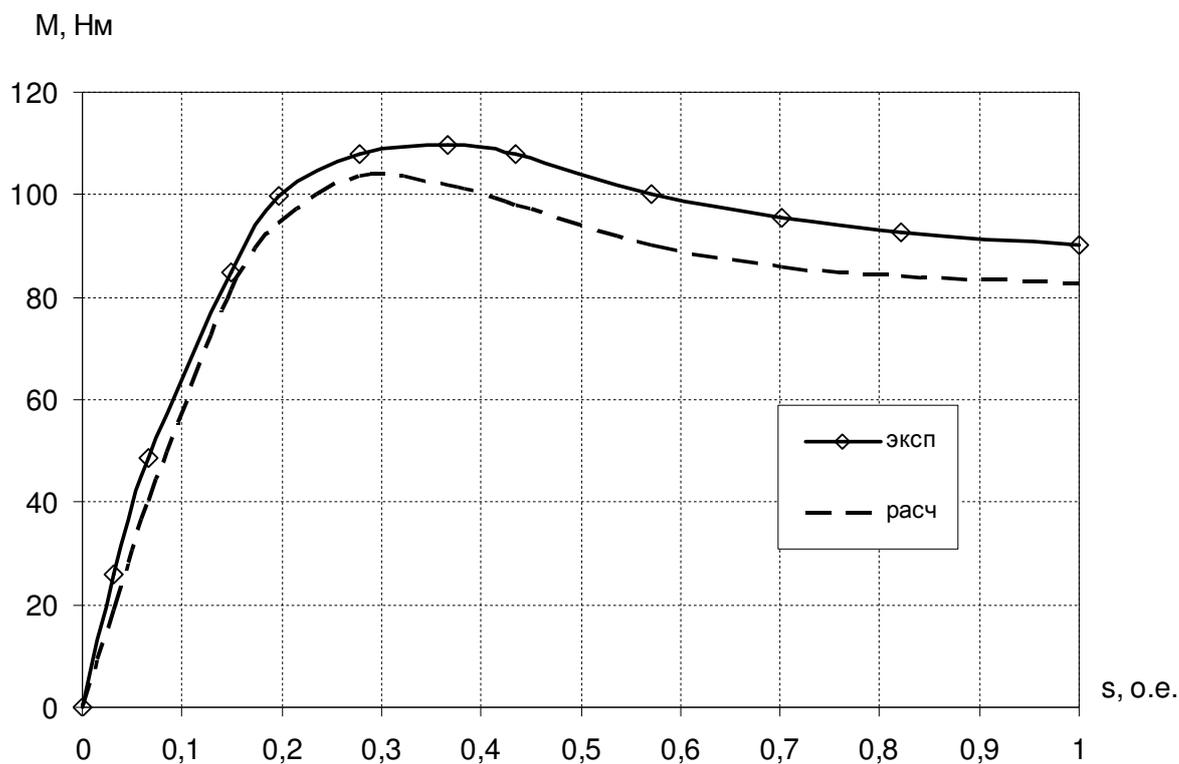


Рисунок 5.10 – Сравнение механических характеристик $M=f(s)$ двигателя АИР112МА6Н

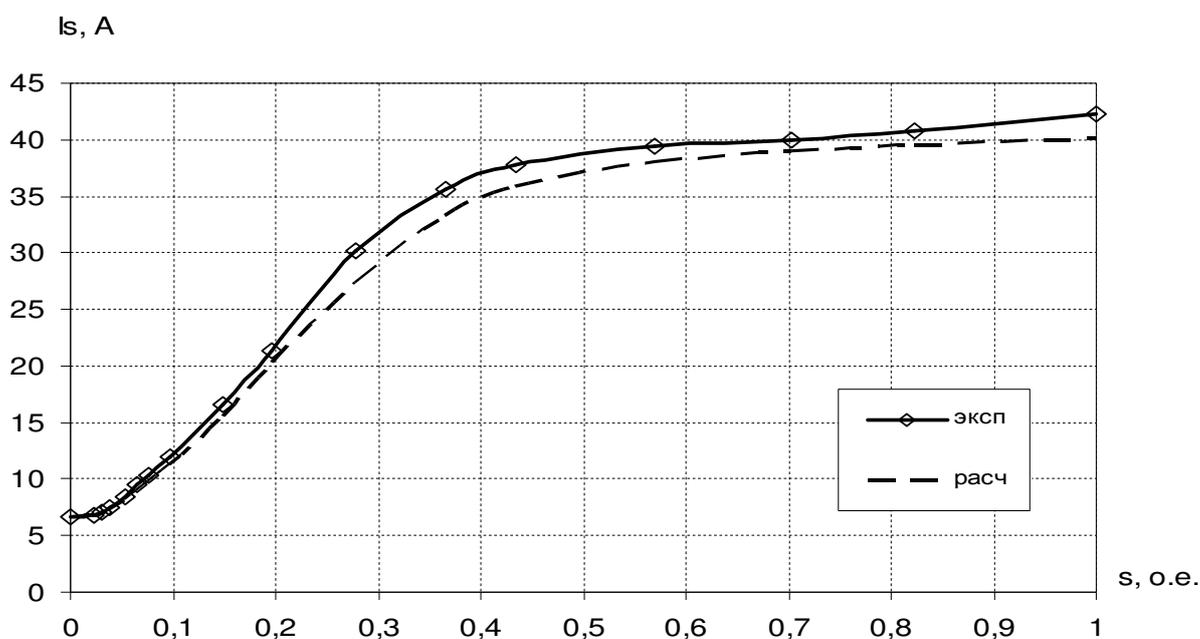


Рисунок 5.11 – Зависимость тока статора от скольжения $I_s=f(s)$ двигателя АИР112МА6Н

5.5. Сравнение расчетных рабочих характеристик серийного двигателя с числом пазов 54 с характеристиками двигателя с несимметричной обмоткой

В табл. 5.11 и на рис. 5.12 приведены результаты расчета рабочих характеристик серийного двигателя АИР112МА6 ($z=54$). А в табл. 5.12 и на рис. 5.13 – результаты расчета рабочих характеристик двигателя АИР112МА6Н с предложенной обмоткой ($z=48$).

Таблица 5.11 – Рабочие характеристики серийного двигателя

АИР112МА6 ($z_1=54$)

P2	s	P1	I1	$\cos \varphi$	КПД
кВт	o.e	кВт	A	o.e	o.e
0	0	0,25	3,72	0,101	0
0,04	0,001	0,29	3,72	0,119	0,15
0,08	0,002	0,33	3,72	0,137	0,26
0,13	0,003	0,38	3,73	0,155	0,34
0,17	0,004	0,42	3,73	0,172	0,41
0,26	0,006	0,51	3,75	0,207	0,51
0,34	0,008	0,60	3,77	0,241	0,57

Таблица 5.11(продолжение)

P2	s	P1	I1	cos φ	КПД
кВт	о.е	кВт	А	о.е	о.е
0,51	0,012	0,77	3,84	0,305	0,66
0,68	0,016	0,94	3,92	0,366	0,72
0,89	0,021	1,16	4,05	0,435	0,76
1,09	0,026	1,37	4,20	0,496	0,79
1,32	0,03	1,63	4,41	0,560	0,81
1,63	0,04	1,96	4,73	0,629	0,82
1,92	0,04	2,29	5,08	0,683	0,83
2,20	0,05	2,62	5,46	0,726	0,84
2,47	0,06	2,94	5,86	0,759	0,84
2,73	0,07	3,25	6,28	0,785	0,84
3,00	0,08	3,57	6,71	0,806	0,83
3,22	0,08	3,86	7,12	0,822	0,83
3,45	0,09	4,16	7,55	0,835	0,83
3,78	0,10	4,60	8,20	0,850	0,82

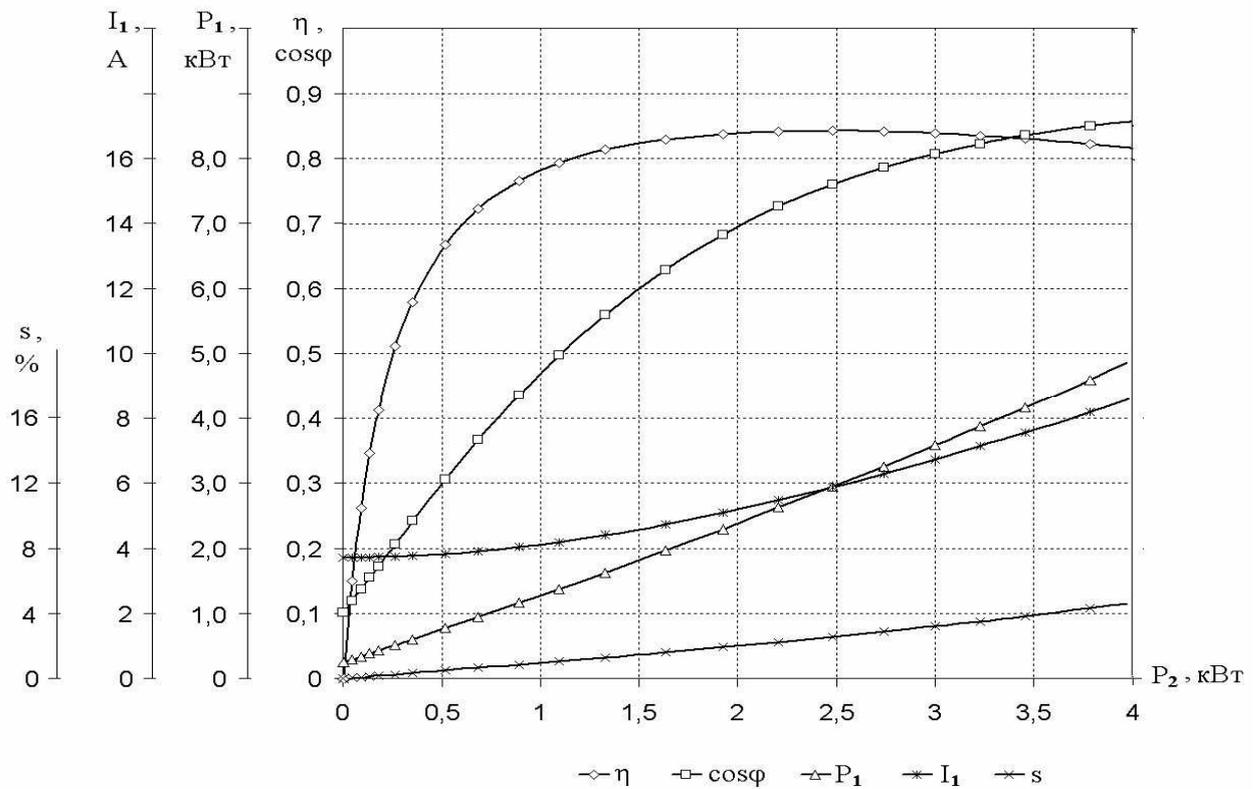


Рисунок 5.12 – Рабочие характеристики серийного двигателя ($z=54$, $2p=6$),
 $P_{2H}=3,0$ кВт

Таблица 5.12 – Расчетные рабочие характеристики спроектированного двигателя

P2	s	P1	I1	cos φ	КПД
кВт	о.е.	кВт	А	о.е.	о.е.
0,05	0,001	0,13	2,59	0,078	0,348
0,52	0,011	0,71	2,63	0,409	0,732
1,04	0,021	1,27	3,06	0,630	0,815
1,51	0,031	1,82	3,67	0,749	0,830
1,93	0,041	2,34	4,36	0,813	0,827
2,31	0,051	2,83	5,06	0,847	0,816
2,64	0,061	3,30	5,77	0,867	0,801
2,94	0,071	3,74	6,46	0,877	0,785
3,19	0,081	4,16	7,14	0,883	0,768
3,41	0,091	4,55	7,79	0,885	0,751
3,59	0,100	4,88	8,36	0,884	0,735

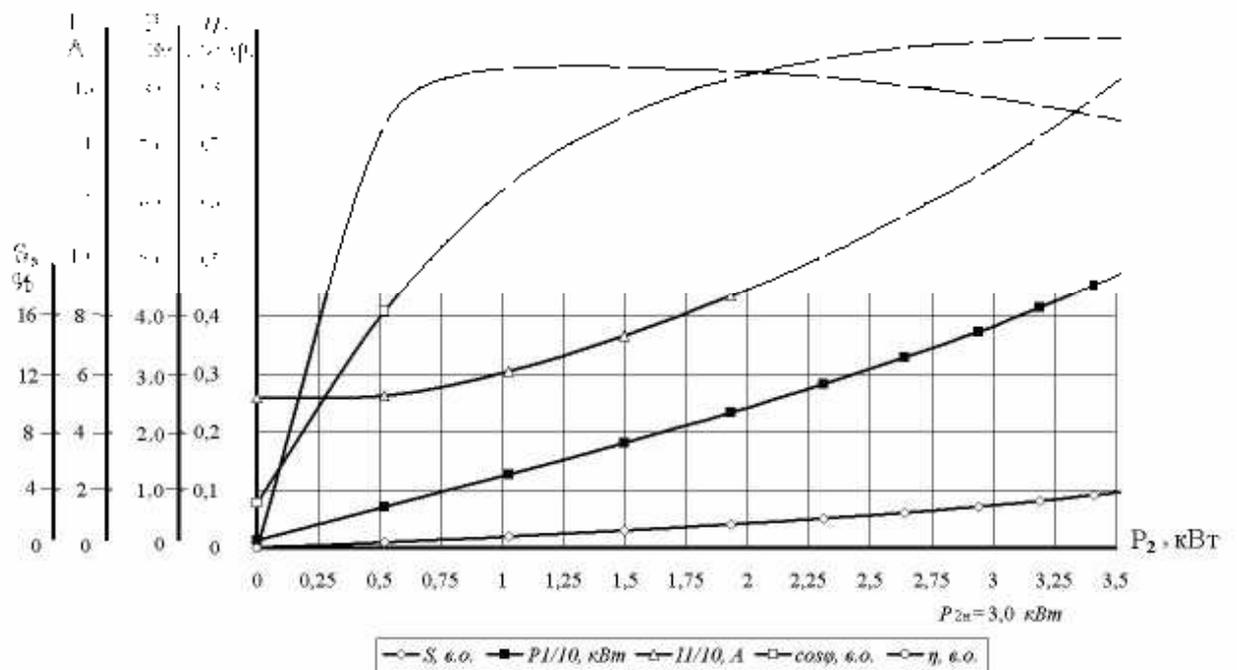


Рисунок 5.13 – Рабочие характеристики спроектированного двигателя ($z=48$, $2p=6$)

5.6. Сравнение расчетных и экспериментальных показателей двигателя с новой несимметричной обмоткой

Сравнение расчетных и экспериментальных показателей двигателя АИР112МА6Н приведено в табл. 5.13.

Таблица 5.13 – Сравнение расчетных и экспериментальных показателей двигателя АИР112МА6Н

Данные двигателя	$2p$	Z_1	$P_{2н},$ кВт	$I_{Iф},$ А	$\eta,$ %	$\cos\varphi,$ о.е.	$n_n,$ $\frac{об}{мин}$	$k_M,$ о.е.	$k_L,$ о.е.
Расчетные	6	48	3,0	7,95	80,5	0,71	930	3,33	2,9
Экспериментальный образец	6	48	3,0	8,11	78,6	0,71	947	3,5	3,1
Относительное расхождение, $\Delta\%$	-	-	-	2%	2,3%	0	1,8%	5%	6%

В табл. 5.14 приведено сравнение показателей двигателя с новой обмоткой с серийно выпускаемым аналогом.

Таблица 5.14 – Сопоставление расчетных показателей серийного двигателя и двигателя с новой несимметричной обмоткой

Двигатель	Z_1	q	$P_{2н},$ кВт	$I_{Iф},$ А	$\eta,$ %	$\cos\varphi,$ о.е.	$n_n,$ об/мин	$k_M,$ о.е.	$k_L,$ о.е.
АИР112МА6 (серийный)	54	3	3,0	7,25	81,0	0,76	950	2,2	2
АИР112МА6Н (эксперимент)	48	$2 \frac{2}{3}$	3,0	8,11	78,6	0,71	947	3,5	3,1
Относительное расхождение (серийн.-эксп.)	-	-	-	+11%	-2,9%	-6%	-0,3%	+59%	+55%

5.8. Выводы по разделу 5.

Проведены экспериментальные исследования макетного образца асинхронного двигателя с предлагаемой несимметричной обмоткой, которые показали, что все основные технические показатели незначительно уступают, а по некоторым позициям и превосходят серийные двигатели с традиционными симметричными обмотками.

Высокий пусковой и перегрузочный моменты экспериментального образца позволяют использовать данную машину в приводах с частыми пусками, в повторно-кратковременных режимах.

