

На правах рукописи

Честюнина Татьяна Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ С ДРОБНЫМИ
ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шевченко Александр Федорович

Официальные оппоненты: *Симонов Борис Ферапонтович*
доктор технических наук, академик РАН,
Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск
заведующий отделом виброимпульсных систем

Аксютин Валерий Аркадьевич
кандидат технических наук, доцент,
Новосибирский государственный технический
университет, доцент кафедры теоретических
основ электротехники

Ведущая организация: Научно производственное объединение
«ЭЛСИБ» ОАО, г. Новосибирск

Защита состоится «24» мая 2012 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «__» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Нейман В. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Свою историю электрические генераторы с постоянными магнитами (ПМ) ведут с 30-х годов прошлого столетия. Невысокие удельные показатели ПМ, от которых в первую очередь зависят технические и массогабаритные данные машины, ограничивали их применение. С разработкой новых материалов ПМ, обладающих высокой удельной магнитной энергией и коэрцитивной силой, и ростом их производства электрические генераторы с возбуждением от ПМ стали успешно конкурировать с генераторами с электромагнитным возбуждением. Применение новых материалов ПМ сопровождалось созданием новых конструктивных решений магнитных систем, использующих их особенности, и расширением области их применения. Большой вклад в развитие теории электрических машин с постоянными магнитами внесли ученые Балагуров В.А., Бертинов А.И., Бут Д.А., Галтеев Ф.Ф., Данилевич Я.Б., Ларионов А.Н., Ледовский А.Н., Овчинников Е.И., Осин И.Л., Шевченко А.Ф. и др.

Широкое применение машины с ПМ нашли в качестве синхронных генераторов в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ветроэнергетические установки (ВЭУ), малые ГЭС и др.), что объясняется высокой надежностью, простотой конструкции и малой инерцией ротора. Кроме высоких энергетических показателей от генераторов, работающих как в ВЭУ, так и в малых ГЭС, требуется работа при низких скоростях вращения (многополюсность), что успешно решается использованием дробных зубцовых обмоток с числом зубцов на полюс и фазу меньше единицы ($q < 1$).

Теория дробных зубцовых обмоток развита в работах кафедры электромеханики Московского энергетического института и Новосибирского государственного технического университета. По их практическому применению следует отметить работы А.Ф. Шевченко. В его работах проведена систематизация дробных зубцовых обмоток с $q < 1$, рассмотрены особенности их устройства и принципа действия.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в направлении развития теории и методов расчета и проектирования синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками, как в нашей стране, так и за рубежом, сохраняется необходимость в их совершенствовании. В результате анализа научных работ, посвященных СГПМ с дробными зубцовыми обмотками, и опыта их создания на кафедре электромеханики НГТУ были выявлены следующие проблемы, требующие рассмотрения:

- наличие большого спектра высших гармоник в поле возбуждения, вызванных особенностями конструкции магнитопровода статора и ротора и создающих дополнительные потери в машине;
- большая величина индуктивности дифференциального рассеяния, вызванная высшими и низшими гармониками поля реакции якоря и отсутствие точных методик по её расчету.

Таким образом, комплекс задач, связанный с исследованием магнитных полей и совершенствованием методик проектирования СГПМ с дробными зуб-

цовыми обмотками, крайне важен, исследования в данной области являются актуальными, имеют научную новизну и практическую ценность. В соответствии с указанными проблемами была сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Целью работы является исследование магнитных полей и методов расчета индуктивных параметров многополюсных синхронных генераторов с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой для двух конструкций индуктора (с тангенциально и радиально ориентированными магнитами).

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. По результатам исследования магнитного поля выявить влияние значения числа зубцов на полюс и фазу (q) на гармонический состав поля возбуждения.
2. Исследовать влияние геометрических соотношений зубцово - пазовой зоны электрической машины на амплитудные значения высших гармоник магнитного поля возбуждения, ЭДС и индуктивные параметры.
3. Проанализировать влияние насыщения магнитопровода на гармонический состав магнитного поля возбуждения и значения индуктивных параметров генератора.
4. На основании выполненных исследований разработать методы расчета индуктивных сопротивлений обмотки якоря и уточнить методику расчета СГПМ с дробной зубцовой обмоткой.
5. Провести сравнение результатов расчетов полученных в результате математического моделирования, аналитических расчетов и экспериментальных исследований.

Объектом исследования являются многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмотками ($q < 1$) с двумя конструкциями индуктора: с тангенциально и радиально ориентированными магнитами.

Предметом исследования являются магнитное поле в воздушном зазоре СГПМ с дробными зубцовыми обмотками и методы расчета индуктивных параметров.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены на базе основных теорем и уравнений электродинамики с использованием методов аналитического и численного моделирования, методов приближения функций (аппроксимация, сплайн-интерполяция и т.д.). Для анализа магнитного поля в машине использована программы конечно – элементного анализа *FEMM (Finite Element Method Magnetics)* в двумерной постановке задачи. Для сокращения числа обращений к расчету поля использован метод планирования эксперимента (МПЭ). Достоверность результатов исследования проверена путем параллельного расчета различными методами, а также сопоставлением расчетных и экспериментально полученных параметров и характеристик электрических машин.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Исследовано и количественно оценено влияние соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны на гармонический состав поля возбуждения, ЭДС и индуктивные параметры СГПМ с дробными зубцовыми обмотками.
2. Показана взаимосвязь значения числа зубцов на полюс и фазу (q) и гармонического состава поля возбуждения для СГПМ с дробными зубцовыми обмотками.
3. Проведено исследование влияния насыщения магнитопровода на высшие гармоники в поле возбуждения и значения индуктивных параметров СГПМ с дробными зубцовыми обмотками.
4. Получены аналитические выражения для расчета полных индуктивных сопротивлений СГПМ с дробными зубцовыми обмотками для применения при проведении инженерных расчетов.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны на гармонический состав поля возбуждения, ЭДС и индуктивные параметры СГПМ с дробными зубцовыми обмотками.
2. Результаты исследований влияния насыщения магнитной цепи на гармонический состав поля возбуждения и индуктивные параметры СГПМ с дробными зубцовыми обмотками.
3. Формулы для расчета полных индуктивных сопротивлений СГПМ с дробными зубцовыми обмотками учитывающих конфигурацию ротора и свойства постоянных магнитов.