Использование модернизированного в ходе ремонта двигателя с новой несимметричной обмоткой позволит отказаться от использования редукторов, клиноременных передач и даже, в ряде случаев, преобразователей частоты. Учитывая возможную сложность компоновки и стоимость указанных устройств, отказ от их использования положительно отразится на затратах конечного потребителя.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный в работе подход к определению симметричных составляющих относительных величин ЭДС (МДС) положен в основу универсальной методики гармонического анализа, который позволяет анализировать двух- и трехфазные обмотки с любым уровнем несимметрии и произвольным числом витков в катушках.
2. Величина обратной симметричной составляющей обмоточного коэффициента по рабочей гармонике использована в качестве критерия допустимости уровня несимметрии при синтезе новых обмоток.
3. Применён метод циклической перестановки активных катушечных сторон, что позволяет в отдельных случаях провести симметрирование обмотки до приемлемого уровня.
4. Для полного симметрирования использован комплекс методов циклической перестановки и изменения числа витков в катушках. Сочетание этих методов, либо их независимое использование позволяет учитывать технологические особенности производства (ремонта) электрических машин.
5. Разработана подсистема автоматизированного синтеза несимметричных многофазных обмоток, основанная на методе симметричных составляющих, которая характеризуется высоким уровнем наглядности, простотой использования и глубиной анализа основных электромагнитных свойств, проектируемых обмоток.
6. Предложена методика анализа внутренней несимметрии, которая позволяет сделать вывод о возможности выполнения предлагаемых слабонесимметричных обмоток с несколькими параллельными ветвями.
7. Проведенные экспериментальные исследования асинхронного двигателя с предложенной несимметричной обмоткой показали практическую симметрию токов в рабочем режиме, что подтвердило расчетные технические показатели.
8. Даны рекомендации по использованию новых несимметричных обмоток при производстве и ремонте двигателей малой и средней мощности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Arnold E Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen/E. Arnold. – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1912. – 463 s.
2. Eastham J.F. Clos-ratio phase-modulation change-pole machines with imported winding balance//Proc. IEE.- 1963.- v.110.- №47.- P. 1649-1655.
3. Eastham J.F., Laithwait E.R. Pole-change motors using phase-mixing techniques// Proc. IEE.-1962.- v.109 A.- №47.- P.397-411.
4. Fong W. Wide-ratio two-speed single-winding induction motors//Proc. IEE.- 1965.-v.112.- №7.- P. 1335-1347.
5. Rawcliffe G. H., Burbidge R. F., Fong W. Induction motors speed-changing by pole-amplitude modulation//Proc. IEE.-1958.- №105 A. - P. 792-817.
6. Rawcliffe G. H., Fong W. 'Sum' and 'difference' winding modulation with special reference to the using of 4/6 pole p.a.m. windings//Proc. IEE.- 1970.- v.117.- №9.-P.1216-1233
7. Rawcliffe G.H., Fong W. Two-speed induction motors using fractional-slot windings//Proc.IEE.- 1965 .- v.112.- №10.- P. 1899-1913.
8. Salmon A. Double modulation de phase dance less motors asynchronous//Rev. gen. elec..- 1973.- 82.- №5.- P.323-329.
9. Лившиц-Гари М. Обмотки машин переменного тока/ М.: Госэнергоиздат, 1959.–766 с.
10. Белікова Л. Я. Електричні машини : навч. Посіб. / Л. Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одесса, : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
11. Юхимчук В.Д. Технология производства электрических машин : учеб.пособ. : в 2 кн. / В.Д.Юхимчук. – Харьков : Тимченко, 2006. – 560 с.
12. Монтік П. М. Електротехніка та електромехніка : навч. Посіб. / П. М. Монтік. – Львів : Новий світ –2007. – 500 с.
13. Попография М. Г. Електричні машини та електропривод побутової побутової техніки : підручник / М. Г. Попография, Л. Ф. Артеменко, О. П.

Бурмістрєнков [та ін]; за ред.. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стереотип. – Київ : Либідь, 2004. -352 с.

14. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия.–1974.– 503 с.

15. Зимин В.И, Каплан М.Я, Пелей А.М. Обмотки электрических машин //., Рабинович И.Н., Федоров В.П., Хакен П.Я // – Л. – Энергия, 1970. – 470 с.

16. Хаккен П.А., Еремеев А.И., Каплан М.Я. Обмотки электрических машин – М.: изд-во Ленинград, 1941.– 436 с.

17. Дегтев В.Г. Синтез симметричных трехфазных обмоток с заданным уровнем избирательности//Электричество, №4, 1993.- С. 40-44.

18. Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н. Алгоритм проектирования трёхфазных обмоток с заданным уровнем избирательности// Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч. техн. сб.–1995.– №47.– С. 73–78.

19. Цибулевский П.И. Обмоточные данные асинхронных двигателей.М-«Энергия»,1971, изд.2-е, доп.392 с. с ил.

20. Дёгтев В.Г., Смирнов С.Б. Модификации трёхзонных обмоток //Электромашинобуд. та електрообладн. наук. техн. зб. – 2000.– №54.– С.68-70.

21.Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем.—К.: Наукова думка, 2002.—288 с.

22. Абдулкарим Х.Г. Исследование возможности применения несимметричных обмоток в асинхронных двигателях. – Праці Одеського політехнічного університету, 2013.—№3(42). С117—122.

23. Дегтев В.Г., Абдулкарим Х.Г, Бучацкая М.П. Особенности гармонического анализа многофазных несимметричных обмоток. - Електротехніка и електромеханіка, 2012.—№4. С31—35.

24. Дегтев В.Г., Абдулкарим Х.Г, Бучацкая М.П. Симметрирование обмоток электрических машин. – Електротехнічніє и комп'ютерніє системи, 2012.—№5(81). С101—105.

25. Дегтев В.Г, Абдулкарим Х.Г, Марулин С.Ю. Автоматизированный синтез несимметричных многофазных обмоток. Холодильная техника и технология. - 2014. —№3 (149).- С. 77—81.

26. Якимец А.М, Абдулкарим Х.Г. Методика определения разностных ЭДС произвольных обмоток. Холодильная техника и технология. - 2014. — №5 (151).- С. 51—54.

27. Абдулкарим Х.Г. Алгоритм определения разностных ЭДС произвольных обмоток. Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів з міжнародною. – Миколаїв: НУК, 2013. -212 с.

28. Дегтев, В.Г. Анализ намагничивающих сил обмоток переменного тока/ В.Г.Дегтев, И.Н.Радимов // Электромашиностроение и электрооборудование: респ. межвед. науч.-техн. сб. —К техника 1975. — Вып. 20. — С. 122 —128.

29. Дегтев В.Г., Альтман В. Гармонический анализ целых и дробных обмоток. – Одесса, 1988. – 20с. – Деп. в УкрНИИНТИ 13.12.88, № 2970 – Ук88.

30. Дегтев В.Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток //Електротехніка і електромеханіка – 2002, – №1.– С. 23 – 27.

31. ГОСТ 13109-67*. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения. 12с.

32. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

33. ГОСТ 16372-84. Машины электрические вращающиеся. Предельные значения уровней шума.

34. ГОСТ 16921-83. Машины электрические вращающиеся. Допустимые вибрации.

35. Петриков Л.В., Корпаченко Г.Н «Асинхронные электродвигатели: обмоточные данные. Ремонт. Модернизация/Справочник – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
36. Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая российская серия РА. –М.: Изд-во «Знак», 1999.- 256 с.
37. Попов В.И. Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин (Часть I, окончание)//Электричество. - 1999.- №4.- С. 23- 27.
38. Попов В.И. Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин //Электричество. - 1999.- №3.- С. 23- 28..
39. Винников В.М. Технология и расчеты при ремонте двигателей переменного тока. М., «Энергия» – 1970 – 224с.
40. Виноградов Н.В. Намотка катушек и секций электрических машин и аппаратов: учеб. – М.;Л.:Госэнергоиздат, 1953. –87с.
41. Лущик В.Д. Универсальная методика расчета обмоточных коэффициентов/ В.Д.Лущик. //Электротехника и электромеханика.—2011.— №1.—С.28—30.
42. Лущик В. Д. Методика створення двополюсних обмоток асинхронних машин із збільшеною кількістю паралельних гілок / В. Д. Лущик, В.О. Тимошенко // Електротехніка і електромехніка. – 2014. - № 2. – Сю 40-43.
43. Дегтев В.Г. Универсальная методика и её место в практике анализа многофазных обмоток /В.Г Дегтев//Электротехника и электромеханика. — 2012—№3. —С.21-24.
44. Иванов-Смоленский А.В., Мартынов В.А. Расчет обмоточных коэффициентов симметричных многофазных обмоток переменного тока//Электричество, 1982. №1. С.69-72.
45. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. - Л.:Энергоатомиздат, 1989. - 400 с

46. Дегтев В.Г., Билоненко Н.И., Сверщевский В.П. Методика симметрирования совмещённых обмоток // Известия ВУЗ “Электромеханика”, №9.-1987, С.59-64.

47. Шапиро Л.Я., Асторга В.И. О выборе асинхронизированного синхронного генератора ветроэнергетической установки. // Энергетика и транспорт. 1986. № 2. 162-167 с. (Изн. АН СССР).

48. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликин М.Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем. - М: Энергия, 1977, 224 с.

49. Казарян С.Л. О выборе обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу // Электричество. - 1987.- №1.- С. 69-71.

50. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1986. –360 с.: ил

51. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др.; под редакцией И. П. Копылова, “Проектирование электрических машин”, Учеб. Пособие для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 496 с

52. Дёгтев В.Г., Бабич С.В., Довгий С.С. Методика инженерного проектирования обмоток // Электромашиноб. та електрообладн. наук. техн. зб. – 1998. – №.51. – С. 34 – 37.

53. Костромина В.Г. Технология производства асинхронных двигателей (специальные процессы)/Под ред.- М.: Энергия, 1981. – 222 с

54. Дегтев В.Г. Модульный синтез многофазных обмоток // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч. техн. сб.-1998.- №51.- С. 46-50.

55. Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пуско-регулирующими характеристиками // Вісник НТУ “ХП” – 2001. – №17. – С.110 – 112.

56. Кравчик А.Э., Андрианов М.В. Основные направления совершенствования асинхронных электродвигателей общего назначения. Официальный сайт «ВЭМЗ» «vemp.ru».

57. Дегтев В.Г., Бесбес Х.М., Туми Т.А. Расчёт неуравновешенных обмоток// “Электромашиностроение и электрооборудование”, Киев:, Техника, №38: 1984.- С.87-92.

58. Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н., Глухов А.А. Сравнительный анализ трехфазных обмоток с максимальной симметрией. Київ, вид. Техніка, вип.70, 2008, С.72-75.

59. Кучера Я., Гапл Й. Обмотки электрических вращательных машин // – Изд. Чехословацкой академии наук, Прага: 1963. – 981 с.

60. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Пути повышения технико-экономических показателей и развития теории электрических машин // Вісник НТУ “ХП” – 2001. – №17. – С.24 – 27.

61. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. II. - Л.: Энергия. 1973. - 648 с.

62. Вольдек А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1974. - 839 с.

63. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. II. Асинхронные и синхронные машины. М.: - Л.: Госэнергоиздат.-1963. - 416 с.

64. Рихтер Р. Обмотки якорей машин переменного и постоянного токов. - М.: ОНТИ, 1933. - 364 с.

65. Дегтев В.Г., Лаврук И.С. Алгоритм синтеза слабо несимметричных трехфазных обмоток// Электромашинобудування та електрообладнання.– К.: Техніка, 2001, №57. – С. 62-66.

66. Захаров М.К., Беликова Л.Я., Дегтев В.Г., Радимов И.Н. К образованию многоскоростных обмоток с ограниченной // “Электромашиностроение и электрооборудование”, Киев: Техника, №19: 1974.- С.118-125.

67. Дегтев В.Г., Беликова Л.Я., Захаров М.К., Кравчик А.Э., Радимов И.Н. Расчёт несимметрии полюсопереключаемых обмоток//Материалы VI Всесоюзной науч-техн. конференции “Перспективы развития производства асинхронных двигателей”, Владимир: 1982, С.14-17

68. Дегтев В.Г., Радимов И.Н. Анализ намагничивающей сил обмоток переменного тока // Респ. межвед. науч.-техн. сб. «Электромашиностроения и электрооборудование», Киев: Техника. - № 20, 1975. -С.122-128

69. Дегтев В.Г., Бабич С.В., Акиншин П.А. Слабонесимметричные двухфазные обмотки// Электромашиноб. та електрообладн. – 1999, Вып.52, . – С. 72 – 76.

70. Дегтев В.Г, Беликова Л.Я, Радимов И.Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка А. с. 782046 СССР, М. Кл.³ Н 02 К 3/28. – №2510762; заявл. 20.07.77; опубл.23.11.80. Бюл. №43.

71. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах // пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия. – 1981.- с.352.

72. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. –352 с.

73. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Скоморохов А.А. Формирование дробных обмоток //Электромашинобуд. та електрообладн. наук. техн. зб. – 2005. – № 64. – С.76-79.

74. Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н. Многофазные обмотки с улучшенными электромагнитными свойствами //Электромашинобуд. та електрообладн. наук. техн. зб. –1992. – №46.– С.75 – 79.

75. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А.. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ — М.: Энергоиздат, 1982.—504 с.

76. Радин В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей интерэлектро /Лондин Й, Розенкноп В.Д и др // Справочник/А90.—М: Энергоатомиздат, 1990—504с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Расчетный пример применения алгоритма гармонического анализа

$$(Z=24, 2p=6, y=3)$$

Проиллюстрируем применение предложенного алгоритма для гармонического анализа симметрированной шестиполюсной трехфазной обмотки, выполненной в 24 пазах с неодинаковыми числами витков в катушках. При выборе шага по пазам $y=3$ распределение фазных зон показано на рис. А.1.

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

Рисунок А.1 – Распределение фазных зон трехфазной симметрированной обмотки ($Z=24, 2p=6, y=3$)

Исходными данными для рассматриваемой обмотки являются:

- число фаз обмотки – $m=3$;
- число повторений – $T=1$;
- число пазов на периоде – $Z_0=24$;
- число пар полюсов на периоде – $p_0=3$;
- шаг обмотки по пазам – $y=3$.

Как следует из рис. А.1, половины обмотки взаимно инверсны по фазам. Поэтому в гармоническом спектре будут присутствовать только гармоники нечетных порядков, а массивы номеров АКС и чисел витков каждой из 3-х фаз достаточно задать для половины пазов

$$\{a_{Ak}\} = 1, 2, -5, 9;$$

$$\{a_{Bk}\} = 4, -7, -8, 12;$$

$$\{a_{Ck}\} = -3, 6, -10, -11.$$

Массивы относительных чисел витков в АКС каждой из трех фаз

$$\{w_{Ak}\} = 1; 0,643; 1; 1;$$

$$\{w_{Bk}\} = 1; 0,643; 1; 1;$$

$$\{w_{Ck}\} = 0,945; 0,945; 0,945; 0,945.$$

Результаты гармонического анализа представлены в табл. А.1.

Таблица А1 – Данные гармонического анализа трехфазной симметрированной обмотки ($Z=24$, $2p=6$, $y=3$)

v	k_{D0v}	k_{Drv}	k_{Ddv}	k_{Wrv}	H_{rv}	k_{Wdv}	H_{dv}
1	0,175	0,011	0,148	0,005	0,017	0,057	0,195
3	0,000	0,001	0,945	0,001	0,001	0,873	1,000
5	0,037	0,085	0,114	0,080	0,055	0,107	0,073
7	0,285	0,099	0,125	0,037	0,018	0,047	0,023
9	0,587	0,011	0,184	0,005	0,002	0,070	0,027
11	0,228	0,028	0,151	0,024	0,008	0,139	0,043
$\tau_d = 0,102194$							

Уровень несимметрии указанной обмотки относительно рабочей гармоники практически сведен к нулю за счет использования катушек с разными числами витков, что вполне допустимо при ремонтных работах.

Ниже приведен поверочный расчет гармонического состава магнитного поля симметричной трехфазной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу $q = 4$ с применением предлагаемого алгоритма гармонического анализа. Это необходимо для того, чтобы убедиться в корректности используемой методики гармонического анализа по отношению к любым типам обмоток.

Исходными данными для рассматриваемой обмотки являются:

- число фаз обмотки – $m=3$;
- число повторений – $T_{по}=1$;
- число пазов на периоде – $Z_0=24$;

- число пар полюсов на периоде – $p_0=1$;
- шаг обмотки по пазам – $y=12$;
- массивы номеров АКС:

$$\{a_{Ak}\} = 1, 2, 3, 4;$$

$$\{a_{Bk}\} = 9, 10, 11, 12;$$

$$\{a_{Ck}\} = -7, -8, -9, -10.$$

Результаты гармонического анализа представлены в табл. А.2,

Таблица А1 – Данные гармонического анализа трехфазной симметричной обмотки ($Z=24, 2p=2, q=4$)

v	k_{w0v}	k_{wrv}	k_{wdv}	H_{0v}	H_{rv}	H_{dv}
1	0,000	0,000	0,958	0,000	0,000	1,000
3	0,000	0,000	0,000	0,227	0,000	0,000
5	0,000	0,205	0,000	0,000	0,043	0,000
7	0,000	0,000	0,158	0,0000	0,000	0,024
9	0,000	0,000	0,000	0,031	0,000	0,000
11	0,000	0,126	0,000	0,000	0,012	0,000
$\tau_d=0,0082629$						

Как следует из сопоставления данных табл. А.2 с известными данными (см., например, таблицу приложения 5 [48]), ненулевые значения составляющих коэффициентов $k_{D(d,r,0)v}$ распределения полностью совпадают с соответствующими величинами коэффициентов k_{Dv} , рассчитанных традиционными методами. При этом составляющие нулевой последовательности k_{D0v} соответствуют коэффициентам k_{Dv} по гармоникам, порядки которых кратны трем, составляющие обратной последовательности k_{Drv} – коэффициентам k_{Dv} по обратно вращающимся гармоникам с порядками $v=3l-1$, составляющие прямой последовательности k_{Ddv} – коэффициентам k_{Dv} по прямо вращающимся гармоникам с порядками $v=3l+1$.

Приложение Б

Подсистема гармонического анализа двухфазных и трёхфазных обмоток

Symmetry – 23

Рассмотрим на наглядных примерах более подробно работу программы Symmetry – 23. В качестве примера рассмотрим симметрирование и гармонический анализ шестиполусной ($2p=6$) обмотки, которую необходимо выполнить в 48 пазах статора.

Определение числового ряда (ЧР) для такой обмотки

$$3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2, \quad 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2.$$

Однако при этом число АКС в каждой из фаз окажется неодинаковым (18 – в первой фазе, 18 – в второй фазе и по 12 – в третьей), что вызовет недопустимо высокий уровень несимметрии.

Симметрирование ЧР, путём циклической перестановки в повторяющейся части исходного приводит к следующему ЧР

$$3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 3, \quad 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 3.$$

В результате каждая из фаз теперь содержит по 16 АКС. Симметрированному ЧР соответствует распределение АКС, приведенное на рис. Б.1.

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
A	z	B	x	C	y	A	z	B				
A	z	B	x	C	y	A	z	B				
25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	
x	C	y	A	z	B	x	C	y				
x	C	y	A	z	B	x	C	y				

Рисунок Б. 1 – Распределение активных катушечных сторон

Это дает возможность завершить формирование исходных данных подготовкой трех массивов $\{N_j\}$ номеров пазов:

$$\begin{aligned} N_1\} &= 1, 2, 3, -9, -10, -11, 17, 18, -25, -26, -27, 33, 34, 35 -41, -42. \\ N_2\} &= 7, 8, -14, -15, -16, 22, 23, 24, -31, -32, 38, 39, 40, -46, -47, -48. \\ N_3\} &= -4, -5, -6, 12, 13, -19, -20, -21, 28, 29, 30, -36, -37, 43, 44, 45. \end{aligned} \quad (1)$$

Занесение исходных данных иллюстрирует панель программы, приведенная на рис. Б. 2. Число фаз $m=3$ задается простановкой метки в соответствующем поле в верхней правой части панели. Ниже в соответствующих окнах заносятся числа полюсов $p=3$ и шаг обмотки по пазам, выбранный в данном случае диаметральный ($y=8$).

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
16	16	16

для 1-ой фазы: Z0=48

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
7	8	-14	-15	-16	22	23	24	-31	-32	38	39	40	-46	-47	-48
1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
1	2	3	-9	-10	-11	17	18	-25	-26	-27	33	34	35	-41	-42
1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
43	44	45	12	13	-19	-20	-21	28	29	30	-36	-37	-4	-5	-6
1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок Б. 2 – Панель ввода данных

Числа АКС n_j в каждой из фаз, массивы номеров пазов $\{N_j\}$ и относительных чисел витков $\{w_j\}$ могут быть подготовлены заранее в виде таблиц Excel и введены нажатием кнопки «Загрузить данные».

Допускается занесение перечисленных выше данных вручную после ввода чисел АКС n_j в каждой из фаз после нажатия кнопки с соответствующим названием. После этого активизируются два или три окна (в соответствии с числом фаз) с ячейками для ввода номеров пазов $\{N_j\}$ в соответствии с (1). Ячейки массивов $\{w_j\}$ относительных чисел витков в этом случае автоматически заполняются значениями, равными 1.

В нижней части панели выбираем режим «Отладка» и нажатием кнопки «Вывести результат» активируем появление окна отладки (рис. Б. 3) с векторной диаграммой и координатами результирующих векторов ЭДС каждой из фаз.

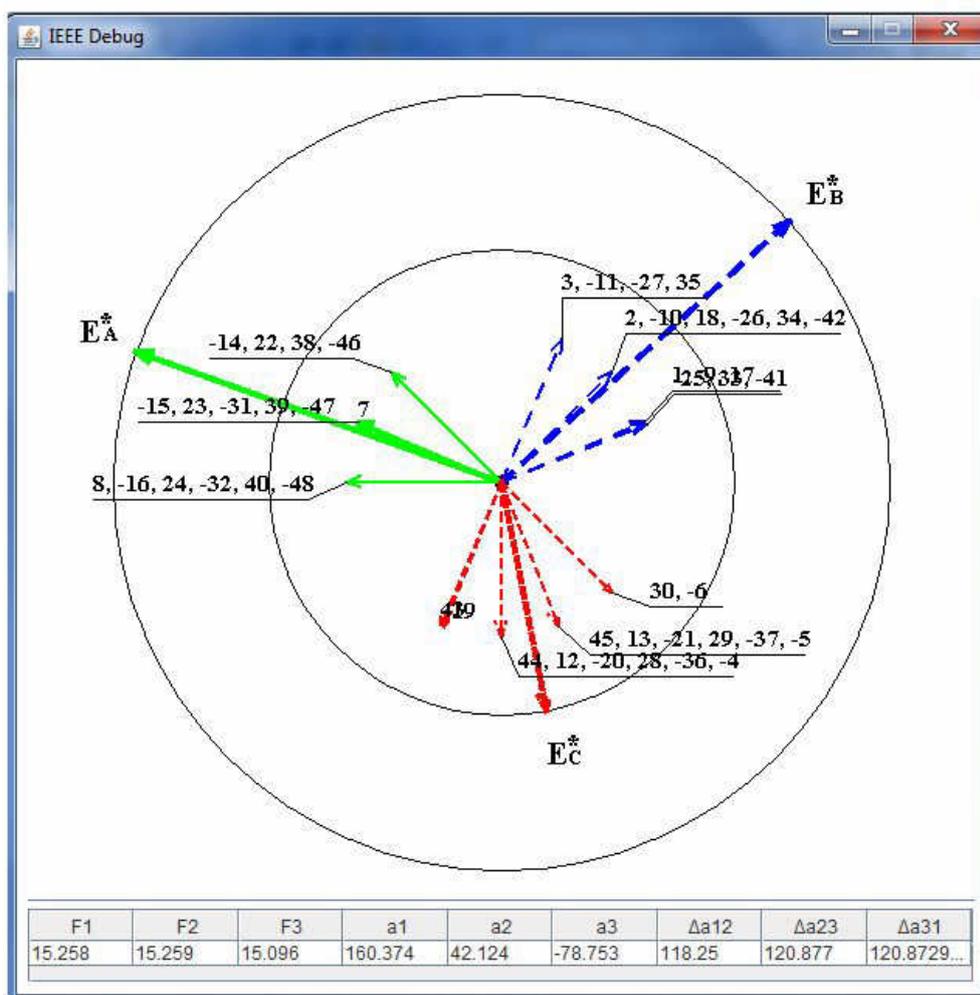


Рисунок Б. 3 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки

Угловые координаты соответствующих векторов фаз теперь составляют:

$$\varphi_A = 42,1247^\circ; \varphi_C = -78,75^\circ; \varphi_B = 160,3753^\circ;$$

а их относительные сдвиги: $\varphi_{AC} = \varphi_{CB} = 120,87^\circ; \varphi_{AB} = 118,25^\circ$.

Угловая несимметрия после симметрирования числового ряда практически полностью устранена.

Амплитуды результирующих векторов ЭДС стали равными: $E_A^* = E_B^* = 15,258; E_C^* = 15,0953$. Несимметрия по рабочей гармонике

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_C^*}{E_A^*} = \frac{15,258 - 15,0953}{15,258} = 0,01$$

В нижней части панели выбираем режим «Расчет» и нажатием кнопки «Вывести результат» активируем появление окна отладки (рис. Б. 4) с результатом гармонического анализа исходной обмотки.

v	kY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.1099	0.0268	0.0817	0.0549	0.1735	0.0134	0.0423	0.0409	0.129
3	1.0	0.0118	0.0051	0.9502	0.0118	0.0124	0.0051	0.0053	0.9502	1.0
5	0.5	0.0737	0.0463	0.0832	0.0369	0.0233	0.0231	0.0146	0.0416	0.0263
7	-0.5	0.1578	0.0627	0.0163	-0.0789	-0.0356	-0.0313	-0.0141	-0.0081	-0.0037
9	-1.0	0.6082	0.0205	0.0129	-0.6082	-0.2134	-0.0205	-0.0072	-0.0129	-0.0045
11	-0.5	0.1663	0.0463	0.0369	-0.0832	-0.0239	-0.0231	-0.0066	-0.0184	-0.0053
13	0.5	0.0109	0.0747	0.0693	0.0055	0.0013	0.0374	0.0091	0.0346	0.0084
15	1.0	0.036	0.1677	0.0398	0.036	0.0076	0.1677	0.0353	0.0398	0.0084
17	0.5	0.0536	0.0817	0.0549	0.0268	0.005	0.0409	0.0076	0.0275	0.0051
19	-0.5	0.1495	0.0055	0.0693	-0.0747	-0.0124	-0.0027	-5.0E-4	-0.0346	-0.0058
SD		SR			S0			td		
1.029795		0.004264			0.084753			0.118812		

Сохранить результаты в файл

Рисунок Б. 4 – Результаты гармонического анализа исходной обмотки

Таким образом полученная обмотка почти симметрична по рабочей гармонике. В данном случае нам не нужно применять неравновитковые

катушки, т.е. трудоемкость изготовления и укладки данной обмотки на порядок ниже рассмотренной в предыдущем пункте обмотки.

Можно получить более симметричную обмотку путём применения второго метода, изменением числа витков катушек.

Выполним анализ полученных результатов. Из диаграммы (рис Б.3) и данных, приведенных в таблице (рис Б.4) следует, что результирующие векторы E_A^* и E_B^* равны и располагаются симметрично относительно вектора E_C^* , имеющего меньшую амплитуду. Кроме того, табличные данные свидетельствуют о том, что $\Delta\alpha_{13}=\Delta\alpha_{23}=120,877^\circ$, а $\Delta\alpha_{12}=118,25^\circ$, т.е. отличаются от необходимых для выполнения угловой симметрии 120° . Понятно, что для устранения указанного углового рассогласования необходимо векторы E_A^* и E_B^* повернуть на $0,877^\circ$ в направлении вектора E_C^* . Выполнить такой поворот можно, уменьшив величину единичных векторов с номерами 3, -14, -11, 22, -27, 38, 35 и -46. Реализация такого преобразования осуществляется путем уменьшения относительного числа витков w^* в АКС с соответствующими номерами (рис. Б.5).

Необходимые значения относительных чисел витков указанных АКС определяются методом последовательных приближений в интерактивном режиме вплоть до достижения требуемой точности. После нескольких циклов последовательных приближений при $w^*=0,8682$ получаем практически одинаковые углы $\Delta\alpha_{ij}\approx 120^\circ$ между результирующими векторами ЭДС, приведенными на панели, изображенной на рис. Б.6.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
16	16	16

для 1-ой фазы: Z0=48

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
7	8	-14	-15	-16	22	23	24	-31	-32	38	39	40	-46	-47	-48
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
1	2	3	-9	-10	-11	17	18	-25	-26	-27	33	34	35	-41	-42
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
43	44	45	12	13	-19	-20	-21	28	29	30	-36	-37	-4	-5	-6
1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок Б. 5 – Панель ввода данных

Выбираем режим «Расчет» и нажатием кнопки «Вывести результат» активируем появление окна отладки (рис. Б.7) с результатом гармонического анализа исходной обмотки.

Из результата следует, что амплитуда ЭДС третьей симметрирующей фазы составляет 15,096 и превышает величины ЭДС остальных двух фаз на 0,313.

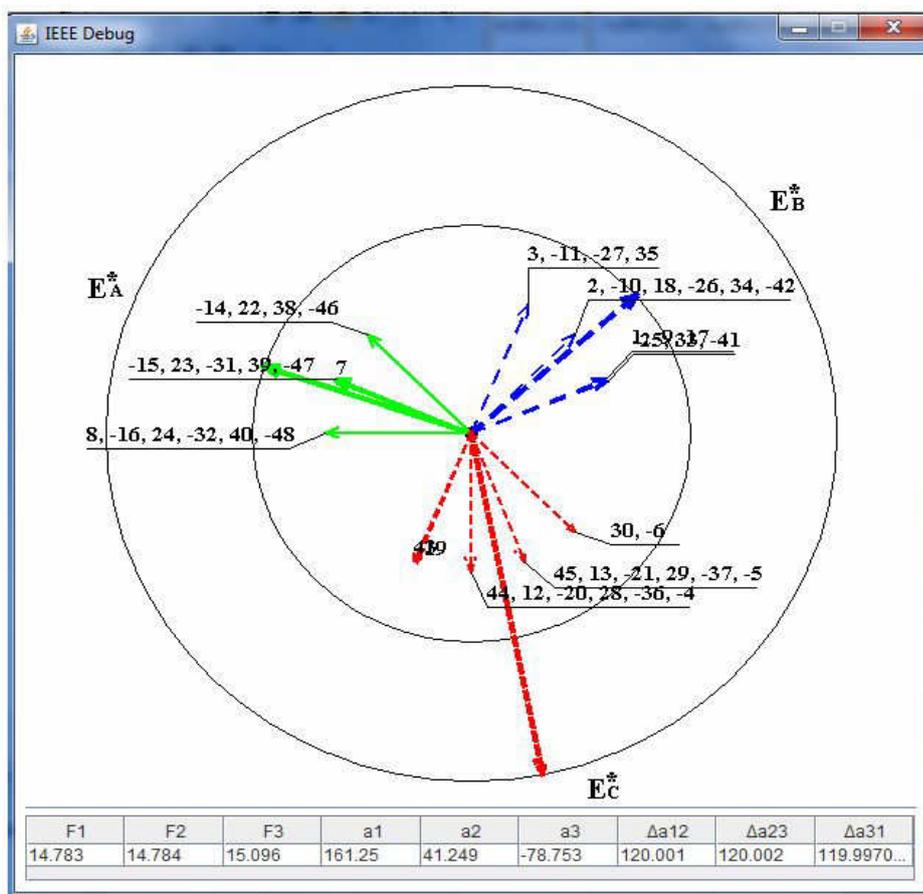


Рисунок Б. 6 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки при симметрии углов между фазами

v	kY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.105	0.0164	0.08	0.0525	0.1655	0.0082	0.0258	0.04	0.1261
3	1.0	0.0067	0.0066	0.9514	0.0067	0.007	0.0066	0.007	0.9514	1.0
5	0.5	0.0704	0.0361	0.0788	0.0352	0.0222	0.0181	0.0114	0.0394	0.0248
7	-0.5	0.1507	0.0663	0.0251	-0.0754	-0.034	-0.0331	-0.0149	-0.0125	-0.0056
9	-1.0	0.6175	3.0E-4	0.0301	-0.6175	-0.2164	-3.0E-4	-1.0E-4	-0.0301	-0.0105
11	-0.5	0.1588	0.0523	0.0439	-0.0794	-0.0228	-0.0262	-0.0075	-0.022	-0.0063
13	0.5	0.0104	0.0671	0.0608	0.0052	0.0013	0.0335	0.0081	0.0304	0.0074
15	1.0	0.0589	0.1862	0.048	0.0589	0.0124	0.1862	0.0391	0.048	0.0101
17	0.5	0.0512	0.0762	0.0452	0.0256	0.0047	0.0381	0.0071	0.0226	0.0042
19	-0.5	0.1428	0.0149	0.0716	-0.0714	-0.0118	-0.0075	-0.0012	-0.0358	-0.0059
SD		SR			S0			td		
1.028948		0.003437			0.083107			0.115492		

Сохранить результаты в файл

Рисунок Б.7 – Результаты гармонического анализа

Приступим к амплитудному симметрированию, которое, очевидно, должно заключаться в уменьшении ЭДС E_C^* . Такое уменьшение можно

выполнить разными способами, но при соблюдении одного важного условия – сохранении угловой симметрии.

Проще всего обеспечить это условие при одновременном уменьшении величин всех единичных векторов ЭДС указанной фазы. Степень такого уменьшения определяется как отношение амплитуд ЭДС:

$$w^* = E_{A(B)}^* / E_C^* = 14,783/15,093 = 0,98.$$

После занесения этих значений получаем окно программы, приведенное на рис. Б.8.

The screenshot shows the IEEE software window with the following data:

Введите исходные данные:

- Число фаз обмотки: 3 фазы
- Число пар полюсов: 3
- Шаг обмотки по пазам: 8
- Установить проверочные значения: Да/Нет

Ввести число АКС для каждой из фаз:

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
16	16	16

Ввести номера АКС n и соответствующие числа витков w для каждой из фаз

для 1-ой фазы: Z0=48

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
7	8	-14	-15	-16	22	23	24	-31	-32	38	39	40	-46	-47	-48
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
1	2	3	-9	-10	-11	17	18	-25	-26	-27	33	34	35	-41	-42
1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...	0.8...	1.0...	1.0...

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10...	11...	12...	13...	14...	15...	16...
43	44	45	12	13	-19	-20	-21	28	29	30	-36	-37	-4	-5	-6
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Выбор режима: Отладка Расчет

Сохранить данные в файл

Вывести результат

Рисунок Б. 8 – Окно программы после занесения значений степени уменьшения витков катушек 3-й фазы

При нажатии на кнопку «вывести результат» (при выбранном режиме «Отладка») будет построена векторная диаграмма ЭДС обмотки (рис. Б.9) соответствующая исходным данным на рис. Б.8.

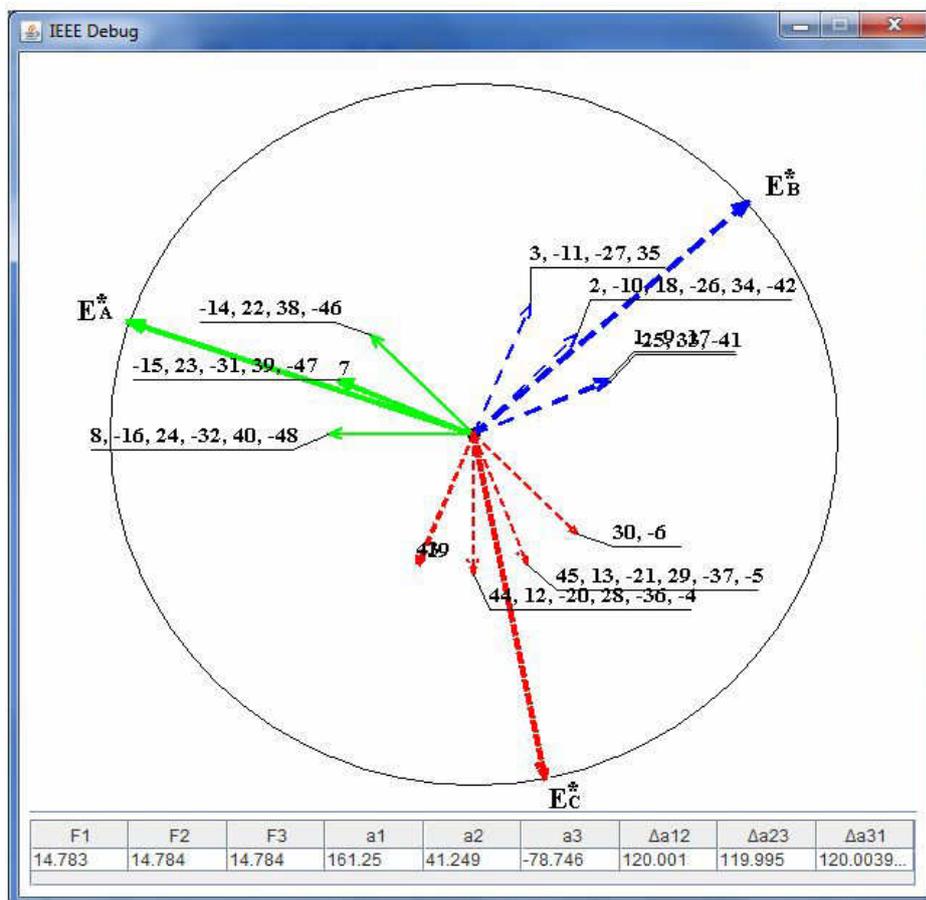


Рисунок Б. 9 – Окно с векторной диаграммой в режиме отладки после выравнивания амплитудных координат

Из рис. Б. 9 видно, что полученные результаты свидетельствуют о достижении практически полной симметрии в отношении рабочей гармоники и завершении процесса симметрирования обмотки.