Практическая значимость работы.

1. Предложены рекомендации по выбору соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны для уменьшения преобладающих высших гармоник в поле возбуждения и форме кривой ЭДС генератора.
2. Получены полиномы, позволяющие оценить влияние соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны и магнитной проводимости постоянных магнитов на собственные индуктивности по осям d , q и предварительно вычислить их значения.
3. Предложены аналитические выражения для расчета полных индуктивных сопротивлений СГПМ с дробными зубцовыми обмотками для применения при проведении инженерных расчетов. Получены коэффициенты для расчета полных индуктивных сопротивлений для различных значений q .
4. Разработаны схемы замещения магнитной цепи СГПМ с дробными зубцовыми обмотками для двух конструкций индуктора: коллекторного типа и с радиально ориентированными магнитами.

Апробация. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях: IV международный форум по стратегическим технологиям «IFOST- 2009». Хошимин. 2009; IV научно-техническая конференция с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2009». Новосибирск. 2009; XVII Меж-

дународная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (СТТ-2011). Томск. 2011; Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2011). Новосибирск. 2011.

Реализация. Результаты работы используются на кафедре «Электромеханика» НГТУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 1 публикация в сборнике научных трудов, 4 статьи в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Общий объем 176 страниц. Основная часть изложена на 173 страницах машинописного текста, иллюстрирована 81 рисунком, 34 таблицами. Список литературы содержит 98 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ современного состояния и перспективы использования низкоскоростных СГПМ. Показана перспективность их применения в ВЭУ и малых ГЭС. Сформулированы основные проблемы создания генераторов, работающих на малой частоте вращения. Обосновано применение дробной зубцовой обмотки.

В главе рассматриваются свойства постоянных магнитов. Показаны преимущества и ограничения каждой из рассматриваемых марок. На выбор марки ПМ влияет ряд следующих факторов: конструктивная схема индуктора и ограничения по массогабаритным показателям машины, диапазон рабочих температур, а так же требование к возможности размагничивания ПМ в процессе работы машины.

Выполнен обзор существующих конструктивных схем индукторов СМПМ. Для исследования выбраны две конструкции индуктора: с ротором коллекторного типа и с ротором с наружным расположением радиально ориентированных магнитов.

Описан способ построения дробных зубцовых обмоток. Проведен гармонический анализ м.д.с., создаваемый этими обмотками. При этом показано, что дробные зубцовые обмотки создают две основные гармоники м.д.с. с близкими полюсностями, соизмеримой амплитуды и перемещающиеся в воздушном зазоре в противоположных направлениях. Складываясь, гармоники создают результирующее магнитное поле, которое и участвует в преобразовании энергии в электрической машине.

Во второй главе проведено исследование поля возбуждения СГПМ с дробными зубцовыми обмотками на базе численного моделирования, сформулированы основные задачи исследования: анализ гармонического состава поля возбуждения в зависимости от значения $q = c/d$, исследование влияния геометрических соотношений поверхности статора и ротора на амплитуды преобладающих гармоник в поле возбуждения для выбранных конструкций индукторов, исследование влияния насыщения материала магнитопровода на преобладающие гармоники поля возбуждения.

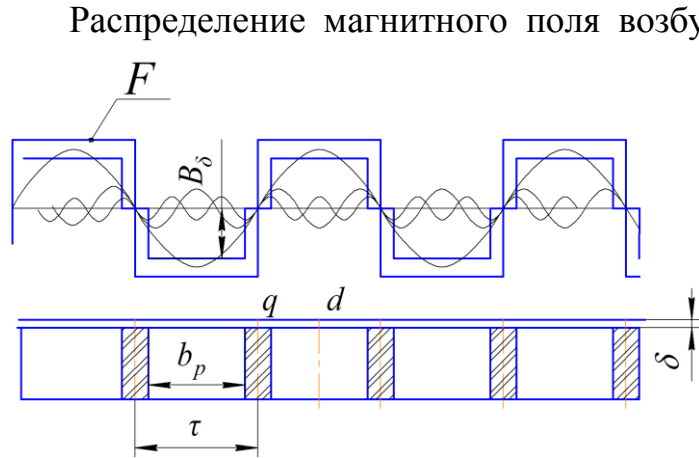


Рис. 1 - Поле возбуждения в воздушном зазоре СГПМ с $q > 1$ при гладком статоре

значительно отличается от синусоидальной формы. В синхронных машинах с $q > 1$ при исследовании магнитного поля возбуждения пренебрегают зубчатостью статора (что допустимо при $m_q > 3$), магнитным сопротивлением магнитопровода и краевыми эффектами, т.к. $\delta \ll \tau$, в этом случае индукция поля возбуждения в воздушном зазоре в пределах полюсной дуги распределена по прямоугольному закону и, соответственно, при разложении её в ряд Фурье содержит наряду с основной гармоникой весь спектр нечетных гармонических составляющих (рис. 1).

В СМПМ с дробной зубцовой обмоткой якоря ($q < 1$) с учетом их конструктивных особенностей распределение магнитного поля возбуждения значительно сложнее (рис. 2). Число пазов статора в таких машинах незначительно отличается от числа полюсов ротора. В элементарной машине число пазов на статоре Z' отличается от числа полюсов $2p'$ на $1 \div 2$ единицы. В этом случае зубцово - пазовую зону статора можно рассматривать как структуру с явно выраженными полюсами (каждый зубец – полюс). Периоды повторяемости элементарной обмотки якоря и