Далее, посредством активации кнопки «Расчет» программа выполняет детальный гармонический анализ симметрированной обмотки, результаты которого могут быть просмотрены и проанализированы в соответствующем окне программы или сохранены на диске в виде файла Excel, после чего могут быть распечатаны. Результаты полного гармонического анализа исходной и симметрированной обмоток приведены ниже в рис. Б. 10.

v	kY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.1099	0.0268	0.0817	0.0549	0.1735	0.0134	0.0423	0.0409	0.129
3	1.0	0.0118	0.0051	0.9502	0.0118	0.0124	0.0051	0.0053	0.9502	1.0
5	0.5	0.0737	0.0463	0.0832	0.0369	0.0233	0.0231	0.0146	0.0416	0.0263
7	-0.5	0.1578	0.0627	0.0163	-0.0789	-0.0356	-0.0313	-0.0141	-0.0081	-0.0037
9	-1.0	0.6082	0.0205	0.0129	-0.6082	-0.2134	-0.0205	-0.0072	-0.0129	-0.0045
11	-0.5	0.1663	0.0463	0.0369	-0.0832	-0.0239	-0.0231	-0.0066	-0.0184	-0.0053
13	0.5	0.0109	0.0747	0.0693	0.0055	0.0013	0.0374	0.0091	0.0346	0.0084
15	1.0	0.036	0.1677	0.0398	0.036	0.0076	0.1677	0.0353	0.0398	0.0084
17	0.5	0.0536	0.0817	0.0549	0.0268	0.005	0.0409	0.0076	0.0275	0.0051
19	-0.5	0.1495	0.0055	0.0693	-0.0747	-0.0124	-0.0027	-5.0E-4	-0.0346	-0.0058
SD		SR			S0			td		
1.029795		0.004264			0.084753			0.118812		

Сохранить результаты в файл

а)

v	kY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.1044	0.0177	0.0793	0.0522	0.1647	0.0089	0.028	0.0396	0.125
3	1.0	0	0	0.9514	0	0	0	0	0.9514	1.0
5	0.5	0.0702	0.0371	0.0786	0.0351	0.0221	0.0186	0.0117	0.0393	0.0248
7	-0.5	0.15	0.0649	0.0234	-0.075	-0.0338	-0.0325	-0.0146	-0.0117	-0.0053
9	-1.0	0.6177	0.0038	0.0344	-0.6177	-0.2164	-0.0038	-0.0013	-0.0344	-0.0121
11	-0.5	0.1582	0.0509	0.0425	-0.0791	-0.0227	-0.0255	-0.0073	-0.0212	-0.0061
13	0.5	0.0109	0.0747	0.0693	0.0055	0.0013	0.0374	0.0091	0.0346	0.0084
15	1.0	0.036	0.1677	0.0398	0.036	0.0076	0.1677	0.0353	0.0398	0.0084
17	0.5	0.0536	0.0817	0.0549	0.0268	0.005	0.0409	0.0076	0.0275	0.0051
19	-0.5	0.1495	0.0055	0.0693	-0.0747	-0.0124	-0.0027	-5.0E-4	-0.0346	-0.0058
SD		SR			S0			td		
1.028703		0.003502			0.082824			0.115029		

Сохранить результаты в файл

б)

Рисунок Б. 10 – Результаты гармонического анализа исходной обмотки (а) и симметризованной (б)

В приведенных таблицах важнейшие показатели сопоставляемых обмоток содержатся в строках, соответствующих рабочей гармонике магнитного поля $v=p=3$. Это составляющие обмоточных коэффициентов k_Y , k_{D0} , k_{Dr} , k_{Dd} , k_{W0} , k_{Wr} , k_{Wd} и их относительных амплитуд H_{03} , H_{d3} , H_{r3} по рабочей гармонике. Сопоставление этих строк наглядно демонстрирует

преимущество симметрированной обмотки по сравнению с исходной. Действительно, величина обмоточного коэффициента k_{Wd} увеличилась с 0,9502 до 0,9514, а симметричные составляющие k_{W03} и k_{W03} отсутствуют, что гарантирует создание практически кругового вращающегося поля в зазоре электрической машины и лучшее использование ее активной части.

В последних строках выделены интегральные показатели гармонического состава ЭДС обмоток, включающие в себя S_D , S_R , S_0 , представляющие собой суммы квадратов относительных амплитуд H_{0v} , H_{dv} , H_{rv} добавочных гармоник и коэффициенты дифференциального рассеяния τ_d и τ_{da} . Первый из них τ_d трактуется традиционно и оценивает относительные затраты энергии на создание полей этих гармоник, которые вызывают только увеличение добавочных потерь. Второй показатель τ_{da} представляет собой интерпретацию первого с учетом того факта, что в асинхронных машинах симметричные составляющие нулевой последовательности соответствующих магнитных полей не генерируют. Как следует из сопоставления указанных данных все перечисленные показатели последних строк в таблицах на рис. Б. 10 для обмотки симметрированной с применением разработанного программного обеспечения уменьшились.

Аналогичным образом программное обеспечение позволяет осуществлять синтез симметрированных двухфазных обмоток.

Можно прийти к выводу, что разработанная подсистема автоматизированного синтеза слабо несимметричных многофазных обмоток, основанная на методике симметрирования по рабочей гармонике и использовании метода симметричных составляющих, характеризуется высоким уровнем наглядности, простотой использования и глубиной анализа основных электромагнитных свойств проектируемых обмоток, что, как подтверждает приведенный пример, может существенно повысить эффективность их синтеза.

Приложение В

Симметрирование шестиполюсной обмотки в 30 пазах с помощью подсистемы Symmetry – 23

Рассмотрим обмотку с $z=30$, $2p=6$, $y=7$, $q=5/3$.

Исходный числовой ряд имеет вид 2,2,1, 2,2,1, 2,2,1.

После выполнения симметрирования числовой ряд
приобретает вид 2,2,1, 2,1,2, 1,2,2.

Тогда соответствующее распределение АКС по пазам и фазам

Фаза *A*: 1, 2, -6, -7, 11, -16, -17, 21, 22, -26;

Фаза *B*: 5, -9, -10, 14, 15, -20, 24, 25, -29, -30;

Фаза *C*: -3, -4, 8, -12, -13, 18, 19, -23, 27, 28.

На рис. В.1 представлено распределение активных катушечных сторон исследуемой обмотки.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y

Рисунок В.1 – Распределение фазных зон слоя обмотки после первого этапа симметрирования ($Z=30$, $q=5/3$)

После ввода исходных данных в программу (рис. В.2), получаем угловые координаты и амплитуды векторов фаз представленные на рис. В.3 под векторной диаграммой.

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
10	10	10

для 1-ой фазы: **Z0=30**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
1	2	-6	-7	11	-16	-17	21	22	-26
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
5	-9	-10	14	15	-20	24	25	-29	-30
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
-3	-4	8	-12	-13	18	19	-23	27	28
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок В.2 – Панель ввода данных ($z=30$, $2p=6$)

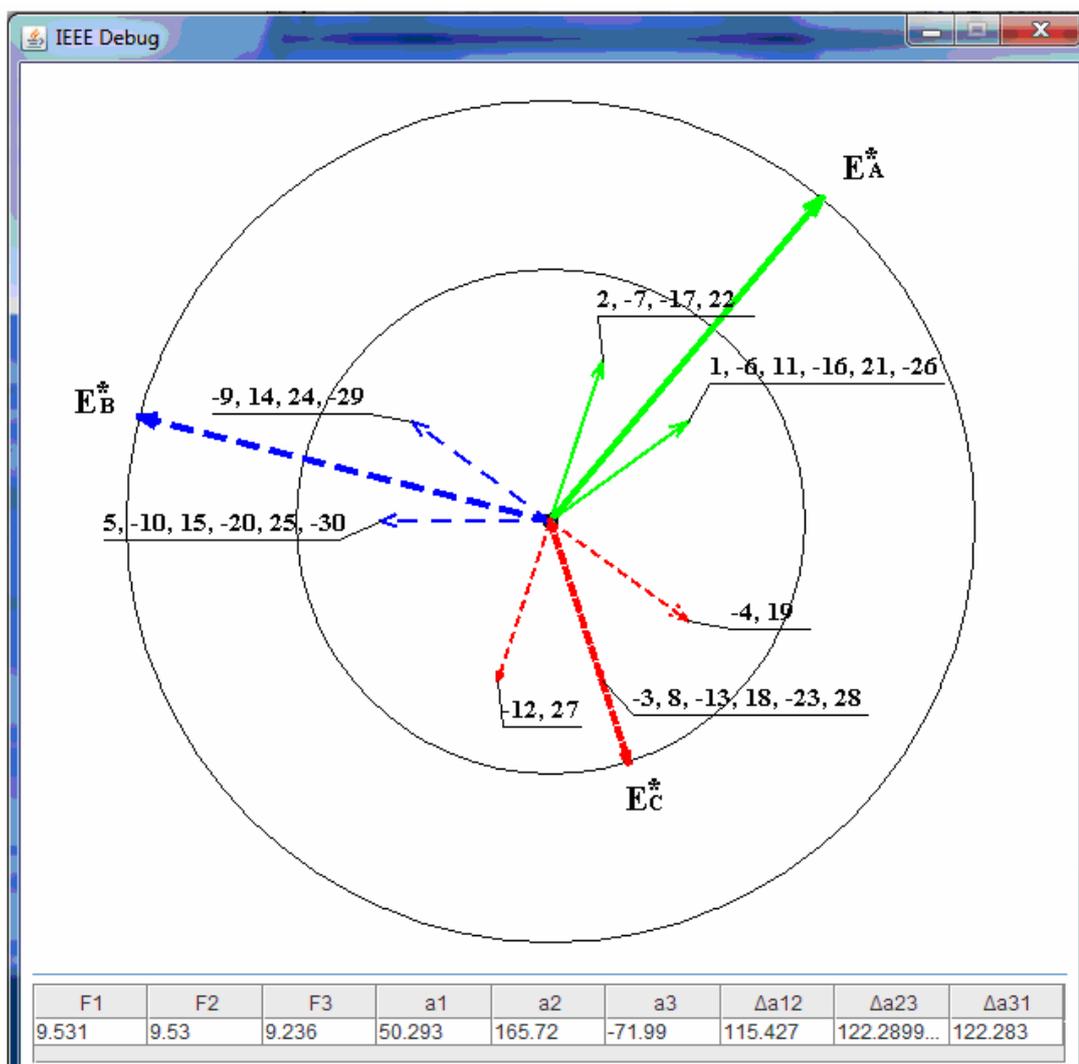


Рисунок В.3 – Векторная диаграмма до симметрирования с $z=30$, $2p=6$

Таким образом, относительная разница амплитуд результирующих векторов ЭДС уменьшилась до значения

$$\Delta E^* = \frac{E_A^* - E_C^*}{E_A^*} = \frac{9,53 - 9,24}{9,53} = 0,03 =$$

Гармонический анализ до симметрирования для этого варианта обмотки, приведен на рис. В.4.

v	KY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.1784	0.0412	0.1304	0.0892	0.2839	0.0206	0.0656	0.0652	0.2075
3	1.0	0.0315	0.0123	0.9427	0.0315	0.0334	0.0123	0.0131	0.9427	1.0
5	0.5	0.1333	0.0667	0.1333	0.0667	0.0424	0.0333	0.0212	0.0667	0.0424
7	-0.5	0.2436	0.1079	0.0139	-0.1218	-0.0554	-0.0539	-0.0245	-0.007	-0.0032
9	-1.0	0.5648	0.0602	0.0282	-0.5648	-0.1997	-0.0602	-0.0213	-0.0282	-0.01
11	-0.5	0.2608	0.0892	0.0412	-0.1304	-0.0377	-0.0446	-0.0129	-0.0206	-0.006
13	0.5	0.0279	0.1079	0.1218	0.0139	0.0034	0.0539	0.0132	0.0609	0.0149
15	1.0	0.2			0.2	0.0424				

SD	SR	S0	td
0.00687	0.229475	0.146903	1.075702

Сохранить результаты в файл

Рисунок В.4 – Гармонический анализ до симметрирования обмотки с $z=30$

Для симметрирования угловых координат на рис. В.5 приведены исходные данные с изменением числа витков в катушках.

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

Ввести число АКС для каждой из фаз

Загрузить данные

Ввести номера АКС n и соответствующие числа витков w для каждой из фаз

для 1-ой фазы: **Z0=30**

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
1	2	-6	-7	11	-16	-17	21	22	-26
1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000	1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
5	-9	-10	14	15	-20	24	25	-29	-30
1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000	1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
-3	-4	8	-12	-13	18	19	-23	27	28
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Сохранить данные в файл

Выбор режима: Отладка Расчет

Вывести результат

Рисунок В.5 – Панель ввода данных с изменением числа витков в катушках с симметрированием угловых координат ($z=30$, $2p=6$)

При выборе режима «Отладка» и нажатии кнопки «Вывести результат» будут построены векторные диаграммы (рис. В.6) с указанием относительных величин амплитуд и углов результирующих фазных ЭДС (МДС).

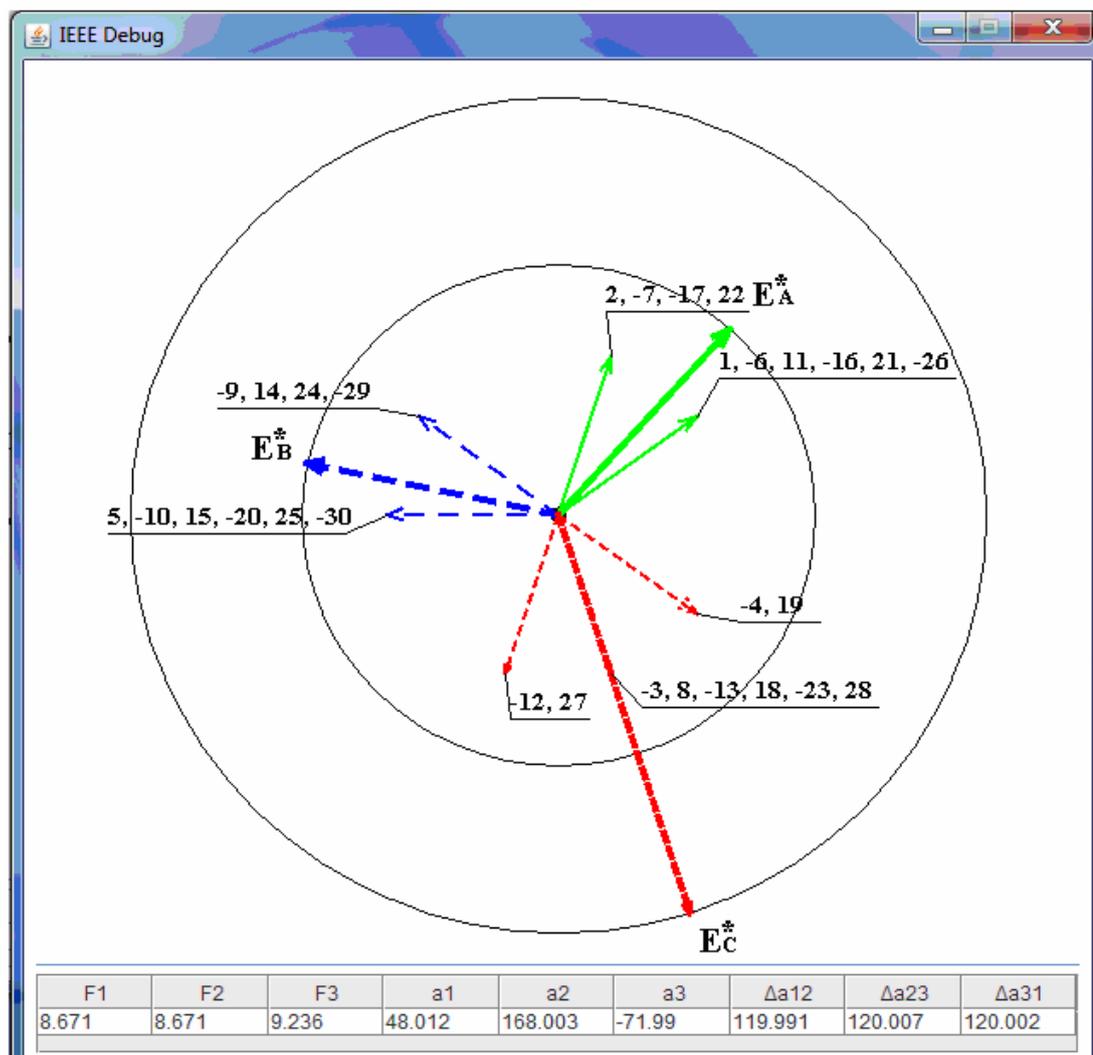


Рисунок В.6 – Векторная диаграмма после симметрирования угловых координат с $z=30$, $2p=6$

На следующем этапе производится выравнивание амплитуд фазных ЭДС (МДС) – в данном случае вектор E_C^* имеет амплитуду 9,236 при необходимой 8,671. Выравнивание производится за счет пропорционального уменьшения числа витков в третьей фазе (E_C^*).

Приступим к амплитудному симметрированию, которое, очевидно, должно заключаться в уменьшении (E_C^*). Такое уменьшение можно выпол-

нить разными способами, но при соблюдении одного важного условия – сохранении угловой симметрии.

Проще всего обеспечить это условие при одновременном уменьшении величин всех единичных векторов указанной фазы. Степень такого уменьшения определяется как отношение амплитуд ЭДС:

$$W_C^* = E_{A(B)}^* / E_C^* = 8,671/9,236 = 0,9388.$$

Новая величина относительного числа витков вносится в соответствующие поля исходных данных (рис.В.7). Правильность расчетов контролируется по векторной диаграмме фазных ЭДС и гармоническому анализу обмотки после симметрирования (рис.В.8).

IEEE

Языки О программе

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да/Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
10	10	10

для 1-ой фазы: Z0=30

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
1	2	-6	-7	11	-16	-17	21	22	-26
1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000	1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000

для 2-ой фазы:

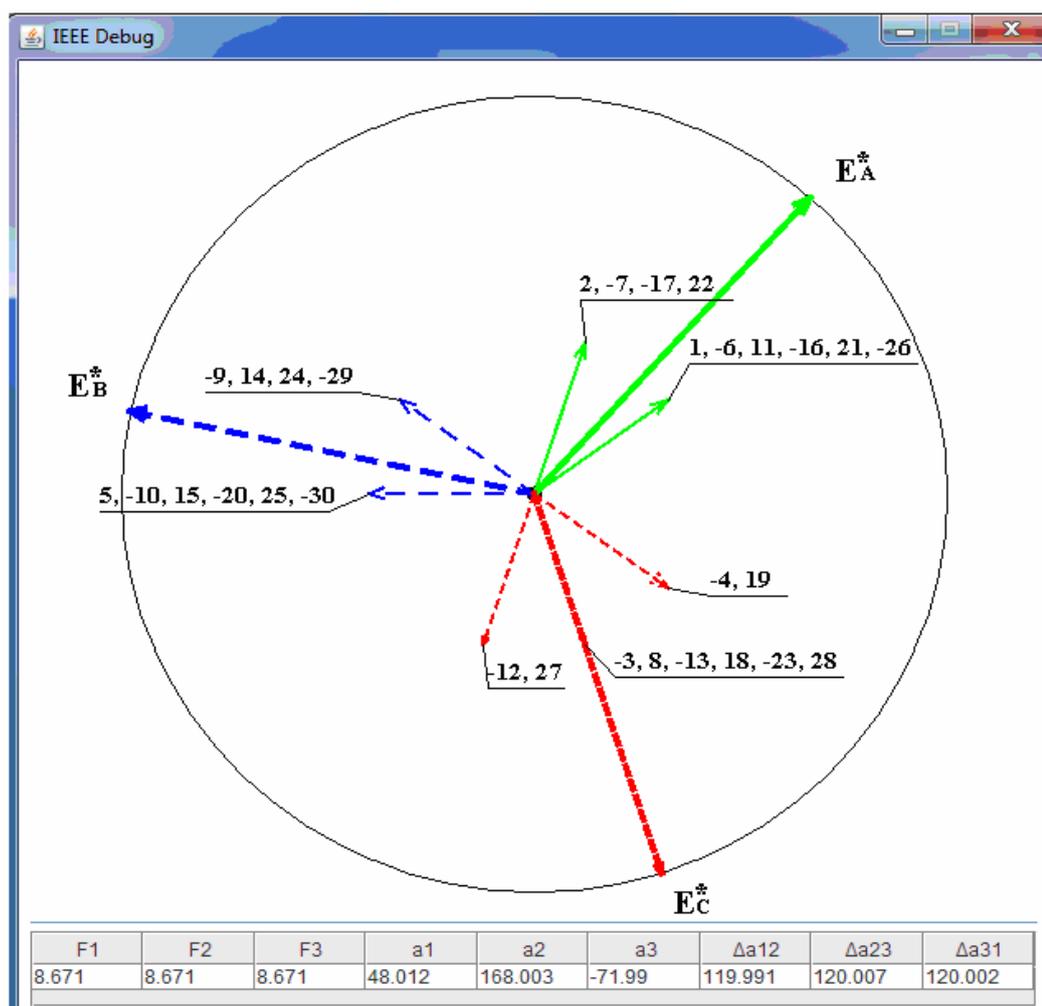
1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
5	-9	-10	14	15	-20	24	25	-29	-30
1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000	1.000	0.7668	1.000	0.7668	1.000

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w	9n/w	10n/w
-3	-4	8	-12	-13	18	19	-23	27	28
0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388	0.9388

Выбор режима: Отладка Расчет

Рисунок В.7 – Панель ввода данных с изменением числа витков в катушках при окончательном симметрировании обмотки с $z=30$ и $2p=6$



(a)

Результаты:

v	KY	kD0	kDr	kDd	kW0	H0	kWr	Hr	kWd	Hd
1	0.5	0.1659	0.1257	0.0177	0.0829	0.2632	0.0629	0.1995	0.0089	0.0281
3	1.0			0.9451					0.9451	1.0
5	0.5	0.1239	0.1239	0.0432	0.062	0.0393	0.062	0.0393	0.0216	0.0137
7	-0.5	0.2265	0.0345	0.113	-0.1132	-0.0513	-0.0172	-0.0078	-0.0565	-0.0256
9	-1.0	0.5841	0.0867	0.0099	-0.5841	-0.206	-0.0867	-0.0306	-0.0099	-0.0035
11	-0.5	0.2425	0.0589	0.099	-0.1212	-0.035	-0.0294	-0.0085	-0.0495	-0.0143
13	0.5	0.0259	0.1044	0.0875	0.013	0.0032	0.0522	0.0127	0.0438	0.0107
15	1.0	0.2813	0.0383	0.0383	0.2813	0.0595	0.0383	0.0081	0.0383	0.0081

SD	SR	S0	td
0.002473	0.216762	0.140847	1.073443

Сохранить результаты в файл

(б)

Рисунок В.8 – Векторная диаграмма фазных ЭДС (а) и результаты гармонического анализа (б) обмотки с $z=30$, $2p=6$ после симметрирования

Приложение Д

Экспериментальное определение разностных ЭДС

в параллельных ветвях

Число параллельных ветвей a в обмотке обычно определяется соображениями общего расчета машины. Оно может быть принято равным любому множителю числа полюсов $2p$ или произведения таких множителей. Итак, при четном числе пазов на полюс и фазу число групп с $q / 2$ секциями, входящими в каждую параллельную ветвь, равно частному от деления числа полюсов на число параллельных ветвей, т. е. $2p / a$, что может оказаться числом как четным, так и нечетным. Условие корректного формирования параллельных ветвей заключается в том, что для всех ветвей должно быть обеспечено равенство результирующих ЭДС по величине и фазе. В первую очередь это касается рабочей гармоники $k = p$, на чем обычно, анализ параллельных ветвей и заканчивается. Ниже показано, что отказ от учета возможности возникновения разностных ЭДС по нерабочим гармоникам не всегда оправдан.

ЭДС в отдельных ветвях могут отличаться или по фазе, или по амплитуде, или по обоим этим параметрам.

Если хотя бы одно из этих различий имеет место, то возникает небаланс ЭДС параллельных ветвей. Степень этого небаланса оценивается разностными ЭДС, обусловленными геометрической разницей результирующих ЭДС параллельных ветвей по указанным гармоникам.

Это приводит к возникновению уравнительных токов, протекающих по внутренним короткозамкнутым контурам статорной обмотки.

А иногда приходится нарушать условия создания параллельных ветвей, и нарушать главное правило $a_{\max} = 2p$, потому что в мощных современных генераторах становится невозможным удержать плотность тока в обмотке в допустимых пределах, и приходится увеличивать количество параллельных ветвей для уменьшения плотности тока в проводнике.

Если ЭДС параллельных ветвей неодинаковы по амплитуде, но

совпадают по фазе, т.е. эти ветви синфазные, что бывает в тех случаях, когда их распределение по пазам симметрично относительно некоторой оси, то разность ЭДС ветвей равна арифметической разности этих ЭДС ΔE , а уравнивающий ток между ними определяется так называемым сквозным индуктивным сопротивлением обмотки якоря X_c .

Для исследования условий возникновения уравнивающих ЭДС на базе активной части асинхронного двигателя с фазным ротором был построен макетный генератор с полюсопереключаемыми обмотками. Проведенные на нём эксперименты описаны ниже.

Д.1. Исследование форм кривых генерирующей обмотки

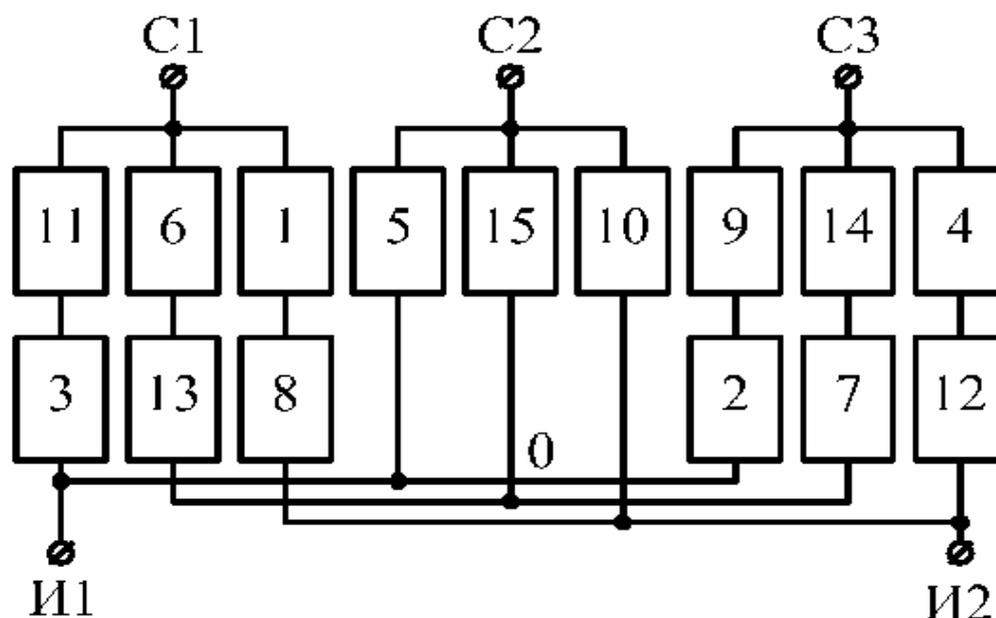


Рисунок Д. 1 – Схема обмотки ротора

На рис. Д. 1 показаны катушечные группы, и все возможные соединения катушечных групп для получения необходимых полей возбуждения, на схеме указано направления токов протекающих в секциях обмотки. На рис. Д. 2, Д. 3, Д. 4, изображены кривые МДС, которые могут генерироваться данной обмоткой, также указано направления токов в обмотках, построенный числовой ряд обмотки, и распределение фазных зон.

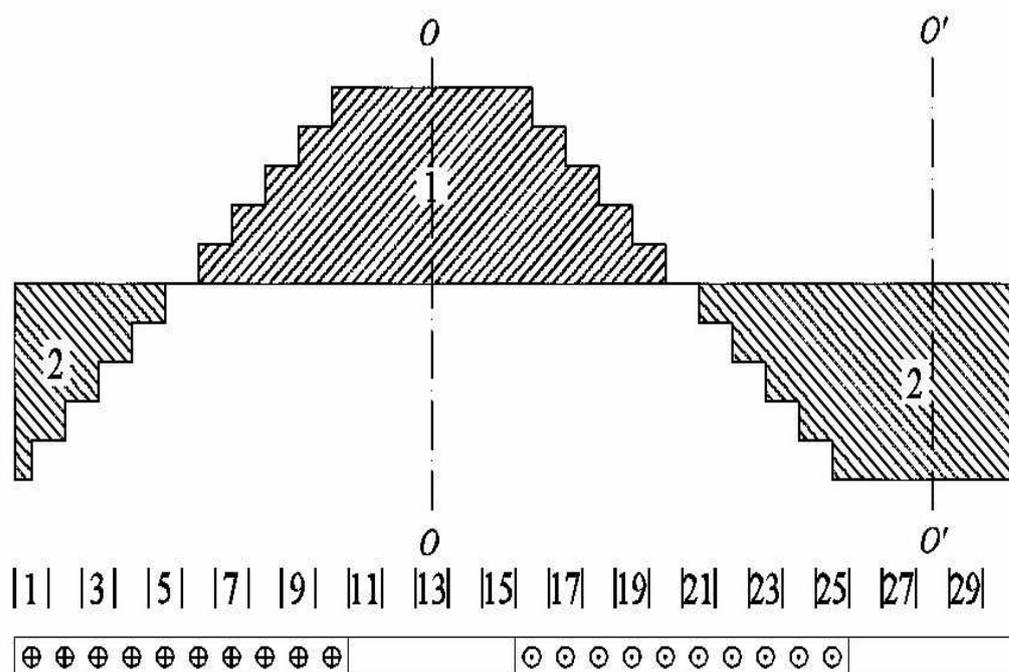


Рисунок Д. 2 – Распределение токов и кривая МДС обмотки ротора при питании с зажимов И1-И2

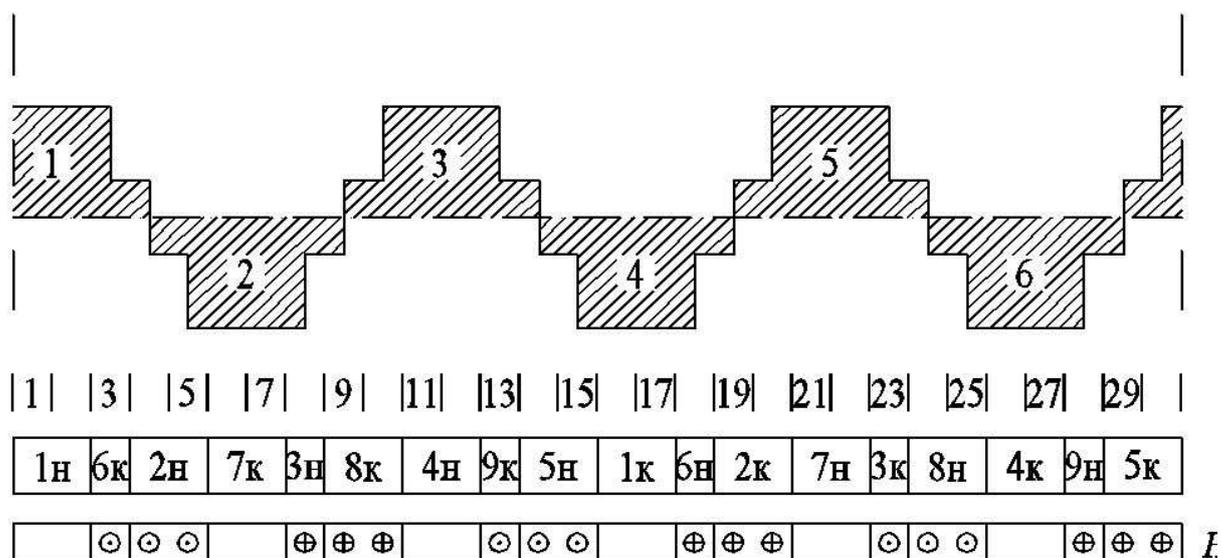


Рисунок Д. 3 – Распределение токов и кривая МДС обмотки ротора при питании с зажимов С1-С2

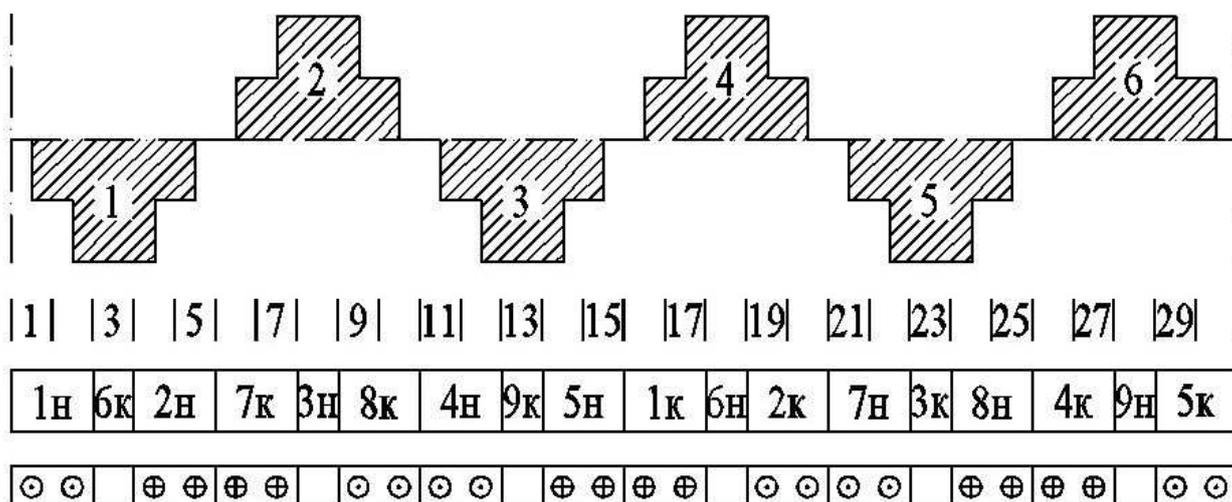


Рисунок Д. 4 – Распределение токов и кривая МДС обмотки ротора при питании с зажимов С1-С3

Вторая обмотка ротора генерирует только одно поле, это четырехполюсное поле. Кривая МДС изображена на рис. Д.5

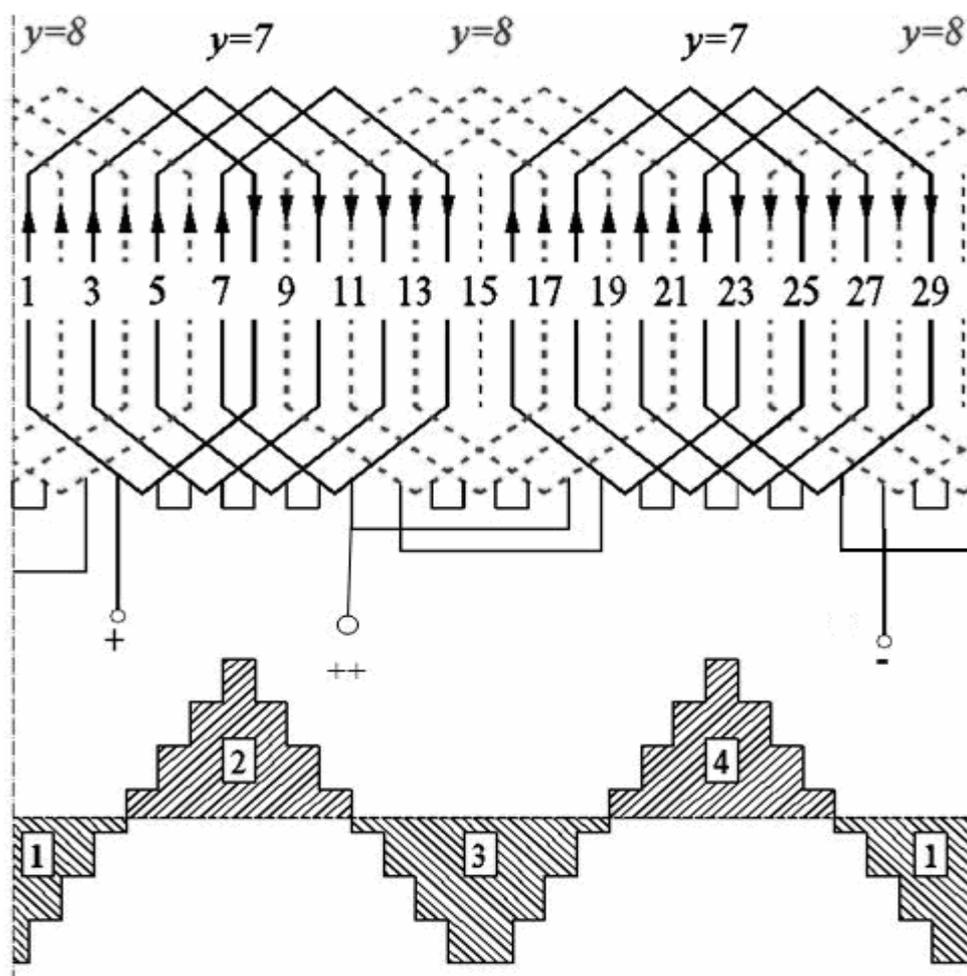
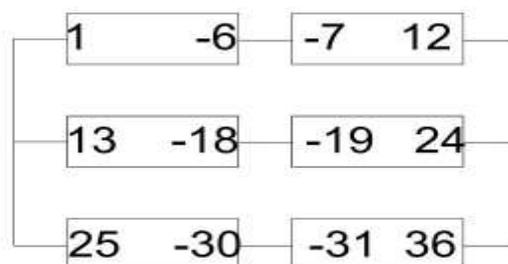


Рисунок Д. 5 – Кривая МДС четырехполюсным обмотки ротора

Д.2. Исследование разностных ЭДС и уравнивающих токов в обмотке с тремя параллельными ветвями.