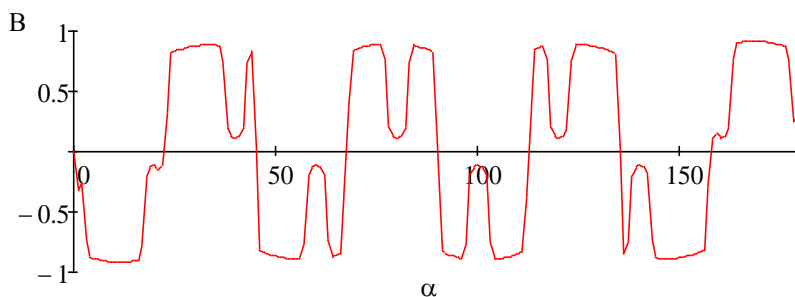


Рис. 2 – Форма кривой индукции в воздушном зазоре СГПМ с $q < 1$ с учетом конструктивных особенностей

м.д.с. поля возбуждения не равны и не кратны друг другу. Исходя из этого, исследование магнитного поля возбуждения синхронной машины с дробной зубцовой обмоткой необходимо проводить на периоде элементарной обмотки якоря и

м.д.с. поля возбуждения не равны и не кратны друг другу. Исходя из этого, исследование магнитного поля возбуждения синхронной машины с дробной зубцовой обмоткой необходимо проводить на периоде элементарной обмотки якоря, а не на полюсном делении, как это принято в машинах с обмотками с $q \geq 1$. За рабочую гармонику поля при этом принимается не первая, а одна

из высших гармоник $\nu_{\text{осн}} = \nu_p$, порядок которой определяется числом пар полюсов p' элементарной обмотки и равен: $\nu_{\text{осн}} = p' = d/2$ при d – четное число и $\nu_{\text{осн}} = p' = d$ при d – нечетное число.

В работе анализ гармонического состава поля возбуждения в зависимости от значения $q = c/d$ проводился для конструкции с ротором коллекторного типа (рис. 3), для следующих значений $q = 1/2, 2/5, 3/8, 4/11, 5/14$. Для удобства проведения исследований параметры, характеризующие конфигурацию поверхностей статора и ротора, примыкающих к воздушному зазору выражены в безразмерных величинах: $b_{\text{ш1}}/t_1$ – относительное открытие паза статора, $b_{\text{ш2}}/h_M$ – относительное открытие паза ротора, δ/t_1 – относительная величина воздушного зазора, здесь, t_1 – величина зубцового деления статора, h_M – высота магнита, b_M – ширина магнита, $b_{\text{ш1}}$ – ширина открытия паза статора, $b_{\text{ш2}}$ – ширина

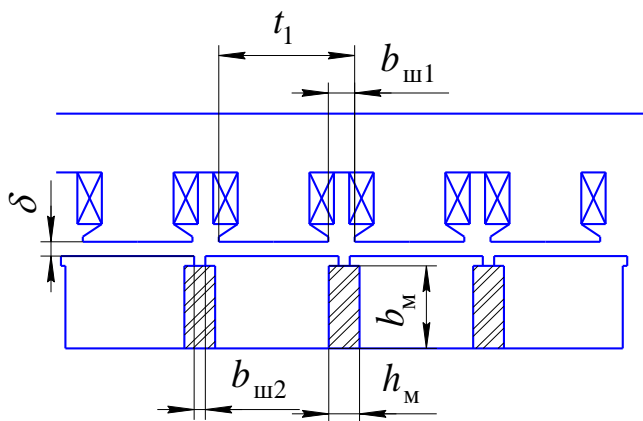


Рис. 3 – Зубцово пазовая зона генератора с ротором коллекторного типа

шина открытия паза ротора, δ – величина воздушного зазора. Расчеты велись из допущений, что глубина паза статора и ширина магнита (в диапазоне размеров принимаемых при проектировании исследуемых машин) не оказывает влияние на форму поля возбуждения, что позволило исключить эти параметры из рассмотрения. Для всех конструкций были выбраны одинаковые соотношения, характеризующие геометрию

зубцово - пазовой зоны в относительных величинах, а именно: $b_{\text{ш1}}/t_1 = 0.3$, $b_{\text{ш2}}/h_M = 0.5$, $\delta/t_1 = 0.02$.

По результатам расчета магнитного поля, выполненного методом конечных элементов (МКЭ) получено, что в магнитном поле возбуждения всех рассмотренных машин содержатся гармоники вызванные особенностями конструкции ротора, порядок которых определяется следующим образом:

$$\nu_{z2} = k\nu_{\text{осн}} \quad (1)$$

где $k = 3, 5, 7, \dots$, $\nu_{\text{осн}}$ – рабочая гармоника для конкретного значения q , и гармоники поля, вызванные особенностями конструкции статора, порядок которых определяется по следующим соотношениям:

для d нечетного

$$\nu_{z1} = (d + 1) \pm 1 + k2mc = (p + 1) \pm 1 + kZ_1 \quad (2)$$

для d четного

$$\nu_{z1} = [(d + 1) \pm 1] / 2 + kmc = [(2p + 1) \pm 1] / 2 + kZ_1 \quad (3)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$, c и d числитель и знаменатель дроби для соответствующего $q = c/d$, Z_1 – число зубцов статора.

При этом, гармоники поля возбуждения, вызванные конструктивными особенностями ротора, не меняют форму поля при вращении ротора и вращаются с одной и той же угловой скоростью, равной скорости вращения ротора $\Omega_v = \Omega$ и вызывают добавочные магнитные потери в магнитопроводе статора. Гармонические составляющие, порядка ν_{z1} перемещаются со своими угловыми скоростями $\Omega_v = \frac{\Omega}{\nu}$ и вызывают добавочные потери в магнитомягких полюсах ротора коллекторного типа.