При соединении в схему соединения, представленную на рис. Д.6 (обозначим её как «вариант А») мы имеем три параллельные ветви по две группы секций. Данная схема фильтрует гармоники четных порядков [40].



а)

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35										
A			x	x			A	A			x	x			A	A			x	x							A

б)

Рисунок Д.6 – Схема соединений (а) и числовой ряд (б) обмотки «вариант А»

Исследования обмотки проводилось при питании якоря постоянным током различной величины, и при трех вариантах включения возбуждения якоря, результаты этих исследований приведены в таблицах Д. 1, Д. 2, Д. 3.

Таблица Д.1 – Результаты испытания схемы при двухполюсном поле

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
2	3	3	3	5	5	5	1.67	20
2.5	3.6	3.6	3.6	6.2	6.2	6.2	1.72	17.7
3	4.4	4.4	4.4	7.8	7.8	7.8	1.77	20
3.5	5	5	5	9.2	9.2	9.2	1.84	20.4
4	5.6	5.6	5.6	9.6	9.6	9.6	1.71	18.1

Таблица Д.2 – Результаты испытаний схемы при четырехполюсным поле

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
3	30	30	30	52	52	52	1.73	28.8
3.5	35	35	35	60	60	60	1.71	30
4	38	38	38	38	67	67	1.76	29.2
4.5	43	43	43	74	74	74	1.72	28.5
5	48	48	48	84	84	84	1.75	28

Таблица Д.3 – Результаты испытаний схемы при шестиполюсном поле

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
3	8	8	8	0	0	0	0	0
3.5	9	9	9	0	0	0	0	0
4	10.8	10.8	10.8	0	0	0	0	0
4.5	12	12	12	0	0	0	0	0
5	13.2	13.2	13.2	0	0	0	0	0

Из приведенных таблиц видно, что наибольшие разностные ЭДС в схеме протекают именно при возбуждении от четырехполюсного поля, при возбуждении от двухполюсного поля разностные ЭДС не такие большие как при четырехполюсным поле и проявляются в меньшей степени, а при возбуждении шестиполюсным полем ЭДС протекают только в пазах, разностных ЭДС не выявлено так как векторы фаз совпадают по направлению.

Для проверки заменим соединение рядом расположенных катушек (1 -6) с (-7 12) и т. д. на соединение с диаметральной расположением вдоль расточки статора (1 -6) и (-19 24) и т. д. Эту схему соединения (рис. Д.7) обозначим как «вариант Б».

При соединении в схему «вариант Б» мы имеем три параллельные ветви по две группы секций, схема фильтрует гармоники парных порядков [40].

Таблица Д.5 – Результаты испытаний схемы при четырехполюсном поле

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
3	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Д.6 – Результаты испытаний схемы при шестиполюсном поле

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
3	7.2	7.2	7.2	0	0	0	0	0
3.5	9	9	9	0	0	0	0	0
4	10.2	10.2	10.2	0	0	0	0	0
4.5	12	12	12	0	0	0	0	0
5	13.2	13.2	13.2	0	0	0	0	0

Из таблиц приведенных выше, следует, что при двухполюсном поле разностные ЭДС проявляются в наибольшей степени, при четырехполюсном поле ЭДС в фазах и между ними отсутствуют полностью, это объясняется тем, что векторы развернуты на 180 градусов и их результирующие равны нулю.

Таблица Д.8 – Результаты исследования схемы соединения при поле питания

 $2p=4$

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
2	23.4	23.4	23.4	47.7	47.7	47.7	2.03	50.2
2.5	28.7	28.7	28.7	58.7	58.7	58.7	2.03	48.9
3	34	34	34	69.3	69.3	69.3	2.04	49.14
3.5	39.3	39.3	39.3	80.4	80.4	80.4	2.03	49.9
4	45.5	45.5	45.5	92.7	92.7	92.7	2.03	51.5

Таблица Д.9 – Результаты исследований схемы соединений при поле

питания $2p=6$

I_e	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
2	11.8	11.8	11.8	0	0	0	0	0
2.5	14.1	14.1	14.1	0	0	0	0	0
3	16	16	16	0	0	0	0	0
3.5	18.2	18.2	18.2	0	0	0	0	0
4	20.3	20.3	20.3	0	0	0	0	0

Судя по влиянию двухполюсного поля возбуждителя на схему, мы получили нули, потому что вектора ЭДС совпадают по направлению, исходя из этого разностных ЭДС не будет. Четырехполюсное поле возбуждителя наводит в обмотке большие разностные ЭДС, а относительная величина равна 2, это объясняется тем, что векторы фаз развернуты на 180 градусов, а их разностная ЭДС это их сумма.

Далее по аналогии с переходом от «варианта А» к «варианту Б» заменим соединение рядом расположенных катушек (1 -6), (-7 12) и (13 -18) и т. д. на соединение с пропуском катушки (через одну), а именно (1 -6), (13 -18) и (25 -30) и т. д. Эту схему соединения (рис. Д.9) обозначим как «вариант Г».

При соединении в схему «вариант Г» мы имеем две параллельные ветви включающие в себя по три катушечные группы, катушки соединены через

Таблица Д.12 – Результаты исследований схемы соединений при шестиполюсном поле

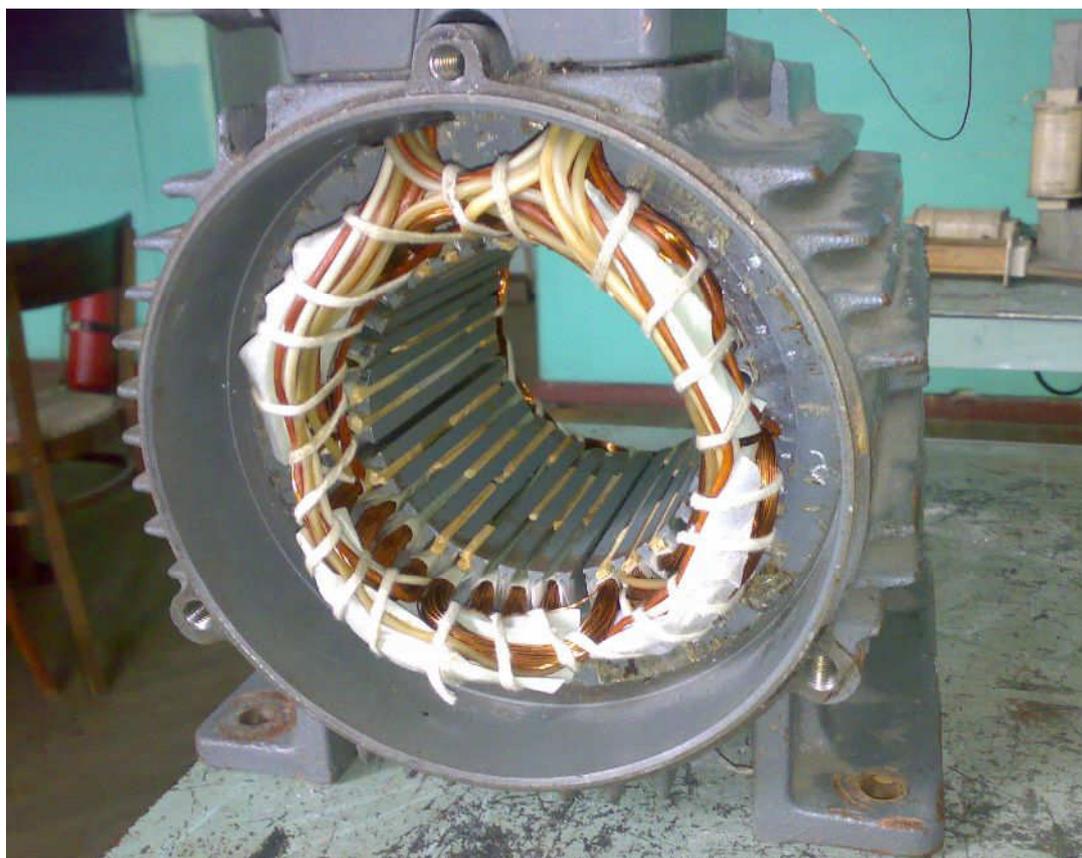
I_B	$E_{\phi 1}$	$E_{\phi 2}$	$E_{\phi 3}$	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3	ΔE^*	R
2	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0

Схема «вариант Г» при исследовании при всех вариантах возбуждения дает нули, так как при таком расположении катушечных групп разностные ЭДС не проявляют себя так как их векторы не имеют результирующих, и уничтожают друг друга.

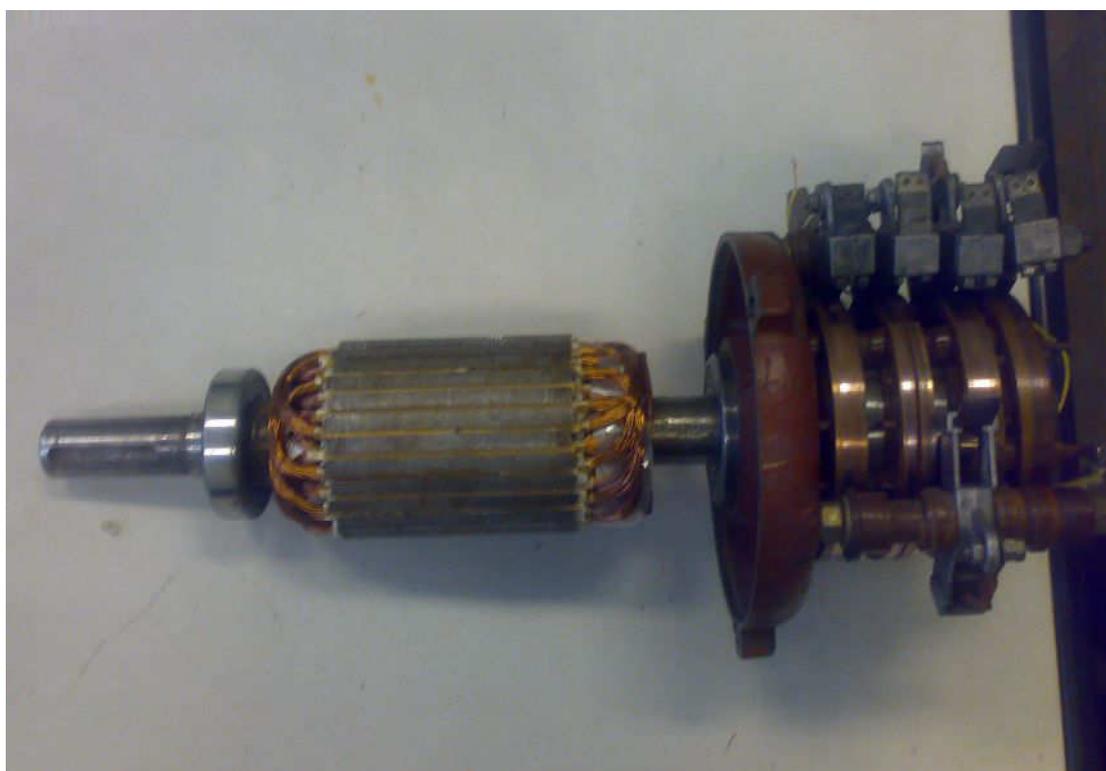
Д.4 Сравнение экспериментальных и расчетных данных

В этом подразделе сравниваются данные полученные в ходе расчета и данные полученные с помощью снятия эксперимента, проведенного на кафедре ЭМ ОНПУ.

Внешний вид макет совмещенного генератора для экспериментального исследования разностных ЭДС, представлен на рис Д.14. и Д.15. Машина создана на базе магнитной системы двигателя с фазным ротором с полной заменой обмоток. Схема стенда представлена на рис. Д.16.



а)



б)

Рисунок Д.14 – Статор (а) и ротор (б) макетного совмещенного генератора для исследования разностных ЭДС



Рисунок Д.15 – Макетный генератор для исследования разностных ЭДС с приводным двигателем в сборе

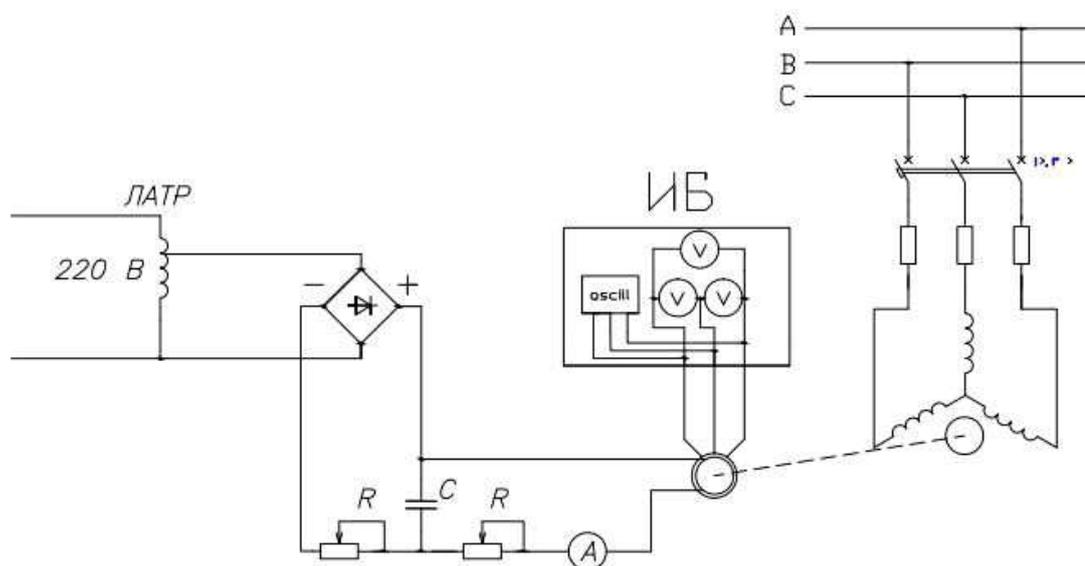


Рисунок Д.16 – Схема стенда.

В таблицах приведено сравнение экспериментальных данных и данных полученных с помощью расчета схемы в среде Excel. Также рассчитывается относительная погрешность между данными эксперимента и расчета.

Таблица Д.13 – Схема варианта А

Полюсность	$\Delta E^*_{\text{экс}}$	$\Delta E^*_{\text{розр}}$	Относительная погрешность
$2p=2$	1.742	1.73	0.006
$2p=4$	1.73	1.73	0
$2p=6$	0,00	0.00	0,00

Таблица Д.14 – Схема варианта Б

Полюсность	$\Delta E^*_{\text{экс}}$	$\Delta E^*_{\text{розр}}$	Относительная погрешность
$2p=2$	1.71	1.73	-0.011
$2p=4$	0	0	0
$2p=6$	0	0	0

Таблица Д.15 – Схема варианта В

Полюсность	$\Delta E^*_{\text{экс}}$	$\Delta E^*_{\text{розр}}$	Относительная погрешность
$2p=2$	0	0	0
$2p=4$	2.032	2	0.016
$2p=6$	0	0	0

Таблица Д.16 – Схема варианта Г

Полюсность	$\Delta E^*_{\text{экс}}$	$\Delta E^*_{\text{розр}}$	Относительная погрешность
$2p=2$	0	0	0
$2p=4$	0	0	0
$2p=6$	0	0	0

Из таблиц сравнения данных видно что эксперимент подтвердил данные которые мы ожидали получить после расчета схем в Excel, данные получены в ходе эксперимента были достаточно точны, поскольку относительная погрешность не превысила 2%.

$\Delta E^*_{\text{экс}}$ рассчитывалась по формуле

$$\Delta E^*_{\text{экс}} = \frac{\Delta E_1}{E_{\phi 1}}$$

По такой же формуле в программе написанной в среде Excel рассчитывается относительная величина. Относительная погрешность

рассчитывается по формуле $\delta = \left(\frac{\Delta E^*_{\text{экс}} - \Delta E^*_{\text{розн}}}{\Delta E^*_{\text{розн}}} \right)$

Проведенный сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и расчетных результатов определения разностных ЭДС параллельных ветвей для 4 вариантов схем соединения показал, что во всех случаях относительная ошибка не превышала 2%. Это свидетельствует об адекватности используемой математической модели.

Приложение Е

Результаты электромагнитного расчета асинхронных двигателей

Е.1. Расчет двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT»

Е.1.1 Файл исходных данных для расчета двигателя 4А112МА8 для программы «FLINT»

001010

1**' Текстовая стока ' ==> Формат - 18А4
 ==> 4А112А8 у=6 1-слойная

2**' Исходные данные для гармонического анализа МДС'
 ***' NP NZ NT KP KY2 KC NFZ KY1 KEY' ==> Формат - 7(i3,1x),f5.2,11
 ***'000 000 000 000 000 000 000 00.00 0'
 ==>004 048 008 -06 002 001 001 06.00 F

3**' Номера АКС / относ. числа витков' ==> Формат - 10(i3,3x)/10f6.2
 001 002
 -03 -04
 005 006

4**' Коэффициенты для электротехнической стали'
 ***' НКВ ВЕТА ANV ==> Формат - i4,f4.2,i3
 ***'0000 0.00 000
 ==>2212 1.30 000 Исправлен по Копылову И.П.