В работе доля высших гармоник в кривой поля в воздушном зазоре оценивалась с помощью коэффициента искажения синусоидальности периодической кривой:

$$k = \sqrt{\sum_{\nu \neq \text{осн}} B_\nu^2} / B_{\text{осн}}, \quad (4)$$

где: $B_{\text{осн}}$ – амплитуда рабочей гармоники индукции в воздушном зазоре; B_ν – амплитуды ν - тых гармоник магнитной индукции. Исследования проводились для $q = 3/8$, качественно полученные результаты могут быть распространены и на другие значения $q < 1$. Изменение коэффициента k , а так же относительных величин преобладающих гармоник поля возбуждения $k_\nu = B_\nu / B_{\text{осн}}$ (для $q = 3/8$ это 5-я, 12-я и 13-я), было получено для всех практически реализуемых вариантов соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны в области воздушного зазора. Исследования проводились для двух конструкций индуктора без учета насыщения магнитопровода, интервалы варьирования геометрии для ротора коллекторного типа составляли $\delta/t_1 = 0.015 \div 0.06$, $b_{\text{ш1}}/t_1 = 0.1 \div 0.4$, $b_{\text{ш2}}/h_M = 0.2 \div 1$ (рис. 3), для ротора с радиально ориентированными магнитами - $\delta/t_1 = 0.015 \div 0.06$, $b_{\text{ш1}}/t_1 = 0.1 \div 0.4$, $\alpha_\delta = b_M/\tau = 0.7 \div 0.9$ (рис. 4). Для сокращения обращений к расчету поля результаты обрабатывались методом планирования эксперимента.

В результате проведенных исследований были получены полиномы, показывающие влияние выбранных параметров характеризующих зубцово - пазовую зону в области воздушного зазора на коэффициенты k и k_ν . Согласно анализа этих полиномов выработаны следующие рекомендации: 1) для уменьшения гармоник поля порядка ν_{z2} в машинах с ротором коллекторного типа следует открытие пазов ротора выполнять в диапазоне $0.7 \leq b_{\text{ш2}}/h_M \leq 1$, с ротором с радиально ориентированными магнитами отношение ширины магнита к полюсному делению должно выбираться из диапазона $0.7 \leq b_m/\tau \leq 0.8$; 2) для уменьшения гармоник поля порядка ν_{z1} величину относительного открытия пазов статора следует выбирать не более 0.3 для обеих конструкций ротора; 3) относительную величину воздушного зазора следует выбирать в диапазоне $0.2 \leq \delta/t_1 \leq 0.35$, при меньших значениях возрастают амплитуды гармоник порядка ν_{z1} , при больших амплитуды гармоник порядка ν_{z2} .

Для выбранных конструкций СГПМ со следующими соотношениями, характеризующими геометрию

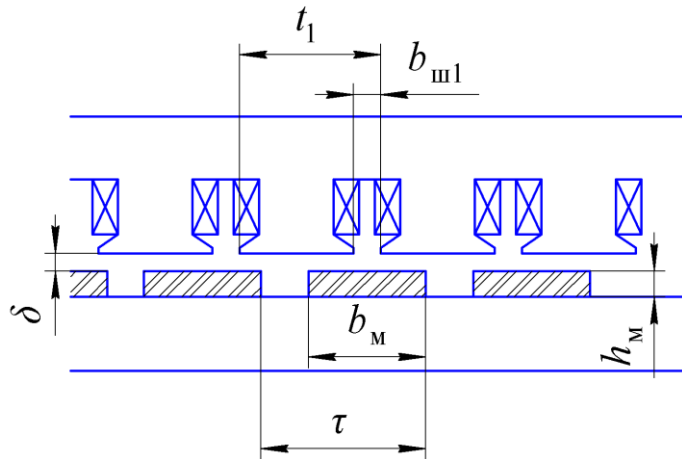
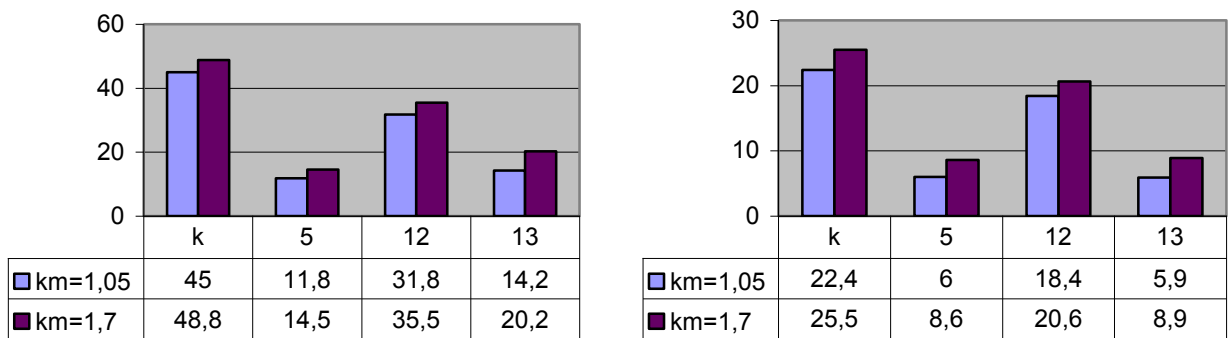


Рис. 4 – Зубцово пазовая зона генератора с ротором с радиально ориентированными магнитами

зубцово - пазовой зоны $\delta/t_1 = 0.03$, $b_{ш1}/t_1 = 0.2$, для ротора коллекторного типа - $b_{п2}/t_2 = 0.4$, для ротора с радиально ориентированными магнитами - $\alpha_\delta = 0.8$ получены зависимости коэффициентов k и k_v от коэффициента насыщения магнитной цепи $k_\mu = F_\Sigma / F_\delta$. При увеличении магнитного потока поля возбуждения, увеличивается магнитное сопротивление всех участков магнитной цепи

и наиболее сильно увеличивается сопротивление шлицевой зоны зубцов статора и ротора (в конструкции коллекторного типа) фактически увеличивая открытия пазов статора и ротора что приводит к росту амплитуд всех гармоник (рис. 5).



а)

б)

Рис. 5 –Значения преобладающих гармоник при изменении коэффициента насыщения для СГПМ с ротором: а) коллекторного типа, б) радиально ориентированными магнитами

В главе проведено исследование влияния высших гармоник поля возбуждения на форму ЭДС для описанных выше конструкций. Исследования показали, что форма ЭДС практически синусоидальна. Для обеих конструкций характерно наличие нечетных гармоник. Это объясняется тем, что гармоники поля возбуждения порядка ν_{z2} наводят ЭДС с различными частотами, пропорциональными порядку гармоник. Следовательно, они представляют собой временные гармонические кривой изменения ЭДС. Влияние этих гармонических зависит от соотношения $E_{\phi\nu} / E_{\phi p} = k_{ov} B_{vm} / k_{op} B_{pm}$. Благодаря большому значению амплитуды и обмоточного коэффициента для гармоники $3\nu_p$ её влияние оказывается наиболее существенным. Гармоники поля порядка ν_{z1} индуктируют в обмотке статора ЭДС одной и той же частоты, совпадающей с частотой ЭДС от рабочей гармоники, и поэтому не искажают форму ЭДС.