***' Основная кривая намагничивания стали (ННС1)'
 ***' для индукции в точках: ==> Формат - 15f5.2
 0 0.7 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3
 0 0.96 2.4 4.00 5.5 10.0 16.0 34. 77. 134. 194. 388. 740.1440. 2240.

***' Коэффициенты насыщения, формы поля и температуры'
 ***' Akf1 Akf2 Atemp' ==> Формат - 3f6.3
 ***'00.000 00.000 00.000'
 ==>1.0800 1.0000 041.00

***' Число фаз и пазов ротора, признак пазов статора и ротора'
 ***'NM1 NZ2 KPS KPR KIT'
 ***'000 000 000 000 0'
 ==>003 044 001 002 f

8**' Геометрия магнитопровода' ==> Формат - f6.3
 ***' P1050 NF1 DA D DEL AKS1 AKS2 DB DB2'
 ***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>01.500 050.00 191.00 132.00 0.3000 0.9300 0.9300 011.20 00.000

***' Статор ' ==> Формат - f6.3
 ***' D4 D3 HZ1 E1 BSH1 H4 HK'
 ***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>06.300 04.500 17.500 00.500 03.500 01.000 00.000

***' Ротор ' ==> Формат - f6.3
 ***' HZ2 SH2 BSH2 D1 D2 SSH2 BPSH AK BK'
 ***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>18.000 00.750 00.500 04.000 01.800 00.500 04.000 07.000 23.000

***' Ротор двухклеточный ' ==> Формат - f6.3
 ***' HZ2W1 HZ2N1 SH3 BSH3 D5 D6 HZ2W2 D7 D8'

***00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>23.000 15.000 00.000 00.000 06.800 03.600 15.000 04.000 00.000

 *** Обмоточные данные ' ==> Формат - f6.3
 *** P2H NUH NW1 LT1 LT2 DIZ DGO AKL1 NA1 NEL KPCL'
 ***00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 000 000 000'
 ==>02.200 220.00 312.00 100.00 100.00 01.120 01.040 040.00 001 001 001

 13* Если KPCL = 4 и KPS = 2'
 ***NRASP NWV NAV NELV DIZV '
 ***0000 0000 0000 0000 00.000'
 ==>0000 0000 0000 0000 0.0000

 14* Если KPCL = 4 и KPS = 2'
 ***NWN NAN NELN DIZN '
 ***0000 0000 0000 000.00'
 ==>0000 0000 0000 000.00

 15* Если KPCL не= 4 и KPS = 3'
 ***NELH NWH AG BG AIZ '
 ***000 000 00.000 00.000 00.000'
 ==>000 000 00.000 00.000 00.000

 16* Если KPCL = 4 и KPS = 3'
 ***NRASP NWHV NELVH AGV BGV AIZV'
 ***000 000 000 000.00 00.000 00.000'
 ==>000 000 000 000.00 00.000 00.000

 17* Если KPCL = 4 и KPS = 3'
 ***NWHN NELNH AGN BGN AIZN'
 ***000 000 000.00 00.000 00.000'
 ==>000 000 000.00 0.0000 00.000

 18* PMEX BCK GAM1 GAMR DELIS'
 ***00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>00.020 9.7000 041.00 024.00 00.250

 19* SP DS SNK PSH PSK PDS'
 ***00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
 ==>0.001 0.010 00.100 00.010 01.000 00.050

 20* KOIF1 KOIF2 AJDIN'
 ***00.000 00.000 00.000'
 ==>1.2700 01.200 00.550



Е.1.2 Результаты расчета характеристики холостого хода двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT»

E	AKM	IM	X12	BDEL	BZ1	BZ2	BC	BP	PC	PCC	PCZ	PZDS	PZDP	FSS
207.9	1.496	4.54	45.75	.910	1.934	1.785	1.422	.405	.067	.030	.036	.001	.000	924.363
99.0	1.047	1.69	58.47	.484	1.030	.950	.663	.189	.017	.006	.010	.000	.000	344.417
121.0	1.022	2.02	59.90	.592	1.259	1.162	.810	.231	.026	.010	.015	.001	.000	410.893
143.0	1.031	2.41	59.40	.700	1.488	1.373	.958	.273	.036	.013	.021	.001	.000	489.691
165.0	1.095	2.79	59.09	.764	1.625	1.499	1.116	.318	.045	.018	.026	.001	.000	568.001
187.0	1.410	3.80	49.20	.808	1.717	1.585	1.281	.365	.053	.024	.029	.001	.000	773.202
209.0	1.488	4.53	46.14	.912	1.939	1.789	1.429	.407	.067	.030	.036	.001	.000	921.411
231.0	1.827	5.90	39.13	.968	2.058	1.899	1.591	.454	.079	.037	.041	.001	.000	1200.932

Е.1.3 Результаты расчета гармонического анализа двигателя 4А112МА8 с помощью программы «FLINT» гармонический анализ „‘

P= 4 Z= 48 TC= 8 KP= -6 KY2= 2 KC= 1 NFZ= 1 Y= 6.000 KEY= F

1 2 -7 -8 13 14 -19 -20 25 26
-31 -32 37 38 -43 -44

-3 -4 9 10 -15 -16 21 22 -27 -28
33 34 -39 -40 45 46

5 6 -11 -12 17 18 -23 -24 29 30
-35 -36 41 42 -47 -48

V	KY	F-a	F-b	F-c	GAMA	GAMB	GAMC	Fпр	Fобр	Fo	KWPR	KWOBR	HPR	HOBR
4	1.000	15.455	15.455	15.455	45.000	285.000	165.000	15.455	.000	.000	.966	.000	1.000	.000
20	1.000	4.141	4.141	4.141	225.000	345.000	105.000	.000	4.141	.000	.000	.259	.000	.054
28	1.000	4.141	4.141	4.141	135.001	15.001	255.001	4.141	.000	.000	.259	.000	.038	.000
44	1.000	15.455	15.455	15.455	315.001	75.001	195.001	.000	15.455	.000	.000	.966	.000	.091
52	1.000	15.455	15.455	15.455	45.001	285.001	165.001	15.455	.000	.000	.966	.000	.077	.000

AKWP= .966 Td= .003979

Е.1.4. Результаты расчета рабочих характеристик двигателя 4А112МА8

SP	P1	P2	I1V	I21	Cosf	КПД	Кэф	Мэм	Рэ1	Рэ2	СР
о.е	кВт	кВт	А	А	о.е	о.е	о.е	Нм	кВт	кВт	кВт
.001	.29	-.04	4.61	.08	.095	-.128	-.012	.65	.24	.00	.33
.011	.79	.45	4.63	.90	.259	.575	.149	6.99	.24	.01	.34
.021	1.28	.91	4.81	1.69	.403	.710	.286	12.97	.26	.02	.37
.031	1.76	1.32	5.13	2.46	.519	.754	.392	18.56	.30	.05	.43
.041	2.22	1.70	5.54	3.21	.606	.769	.466	23.76	.34	.08	.51
.051	2.66	2.05	6.02	3.92	.670	.769	.516	28.59	.41	.12	.61
.061	3.09	2.36	6.53	4.62	.716	.763	.547	33.06	.48	.16	.73
.071	3.50	2.63	7.07	5.28	.749	.753	.564	37.17	.56	.21	.86
.081	3.88	2.88	7.61	5.92	.773	.741	.573	40.94	.65	.26	1.01
.091	4.25	3.09	8.12	6.54	.793	.728	.578	44.40	.74	.32	1.15
.100	4.56	3.27	8.57	7.07	.806	.716	.578	47.27	.83	.37	1.29

Е.1.5. Результаты расчета пусковых характеристик двигателя 4А112МА8

SP,	И,	I1V,	Мэм1,	Мпр,	Мобр,	Мэм1,	Мсум,	п,
о.е.	А	А	Нм	Нм	Нм	Нм	Нм	об\мин
.010	4.54	4.62	6.38	.00	.00	6.38	8.26	742.50
.056	6.28	6.27	30.84	.00	.00	30.83	40.06	708.06
.106	8.98	8.87	49.03	.00	-.01	49.02	63.97	670.56
.156	11.40	11.18	59.83	.00	-.01	59.81	78.48	633.06
.206	13.46	13.15	65.37	.00	-.02	65.35	86.32	595.56
.256	15.19	14.81	68.07	.00	-.02	68.05	90.56	558.06
.306	16.59	16.14	68.72	.00	-.03	68.69	92.17	520.56
.356	17.80	17.30	68.66	.00	-.03	68.62	92.90	483.06
.406	18.81	18.28	67.84	-.01	-.04	67.80	92.67	445.56
.456	19.69	19.12	66.63	-.01	-.04	66.58	91.93	408.06
.506	20.43	19.83	65.25	-.01	-.04	65.20	90.98	370.56
.556	21.08	20.45	63.74	-.01	-.05	63.68	89.86	333.06
.606	21.65	21.00	62.16	-.01	-.05	62.10	88.66	295.56
.656	22.15	21.47	60.48	-.01	-.06	60.41	87.32	258.06
.706	22.59	21.89	58.82	-.01	-.06	58.75	86.02	220.56
.756	23.00	22.28	57.20	-.02	-.06	57.12	84.76	183.06
.806	23.36	22.62	55.64	-.02	-.07	55.55	83.58	145.56
.856	23.70	22.94	54.15	.00	-.07	54.07	82.51	108.06
.906	24.00	23.23	52.72	.02	-.08	52.66	81.52	70.56
.956	24.28	23.50	51.35	.02	-.09	51.28	80.58	33.06
1.000	24.51	23.71	50.19	.02	-.10	50.10	79.79	.00

Е.2. Расчета двигателя 4А112МА6 с помощью программы «FLINT»

Е.2.1 Файл исходных данных для расчета двигателя 4А112МА6 для программы «FLINT»

```

001010
1**' Текстовая стока ' ==> Формат - 18A4
==> 4A112A6 y=8 1-слойная

-----

2**' Исходные данные для гармонического анализа МДС'
***' NP NZ NT KP KY2 KC NFZ KY1 KEY' ==> Формат - 7(i3,1x),f5.2,11
***'000 000 000 000 000 000 000 00.00 0'
==>003 048 002 -24 008 002 001 08.00 F

-----

3**' Номера АКС / относ. числа витков' ==> Формат - 10(i3,3x)/10f6.2
001 002 003 -09 -10 -11 017 018
007 008 -14 -15 -16 022 023 024
-04 -05 -06 012 013 -19 -20 -21

-----

4**' Коэффициенты для электротехнической стали'
***' NKВ ВЕТА ANV ==> Формат - i4,f4.2,i3
***'0000 0.00 000
==>2212 1.30 000 Исправлен по Копылову И.П.

-----

***' Основная кривая намагничивания стали (HNS1)'
***' для индукции в точках: ==> Формат - 15f5.2
0 0.7 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3
0 0.96 2.4 4.00 5.5 10.0 16.0 34. 77. 134. 194. 388. 740.1440. 2240.

-----

***' Коэффициенты насыщения, формы поля и температуры'
***' Akf1 Akf2 Atemp' ==> Формат - 3f6.3
***'00.000 00.000 00.000'
==>1.0800 1.0000 041.00

-----

***' Число фаз и пазов ротора, признак пазов статора и ротора'
***'NM1 NZ2 KPS KPR KIT'
***'000 000 000 000 0'
==>003 044 002 002 f

-----

8**' Геометрия магнитопровода' ==> Формат - f6.3
***' P1050 NF1 DA D DEL AKS1 AKS2 DB DB2'
***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
==>02.000 050.00 174.00 121.00 0.3000 0.9300 0.9300 010.00 00.000

-----

***' Статор ' ==> Формат - f6.3
***' D4 D3 HZ1 E1 BSH1 H4 HK'
***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
==>06.000 05.000 15.000 00.500 03.500 01.000 00.000

-----

***' Ротор ' ==> Формат - f6.3
***' HZ2 SH2 BSH2 D1 D2 SSH2 BPSH AK BK'

```

```

***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
==>18.000 00.750 00.500 04.000 01.800 00.500 04.000 07.000 23.000

```

```

-----
***'          Ротор двухклеточный          '      ==> Формат - f6.3
***' HZ2W1  HZ2N1  SH3  BSH3  D5  D6  HZ2W2  D7  D8'
==>23.000 15.000 00.000 00.000 06.800 03.600 15.000 04.000 00.000

```

```

-----
***'          Обмоточные данные          '      ==> Формат - f6.3
***' P2H  NUH  NW1  LT1  LT2  DIZ  DGO  AKL1  NA1  NEL  KPCL'
***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 000 000 000'
==>03.000 220.00 296.00 138.00 138.00 01.120 01.040 040.00 001 001 001

```

```

-----
13*' Если KPCL = 4 и KPS = 2'
***'NRASP  NWV  NAV  NELV  DIZV  '
***'0000  0000  0000  0000  00.000'
==>0000  0000  0000  0000  0.0000

```

```

-----
14*' Если KPCL = 4 и KPS = 2'
***'NWN  NAN  NELN  DIZN  '
***'0000  0000  0000  000.00'
==>0000  0000  0000  000.00

```

```

-----
15*' Если KPCL не= 4 и KPS = 3'
***'NELH  NWH  AG  BG  AIZ  '
***'000  000  00.000 00.000 00.000'
==>000  000  00.000 00.000 00.000

```

```

-----
16*' Если KPCL = 4 и KPS = 3'
***'NRASP  NWHV  NELVH  AGV  BGV  AIZV'
***'000  000  000  000.00 00.000 00.000'
==>000  000  000  000.00 00.000 00.000

```

```

-----
17*' Если KPCL = 4 и KPS = 3'
***'NWHN  NELNH  AGN  BGN  AIZN'
***'000  000  000.00 00.000 00.000'
==>000  000  000.00 0.0000 00.000

```

```

-----
18*' PMEX  BCK  GAM1  GAMR  DELIS'
***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
==>00.020 9.7000 041.00 024.00 00.250

```

```

-----
19*' SP  DS  SNK  PSH  PSK  PDS'
***'00.000 00.000 00.000 00.000 00.000 00.000'
==>0.001  0.010 00.100 00.010 01.000 00.050

```

```

-----
20*' KOIF1  KOIF2  AJDIN'
***'00.000 00.000 00.000'
==>1.2700 01.200 00.5

```

Е.2.3 Результаты расчета гармонического анализа двигателя 4А112МА6 с помощью программы «FLINT

-4 -5 -6 12 13 -19 -20 -21 28 29 30 -36 -37 43 44 45

V	KY	F-a	F-b	F-c	GAMA	GAMB	GAMC	Fпр	Fобр	Fo	KWPR	KWOBR	HPR	HOBR
3	1.000	15.258	15.258	15.095	42.125	160.375	281.250	.081	15.203	.188	.005	.950	.005	1.000
1	.500	2.000	2.000	2.637	322.500	225.000	273.750	.214	.654	1.758	.013	.041	.042	.129
5	.500	2.000	2.000	1.769	172.500	45.000	108.750	.370	.665	1.179	.023	.042	.015	.026
7	.500	2.000	2.000	3.788	97.500	135.000	116.250	.501	.130	2.525	.031	.008	.014	.00
9	1.000	9.999	9.999	9.197	124.351	123.149	123.750	.328	.207	9.731	.020	.013	.007	.005
11	.500	2.000	2.000	3.991	307.501	315.000	311.250	.370	.295	2.661	.023	.018	.007	.005
13	.500	2.000	2.000	.262	232.500	45.000	318.752	.598	.554	.174	.037	.035	.009	.008
15	1.000	2.853	2.853	2.744	184.627	107.874	326.250	2.682	.638	.576	.168	.040	.035	.008
17	.500	2.000	2.000	1.286	82.500	225.000	153.750	.654	.440	.857	.041	.027	.008	.005
19	.500	2.000	2.000	3.587	7.500	315.001	341.250	.044	.554	2.392	.003	.035	.000	.006
21	1.000	3.328	3.328	.119	148.296	189.205	168.750	.328	1.671	2.118	.021	.104	.003	.016
23	.500	2.000	2.000	3.007	217.501	135.001	176.251	.130	.631	2.005	.008	.039	.001	.005
25	.500	2.000	2.000	3.007	142.500	225.000	183.751	.631	.130	2.005	.039	.008	.005	.001
27	1.000	3.328	3.328	.119	211.704	170.796	191.252	1.671	.328	2.118	.104	.021	.012	.002
29	.500	2.000	2.000	3.587	352.501	45.000	18.751	.554	.044	2.392	.035	.003	.004	.000
31	.500	2.000	2.000	1.286	277.500	135.000	206.251	.440	.654	.857	.027	.041	.003	.004
33	1.000	2.853	2.853	2.744	175.373	252.127	33.750	.638	2.682	.576	.040	.168	.004	.016
35	.500	2.000	2.000	.262	127.500	315.000	41.253	.554	.598	.174	.035	.037	.003	.003
37	.500	2.000	2.000	3.991	52.501	45.001	48.751	.295	.370	2.661	.018	.023	.002	.002
39	1.000	9.999	9.999	9.197	235.650	236.852	236.251	.207	.328	9.731	.013	.020	.001	.002
41	.500	2.000	2.000	3.788	262.500	225.001	243.751	.130	.501	2.525	.008	.031	.001	.002
43	.500	2.000	2.000	1.769	187.501	315.001	251.250	.665	.370	1.179	.042	.023	.003	.002
45	1.000	15.258	15.258	15.095	317.876	199.626	78.751	15.203	.081	.188	.950	.005	.067	.000
47	.500	2.000	2.000	2.637	37.499	135.002	86.251	.654	.214	1.758	.041	.013	.003	.001
49	.500	2.000	2.000	2.637	322.499	225.004	273.751	.214	.654	1.758	.013	.041	.001	.003
51	1.000	15.258	15.258	15.095	42.126	160.377	281.251	.081	15.203	.188	.005	.950	.000	.059

AKWP= .950 Td= .012489

Е.2.2 Результаты расчета характеристики холостого хода двигателя 4A112MA6 с помощью программы «FLINT»

E	AKM	IM	X12	BDEL	BZ1	BZ2	BC	BP	PC	PCC	PCZ	PZDS	PZDP	FSS
207.9	1.416	7.54	27.58	1.176	2.500	2.308	2.042	.582	.160	.080	.079	.002	.000	1130.338
99.0	.698	2.03	48.82	.642	1.365	1.260	.922	.263	.041	.016	.023	.001	.000	304.080
121.0	.706	2.42	50.01	.757	1.610	1.486	1.127	.321	.058	.024	.033	.001	.000	362.843
143.0	1.078	4.04	35.41	.827	1.759	1.623	1.365	.389	.076	.036	.039	.001	.000	605.663
165.0	1.085	4.65	35.51	.945	2.010	1.855	1.576	.449	.100	.047	.051	.002	.000	696.724
187.0	.991	5.01	37.36	1.116	2.373	2.190	1.803	.514	.135	.062	.071	.002	.000	750.611
209.0	1.509	8.15	25.66	1.192	2.535	2.340	2.075	.591	.165	.082	.081	.002	.000	1221.589
231.0	2.344	13.66	16.91	1.287	2.736	2.525	2.352	.670	.202	.106	.094	.002	.000	2047.959

Е.2.4. Результаты расчета рабочих характеристик двигателя 4А112МА6

SP	P1	P2	I1V	I21	Cosf	КПД	Кэф	Мэм	Pэ1	Pэ2	CP
о.е	кВт	кВт	А	А	о.е	о.е	о.е	Нм	кВт	кВт	кВт
.001	.09	-.04	1.91	.07	.074	-.417	-.031	.43	.05	.00	.13
.011	.54	.39	2.00	.76	.406	.734	.298	4.61	.05	.01	.14
.021	.97	.79	2.34	1.44	.628	.818	.514	8.54	.07	.02	.18
.031	1.39	1.16	2.82	2.09	.745	.834	.621	12.19	.10	.04	.23
.041	1.79	1.48	3.35	2.72	.807	.831	.671	15.58	.15	.07	.30
.051	2.17	1.78	3.91	3.32	.841	.821	.691	18.70	.20	.10	.39
.061	2.53	2.05	4.46	3.90	.860	.808	.695	21.58	.26	.14	.49
.071	2.88	2.28	5.00	4.46	.872	.792	.691	24.21	.33	.18	.60
.081	3.20	2.49	5.53	4.99	.878	.776	.681	26.62	.40	.23	.72
.091	3.51	2.67	6.04	5.51	.880	.760	.669	28.80	.48	.28	.84
.100	3.77	2.81	6.49	5.95	.881	.745	.656	30.58	.56	.32	.96

Е.2.5. Результаты расчета пусковых характеристик двигателя 4А112МА6

SP,	И,	I1V,	Мэм1,	Мпр,	Мобр,	Мэм1,	Мсум,	п,
о.е.	А	А	Нм	Нм	Нм	Нм	Нм	об\мин
.010	2.09	1.98	4.21	.00	.00	4.21	5.45	990.00
.060	4.55	4.40	21.31	.00	.00	21.30	27.68	940.00
.110	7.14	6.97	32.39	.00	-.01	32.38	42.28	890.00
.160	9.28	9.08	38.96	-.01	-.01	38.94	51.13	840.00
.210	11.05	10.81	42.72	-.01	-.02	42.69	56.43	790.00
.260	12.50	12.22	44.53	-.02	-.02	44.49	59.23	740.00
.310	13.69	13.37	45.05	-.03	-.02	45.00	60.40	690.00
.360	14.68	14.31	44.82	-.05	-.03	44.74	60.60	640.00
.410	15.52	15.11	44.12	.02	-.03	44.10	60.32	590.00
.460	16.25	15.81	43.34	.03	-.04	43.34	59.87	540.00
.510	16.86	16.40	42.38	.01	-.04	42.35	59.15	490.00
.560	17.38	16.90	41.31	.00	-.04	41.27	58.30	440.00
.610	17.85	17.34	40.21	.00	-.05	40.16	57.41	390.00
.660	18.26	17.73	39.09	-.01	-.05	39.03	56.51	340.00
.710	18.62	18.08	38.00	-.02	-.05	37.93	55.63	290.00
.760	18.97	18.40	36.99	-.02	-.06	36.91	54.86	240.00
.810	19.28	18.70	36.00	.00	-.06	35.94	54.16	190.00
.860	19.57	18.97	35.07	.03	-.07	35.03	53.52	140.00
.910	19.83	19.22	34.17	.04	-.08	34.14	52.92	90.00
.960	20.07	19.44	33.31	.04	-.09	33.26	52.33	40.00
1.000	20.24	19.61	32.64	.03	-.10	32.57	51.88	.00

Приложение Ж
Акт изготовления и испытания опытного образца



АКТ

Изготовления и испытания опытного образца
 Асинхронного двигателя с несимметричной обмоткой

Комиссия в составе: председателя – начальника цеха В.И. Вудвуд, членов комиссии: технический директор – И.В. Ясинков, Инженер ОТ и ТБ – Е.М. Ковалёва.

Составила настоящий акт о том, что на 26.06.2013 г. В условиях производства ООО «Контакт» был изготовлен и испытан опытный образец асинхронного двигателя 4А112МА6УЗ мощностью 3.0 кВт с новой, несимметричной обмоткой предложенной Абдулкаримом Х.Г.

Председатель комиссии



В.И. Вудвуд

Члены комиссии

И.В. Ясинков

Е.М. Ковалёва

Приложение 3

Протокол испытаний экспериментального образца.

Протокол № 4024 - 34/14
электромеханических испытаний
асинхронного двигателя типа
4A112MB6 № б/п

- Цель испытаний: электромеханические испытания.
- Время проведения испытаний: 18.09.14 19.09.14
- Место испытаний: испытательная лаборатория ООО "НОВОКАХОВСКИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД" (свидетельство аттестации № РЧ-099/2012 от 12.11.2012г. ГП "Херсонстандартметрология")
- Условия проведения испытаний: нормальные по ГОСТ 15150-69.
- Программа испытаний: ГОСТ 183-74
- Испытательное оборудование и средства измерительной техники: На момент испытаний все испытательное оборудование и средства измерительной техники аттестованы и поверены в установленном порядке (см. таблица 2).
- Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметров	Обозн.	Едн. измер.	Расч.	Требования		Результат испытаний	
					норма	предельно допустимое отклонение	№ б/п	
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Режим работы	S	-		S1		S1	
	Полезная мощность	P_2	кВт		3,5		3,5	
	Напряжение	U	В	Y	380		380	
	Ток статора	I	А				9,35	
	Частота	f	Гц		50		50	
	Частота вращения	n_2	об/мин	949			936	
	Скольжение, не более	s	%	5,1		6,12	6,368	
	Коэффициент полезного действия, не менее	η	%	84		81,6	75,25	
	Коэффициент мощности, не менее	cos ϕ	-	0,85		0,828	0,756	
	Ток холостого хода	I_0	А				6,6	
	Потери холостого хода	P_0	Вт				399	
	Кратность начального пускового тока, не более	K_{Mn}	-				5,04	
	Номинальный момент	M	Нм				35,7	
	Кратность начального пускового момента, не менее	K_{Mn}	-	2		1,7	2,81	
	Кратность минимального момента, не менее	K_{Mmin}	-					
	Кратность максимального момента, не менее	K_{Mmax}	-	2,4		2,16	3,23	
	Сопротивление обмотки статора при 20°C	R_{20}	Ом				1,4056	
	Сопротивление изоляции обмотки статора хол.гор.	R_{M1}	МОм				>2000	
	Потери в стали	$P_{ст}$	Вт				352	
	Потери в обмотке статора	P_{M1}	Вт				506	
	Потери в обмотке ротора	P_{M2}	Вт				242	
	Потери механические	$P_{мех}$	Вт				30	
	Потери добавочные (0,005 P_2)	$P_{доб}$	Вт				24	
	Сумма потерь	ΣP	Вт				1152	
	Подаваемая мощность	P_1	Вт				4652	
	Ток короткого замыкания (дл.в)	I_k	А				11	
	Потери короткого замыкания (дл.в)	P_k	Вт				842,59	
	Класс изоляции обмоток статора					F	F	
	Вес двигателя, не более	G	кг				44,3	

Лист 2

Наименование и тип прибора	Зав. № прибора	Класс точности	Дата очередной поверки
Вольтметр Э59	№ 75668	0,5	01.06.2015г.
Амперметр Э538	№ 4070	0,5	01.06.2015г.
Амперметр Э538	№ 6683	0,5	01.06.2015г.
Амперметр Э538	№ 6973	0,5	01.06.2015г.
Вольтамперметр М2015	№ 12374	0,2	01.06.2015г.
Милливольтмиллиамперметр М2020	№ 14832	0,2	01.06.2015г.
Ваттметр Д5004	№ 49549	0,5	01.10.2014г.
Ваттметр Д50042	№ 586	0,5	01.10.2014г.
Ваттметр Д50202	№ 342	0,2	01.07.2015г.
Ваттметр Д50202	№ 614	0,2	01.07.2015г.
Ваттметр Д5020	№ 229	0,2	01.07.2015г.
Мегаомметр М1102	№ 240460	1	01.06.2015г.
Термометр ТТ	№ 13	0,05	01.05.2015г.
Прибор для измерения скольжения "Гном"	№ 206-1	1,5	28.04.2015г.

Испытывающий	Проверил	Начальник ЛИН
Самухвильева О.В.	Шаддарова И.Д.	Зарубовский Г.Г.
<i>19.09.2014г.</i>	<i>19.09.2014г.</i>	<i>22.09.2014г.</i>

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Державне підприємство "Херсонський науково-виробничий центр
стандартизації, метрології та сертифікації"

ДП "Херсонстандартметрологія"
73011, м. Херсон, вул. Сувєльня, 134-а

Свідоцтво про атестацію

№ РЧ-099 /2012

Видане 12 листопада 2012 року

Чинне до 12 листопада 2015 року

Це свідоцтво засвідчує, що випробувальна лабораторія ТОВ "Новокаховський електромеханічний завод" (74900, м. Нова Каховка, вул. Першотравнева, 35, тел. (05549) 4-24-16) відповідає критеріям атестації і атестована на проведення вимірювань у сфері та поза сферою поширення державного метрологічного нагляду.

Галузь атестації наведена в додатку до цього свідоцтва і є його невід'ємною частиною.

Керівник органу з атестації,

в.о. директора ДП "Херсонстандартметрологія"

К.А.Лясковець



ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА

20 г.

09

18

Обеспеченности исследования

Тип электродвигателя

4А118.1186

диз. №

87H

смет. факт.

№ п/п	д	в-дел.	с	a11		a12		a13		a1		10	10м	aPI	aP2	aP3	сP	Pc	Pm1	Pm2	Pct
				дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.										
	135	4		82,5	83,7	84,1	84,5							51,5	41	43	15				
	115	4		80,5	60,4	58,3	6,2							80,2	52	46,8	6				
	105	4		45,2	15,2	40,7	6,2							52,5	33	76,5	6				
	95	4		69	67,8	64,3	1,4							67	38	34,7	3				
	85	4		55,6	53,1	46,8	5,1							45,2	66	16	3				
	75	4		84,1	81,4	73,6	7,05							61	20	85,1	15				
	65	2		67,7	64,3	59,3	8,05							46,2	56	14	15				
	55	2		34,2	50,8	42,3	8,05							34,5	29,2	11	15				
	45	2		46,8	38,6	33,4	9,45							46,4	30,2	10	15				
	35	2		33	34,5	33,5	9,05							20	21	9	15				
				UM = 380 B																	

Исходными проект:

$$\frac{73,4}{16,8} \cdot \frac{3}{9,25} = 3,326 \text{ Dal}$$

4A1121466 № 811

18.09.14

Холодное сопротивление									Соед. физ	
U	I	R	U	I	R	U	I	R	Y	°C
3	0,75	-	-	-	-	-	-	-	$I_{нор} =$	23,5
50,5	70,5	1,4326	50,2	70,7	1,4201	50	70,6	1,4164	$R_{ср} =$	1,4249 Ом
56,7	79,1	1,4336	56,6	79,3	1,4275	56,1	79,3	1,4149	$R_{электр} =$	1,4056 Ом
63,4	88,5	1,4328	63	88,2	1,4286	62,6	88,3	1,4179	$3R_{соед} =$	5,7878 Ом
-	-	1,433	-	-	1,4254	-	-	1,4164	F	3,8585 Ом

Сопротивление изоляции в холодном состоянии $R_{изол} = > 200$

18.09.2014 г.

соед. физ.

Особенности исполнения

Механическая характеристика

Тип электродвигателя 4A1121466 зап. № 811

№ п/п	с		M _{норм}		M
	дел.	в. дел.	кг	дел.	
	96,2	4	26	97,3	М
	96,0	4	48,5	93,6	мм
	96,0	4	35	85,1	
	95,8	4	108	80,3	
	95,5	4	10,7	57,6	
	94,7	4	108	72,2	
	94,5	4	11,1	56,6	
	94,4	4	100	430	
	94,5	4	10,5	29,8	
	96,2	4	9,9	12,8	

ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

« 19 » г. 20.11. г.

Объемности исполнения

Тип электродвигателя

УДМЧ 112 КВВ

соед. фаз.

300 № БДН

№	к		Ik			Iк			Iк			Iк		Iк		Iк		Iк	Iк
	дел.	в-дел.	к	а11	а12	а13	СЭ	дел.	аР1	аР2	аР3	ср	Вт	аГ	Мк	OM	OM		
1	52	4	51	59,8	51,2	9,5			19,3-31		0	150		51					
2	81	4	78,4	26	78,8	9,5			78,3-24		0	150		78					
3	71	4	64,5	64,3	65,2	9,5			53-17		0	150		52					
4	120,5	2	53,5	58,3	55,8	0,5			66-10,2		0	100		39					
5	101	2	44,2	44,9	43,6	0,5			43-12		0	100		24					
6	127	1	54,3	23,5	26,4	0,15			111-18,2		0	15		9					
7	100	1	73	22,5	24,2	0,15			62,5-18,2		0	15		5					
8	76	1	55,5	33,4	37,2	0,16			38-5,8		0	15		15					

Вариант № 1
 Плечо 1 м
 И = 300 В
 К = 100 В
 Пс = 1000 об.мин.
 И = а

Испытания проведены

№ 19, 05

2017г.

УАНД.М.06. заа. № 074

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТИПА

Особенности исполнения: соед. фаз Y

I.				P ₁				P ₂														
а ₁	а ₂	а ₃	U _c	аP1	аP2	аP3	ср	свк	пб	прод.	с1	с2	с3	с4	с5	с6	с7	с8	с9	с10		
дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.															
18,7	27,2	22,2	0,15	98	47	0	45			3,77												
69,2	66,7	21,9	0,15	83,7	37	0	45			3,64												
63	61	60,3	0,15	79,2	30,3	0	45			6,46												
57	31,3	58,3	0,15	65,0	22,5	0	45			5,46												
30,4	48,3	47,8	0,15	56	13	0	45			3,81												
47	44,2	49,5	0,15	49	9	0	45			3,06												
44	42,7	48,3	0,15	44	2,2	0	45			1,06												

110-2800

P₂₁ = 8,5 кВт, R вкл. ПУ = 3,8585 Ом,

ИСПЫТАНИЯ ПРОВЕЛ

Приложение К

Результаты обработки экспериментальных данных холостого хода и короткого

Замыкания

Таблица К-1

Обработанные результаты опыта холостого хода при испытании

U_{10}	I_A	I_B	I_C	$I_{\text{ср}}$	P_a	P_b	P_c	P_{10}	$\cos\varphi$	ΔP_{e1}	$\Delta P_{\text{ст мех}}$
500	16,25	16,35	15,05	15,88	772,5	1065	645	2482,5	0,180	1273,3	1209,2
460	12,06	12,08	11,06	11,73	493,2	372	700,8	1566,0	0,168	695,0	871,0
420	9,04	9,04	8,14	8,74	315	198	459	972,0	0,153	385,9	586,1
380	6,9	6,78	6,13	6,60	201	294	104,1	599,1	0,138	220,3	378,8
340	5,36	5,21	4,68	5,08	135,6	198	48	381,6	0,127	130,7	250,9
300	4,22	4,07	3,68	3,99	91,5	30	127,65	249,2	0,120	80,5	168,7
260	3,385	3,215	2,965	3,19	69,3	84	21	174,3	0,121	51,4	122,9
220	2,71	2,54	2,365	2,54	51,75	58,8	16,5	127,1	0,131	32,6	94,5
180	2,14	1,98	1,62	1,91	39,6	42,3	15	96,9	0,162	18,7	78,2
140	1,65	1,495	1,415	1,52	30	31,5	13,5	75,0	0,203	11,7	63,3

Таблица К-2

Обработанные результаты опыта короткого
замыкания при испытании

$U_{кз}$	I_a	I_b	I_c	$I_{ср}$	P_a	P_b	P_c	$P_{1кз}$	$\cos\phi$	$M_{п}$
368	45,5	45,4	45,6	45,5	3478	3462,7	3493,3	10434	0,36	94
324	38,2	38	38,4	38,2	2451,5	2425,9	2477,2	7354,7	0,34	70
284	32,2	32,15	32,6	32,3	1747,3	1736,4	1785,4	5269,2	0,33	52
247	27,7	27,65	27,9	27,7	1293,7	1284,3	1307,7	3885,8	0,32	39
202	22,1	22,35	21,8	22,1	820,52	839,19	798,4	2458,1	0,31	24
127	14,1	14,02	14,4	14,2	336,13	330,45	351,27	1017,8	0,32	9
100	10,9	10,87	11,2	11,0	201,43	198,68	210,92	611,04	0,32	5
76	8,32	8,31	8,58	8,41	116,43	116,01	123,67	356,12	0,32	2,5

Приложение Л

Материалы внедрения результатов диссертационной работы

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та
науково педагогічної роботи
Одеського національного
політехнічного університету


Дмитришин Д.В.
“ 15 ” 2015 р.


АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Аль-хасун Хусейна Гені Абдулкаріма «Синтез і аналіз несиметричних обмоток
машин змінного струму», поданої на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

На кафедрі електричних машин в рамках для підготовки спеціалістів та магістрів за спеціальностями «Електричні машини і апарати» та «Електричний транспорт» у навчальний процес впровадженно результати дисертаційної роботи Аль-хасун Хусейна Гені Абдулкаріма «Синтез і аналіз несиметричних обмоток машин змінного струму». Матеріали дисертаційної роботи використовуються в лекційному курсі з дисципліни «Аналіз і синтез обмоток електричних машин». В лабораторному практикумі з цієї дисципліни використовується створена здобувачем програмна підсистема **Symmetry-23** із симетрування та синтезу обмоток з низким рівнем несиметрії магнітного поля.

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


Петрушин В.С.