В третьей главе проведено исследование индуктивных параметров СГПМ с дробной зубцовой обмоткой. Рассмотрены особенности определения индуктивных параметров на базе численного расчета магнитного поля в активном объеме машины по различным методикам, предложен метод расчета по среднеквадратичным значениям тока и потокосцепления обеспечивающий более точный учет реальной геометрии и конфигурации машины, а также учет насыщения ферромагнитных участков магнитопровода от полей высших и низших гармоник. Согласно этому методу для определения собственных индуктивностей предложен следующий порядок действий:

1. ротор модели ориентируется относительно фазы с целью определения индуктивности L_d или L_q ;
2. моделируется поле в режиме холостого хода и определяется на основе этого потокосцепление $\psi_{\text{фм}}$ рассматриваемой фазы;
3. моделируется магнитное поле для n значений фазных токов, соответствующих моментам времени трехфазной, симметричной системы токов обмоток;
4. рассчитываются среднеквадратичные (действующие) значения потокосцеплений и тока по соотношениям:

$$\Psi_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\psi_{\text{фам},i} - \psi_{\text{фм}})^2}, \quad I_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i_{\text{ф},i}^2}; \quad (5)$$

5. определяются синхронные индуктивности обмотки

$$L_d = \Psi_{\text{ф}d} / I_{\text{ф}d} + L_{\text{л}}, \quad L_q = \Psi_{\text{ф}q} / I_{\text{ф}q} + L_{\text{л}}, \quad (6)$$

где $L_{d,q}$ индуктивность обмотки по оси d или q в зависимости от принятой ориентации ротора относительно оси фазы, $L_{\text{л}}$ - индуктивность лобового рассеяния.

Проведены исследования влияния на собственные индуктивности по осям d и q величины воздушного зазора, открытия пазов статора и магнитной проводимости ПМ для обеих конструкций индукторов. Для исследований магнитная проводимость ПМ $\Lambda_{\text{м}} = \mu_{\text{м}} b_{\text{м}} l_{\text{м}} / h_{\text{м}}$ выражена в качестве безразмерной величины: $\Lambda_{\text{м}}^* = \Lambda_{\text{м}} / \Lambda_{\text{б}}$. В качестве базисной величины проводимости $\Lambda_{\text{б}}$ была взята проводимость полюсного деления при гладком воздушном зазоре $\Lambda_{\text{б}} = \mu_0 \tau l_{\delta} / \delta$. Диапазоны варьирования этих величин для ротора коллекторного типа составляют: $\delta / t_1 = 0.015 \div 0.06$, $b_{\text{ш1}} / t_1 = 0.1 \div 0.4$, $\Lambda_{\text{м}}^* = (0.076 \div 0.27)$, пазы на роторе приняты открытыми; для ротора с радиальными магнитами: $\delta / t_1 = 0.015 \div 0.06$, $b_{\text{ш1}} / t_1 = 0.1 \div 0.4$, $\Lambda_{\text{м}}^* = (0.09 \div 0.27)$.

Для сокращения обращений к расчету поля результаты обработаны методом планирования эксперимента. В результате получены полиномы, характеризующие зависимости собственных индуктивностей от выбранных параметров. Выражения для индуктивностей по осям d и q получены в относительных единицах (L_d^* и L_q^* соответственно).

$$L_{d,q}^* = L_{d,q} \text{ расч} / L_{11} \quad (7)$$

где: $L_{d,q \text{ расч}}$ - индуктивность, полученная из расчета магнитного поля по осям d и q , а L_{11} - собственная индуктивность фазы при гладком воздушном зазоре рассчитываемая по формуле:

$$L_{11} = W_k^2 \Lambda_{11} c (Z_1 - 1) / Z_1 \quad (8)$$

здесь $\Lambda_{11} = \mu_0 \pi D_a l_a / \delta Z_1$ - проводимость зубцового контура.

Зная геометрию зубцово - пазовой зоны и используя значения L_d^* и L_q^* возможно предварительно вычислить значения собственных индуктивных сопротивлений по осям d и q (рис.6, рис.7):

$$L_{ad} = L_d^* L_{11} \quad \text{и} \quad L_{aq} = L_q^* L_{11}$$

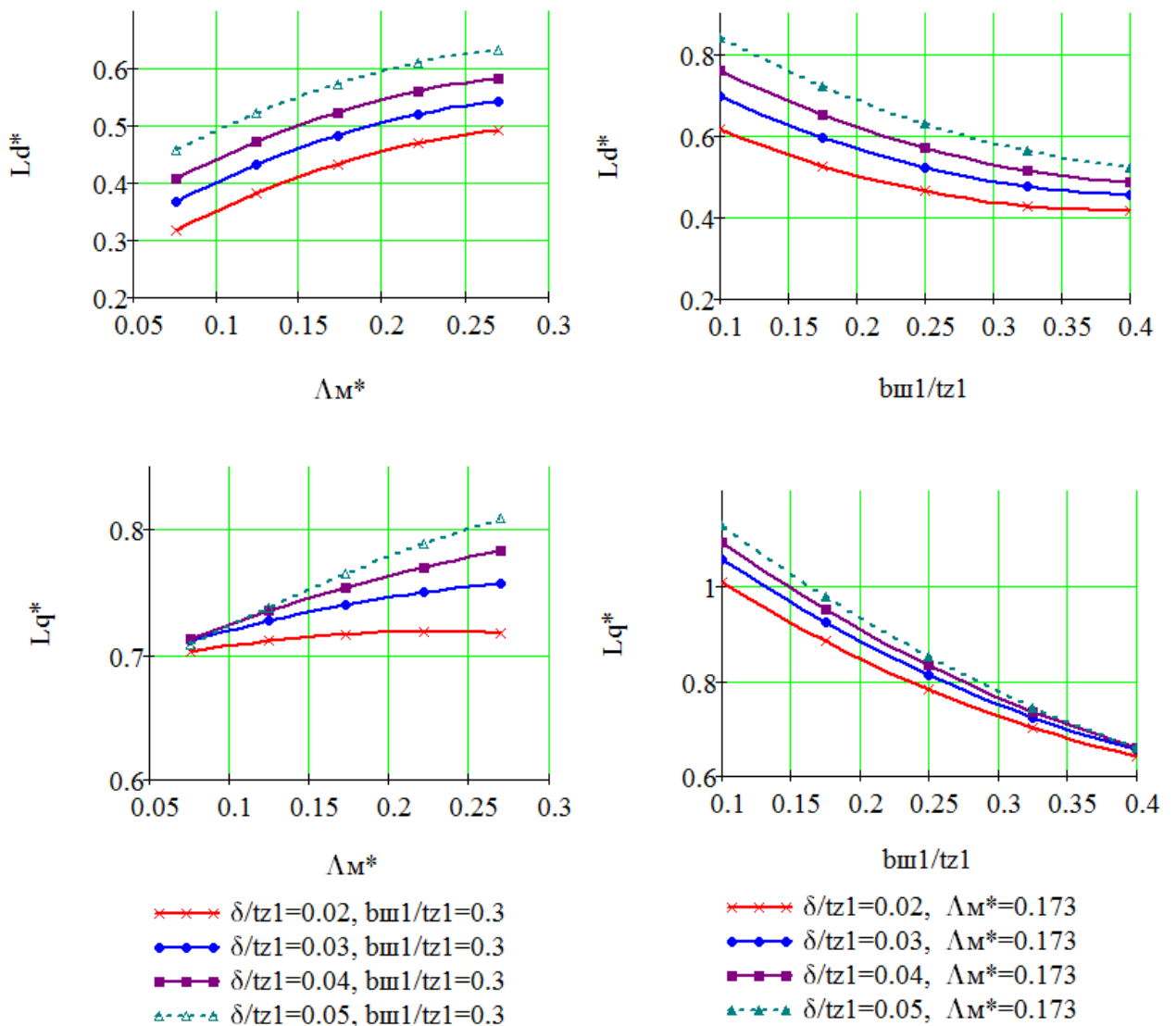


Рис. – 6 Зависимости индуктивностей по осям d и q от открытия пазов статора и магнитной проводимости постоянных магнитов для ротора коллекторного типа

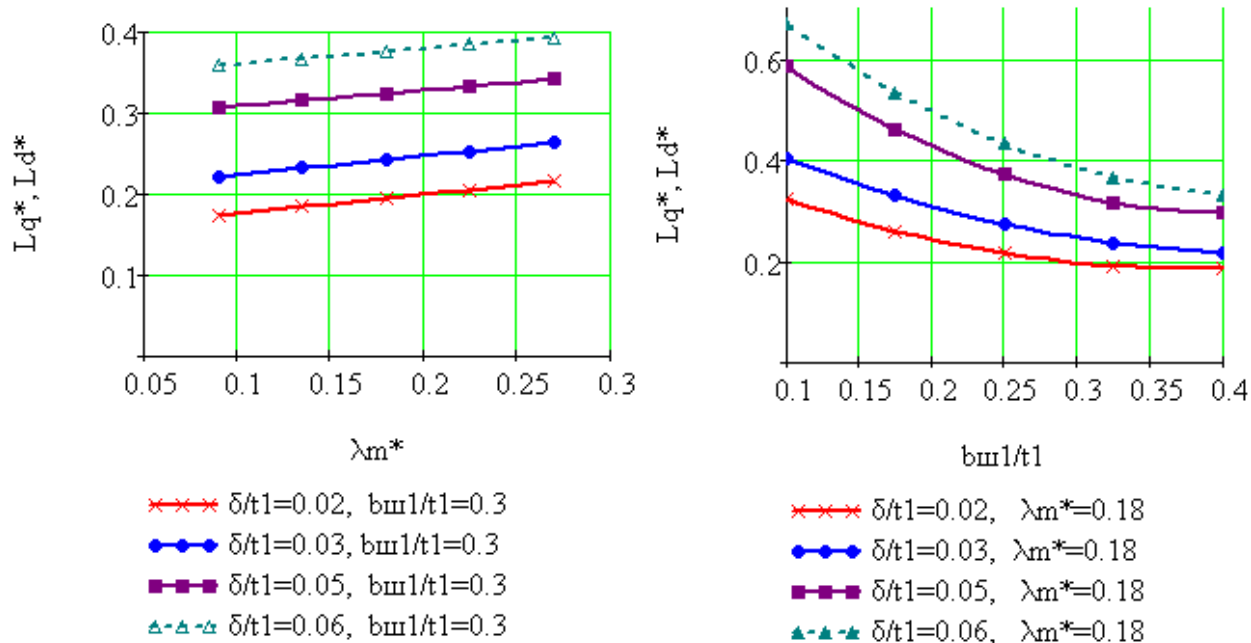


Рис. – 7 Зависимости индуктивностей по осям d и q от открытия пазов статора и магнитной проводимости постоянных магнитов для ротора с радиально ориентированными магнитами

В главе рассчитано изменение собственных индуктивностей в зависимости от насыщения магнитопровода. На рис. 8 показаны зависимости L_d и L_q от коэффициента насыщения магнитной цепи k_μ для конструкции коллекторного типа и конструкции с радиально ориентированными магнитами соответственно. В СГПМ с ротором коллекторного типа наибольшее влияние насыщение магнитопровода оказывает на индуктивность L_q (до 50% при изменении $k_\mu = 1.1 \div 1.6$). На индуктивность L_d насыщение магнитной цепи влияние практически не оказывает. В генераторе с ротором с радиально ориентированными магнитами индуктивности от насыщения не зависят (при $k_\mu \leq 1.5$).

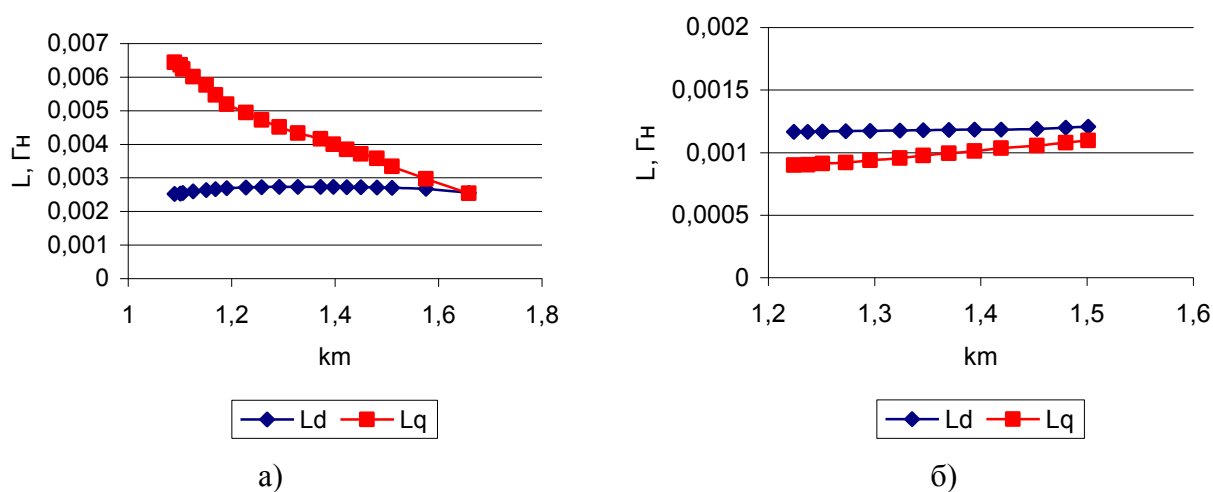


Рис. 8 – Зависимость индуктивностей от насыщения магнитопровода для ротора а) коллекторного типа, б) с радиально ориентированными магнитами

В СГПМ и дробными зубцовыми обмотками магнитное поле в воздушном зазоре содержит целый ряд гармоник высшего и низшего порядков по от-

ношению к рабочей гармонике, обуславливающих повышенное индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния. В отличие от машин с классической обмоткой, в которых величина дифференциального рассеяния не велика по сравнению с общим индуктивным сопротивлением, в рассматриваемых машинах его величина может достигать 50 и более процентов от величины индуктивного сопротивления реакции якоря от рабочей гармонике, которое является функцией не только величины и конфигурации воздушного зазора, но и зависит от конструкции ротора, геометрии и магнитных свойств постоянных магнитов.

В главе получено выражение для расчета полных индуктивных сопротивлений с учетом разницы магнитных проводимостей по осям d и q и особенностей распределения МДС машин с дробными зубцовыми обмотками (9), (10). Для этого вместо реальных зубчатых структур статора и ротора рассматривалась модель с гладким статором и явнополюсным ротором.

$$x_{ad\Sigma} = x_0 \left[\lambda_0 \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{\nu^2} - \frac{\lambda_1}{2} \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{(2 \mp \nu)\nu} \right] = x_0 \left[\lambda_0 \xi_0 - \frac{\lambda_1}{2} \xi_1 \right], \quad (9)$$

$$x_{aq\Sigma} = x_0 \left[\lambda_0 \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{\nu^2} + \frac{\lambda_1}{2} \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{(2 \mp \nu)\nu} \right] = x_0 \left[\lambda_0 \xi_0 + \frac{\lambda_1}{2} \xi_1 \right] \quad (10)$$

где

$$x_0 = \frac{\omega m W_1^2 D l_{\delta}}{\pi}. \quad (11)$$

Значения коэффициентов $\xi_0 = \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{\nu^2}$ и $\xi_1 = \sum_{\nu} \frac{k_{o,\nu}^2}{(2 \mp \nu)\nu}$ для большинства возможных дробностей q трехфазных обмоток приведены в таблице 1. В расчете коэффициентов учтены гармоники до $\nu = 30$, дальнейший учет гармоник не влияет на точность расчета, ввиду их малости.

Таблица - 1 Значения коэффициентов ξ_0 и ξ_1

№ п/п	q	ξ_0	ξ_1
1.	1/2	1.0778	1.0269
2.	2/5	0.0645	0.0616
3.	3/8	0.1143	0.158
4.	4/11	0.0141	0.0141
5.	5/14	0.0397	0.0445
6.	6/17	$6.23 \cdot 10^{-3}$	$6.22 \cdot 10^{-3}$
7.	7/20	0.0183	0.0195
8.	8/23	$3.491 \cdot 10^{-3}$	$3.488 \cdot 10^{-3}$

Значения коэффициентов λ_1 и λ_0 в выражениях (9) и (10) находим исходя из проводимостей для реакции якоря по осям d и q :

$$\lambda_0 = \frac{\Lambda_{ad} + \Lambda_{aq}}{2}, \quad (12)$$

$$\lambda_1 = \Lambda_{aq} - \Lambda_{ad}. \quad (13)$$

В главе составлены схемы замещения магнитной цепи и формулы для определения проводимостей и коэффициентов формы поля для СГПМ с дробными зубцовыми обмотками со следующими конструкциями индукторов: с радиально ориентированными магнитами с полюсными наконечниками и без полюсных наконечников, с ротором коллекторного типа с различными формами паза на роторе.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований СГПМ с дробными зубцовыми обмотками. При этом экспериментально исследовались: форма кривой ЭДС, индуктивности фаз по осям d и q , внешние характеристики. Экспериментальные исследования проводились на трёх объектах, двигателях с постоянными магнитами с ротором коллекторного типа, с дробной зубцовой обмоткой: ДБУ – 2.2 ($q = 3/8$); ДБУ – 0.75 ($q = 2/5$); ДБУ – 0.37 ($q = 2/5$). Экспериментально снятые данные сравнивались с данными, рассчитанными по разработанным математическим моделям. На рис. 9 приведена осциллограмма и гармонический состав ЭДС ДБУ–0.37.

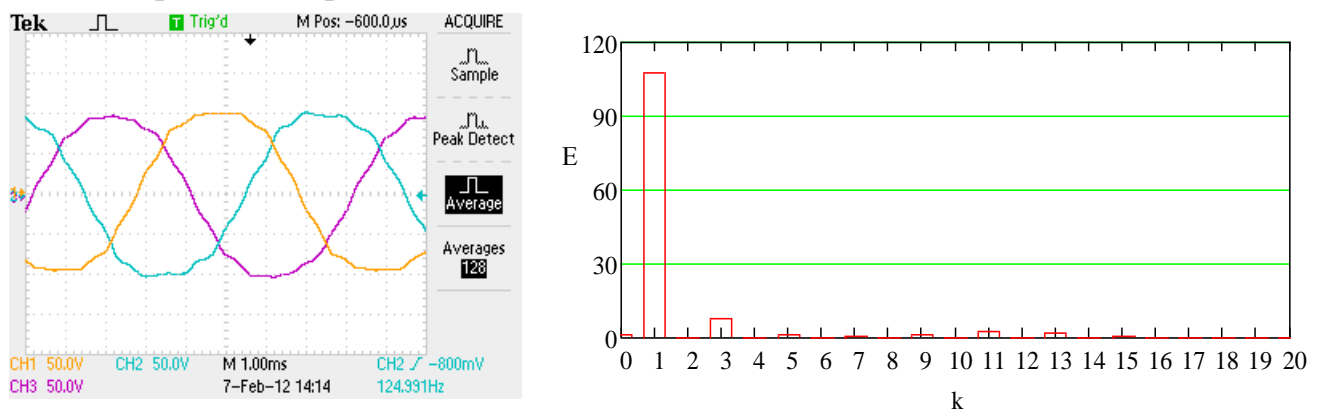


Рис. 9 – Форма и гармонический состав ЭДС ДБУ–0.37

В таблице 2 приведены индуктивности, полученные в результате проведения эксперимента, рассчитанные традиционным способом и по предложенным соотношениям (9), (10) а так же полученные по результатам численного моделирования (по среднеквадратичным значениям токов и потокосцеплений).

Хорошее совпадение расчетных и опытных данных свидетельствует об адекватности полученных соотношений для расчета параметров синхронных машин с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой и предложенного метода их определения по результатам численного моделирования

На рис.10 приведены внешние характеристики машины ДБУ – 2.2 рассчитанные и снятые экспериментально. Они демонстрируют хорошее совпадение расчетных характеристик с опытными, максимальное отклонение составляет 11%. Приведены рассчитанные внешние характеристики, как с учетом изменения параметров (кривая 1), так и без учета (кривая 3). Учет изменения пара-

метров от насыщения магнитной цепи не значительно улучшает точность расчетов (2% при $I \approx I_H$).

Таблица–2 Расчетные и экспериментальные значения индуктивных сопротивлений

Электродвигатель	ДБУ - 0.37		ДБУ - 0.75		ДБУ - 2.2	
	L_d , мГн	L_q , мГн	L_d , мГн	L_q , мГн	L_d , мГн	L_q , мГн
Эксперимент	15.1	30.92	20.31	38.12	3.16	6.64
Аналитический расчет (традиционный)	13.86 (8.24%)	19.58 (36.7%)	16.97 (16.4%)	25.22 (33.8%)	2.51 (20.5%)	3.66 (44.9%)
Аналитический расчет (предложенный)	17.25 (-14.2%)	30.14 (2.5%)	20.92 (-3%)	39.52 (-3.7%)	3.08 (2.6%)	7.23 (-8.8%)
Численное моделирование	16.33 (-8,1%)	31.23 (-1,3%)	21 (-3,4%)	41.08 (-7,9%)	2.88 (8,9%)	6.37 (3,9%)

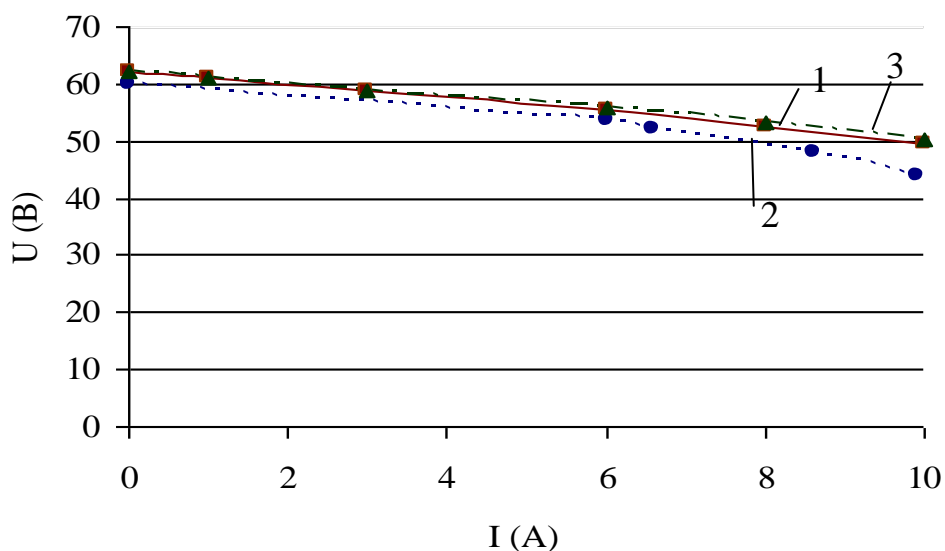


Рис. - 10 Внешние характеристики ДБУ – 2.2:
1 - расчетная с учетом изменения параметров, 2 – экспериментальная
3 - расчетная без учета изменения параметров

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы:

1. На основании расчета магнитного поля СГПМ и дробной зубцовой обмоткой выполненного для двух конструкций индуктора (тангенциально и радиально ориентированными магнитами) показано, что гармонический состав поля возбуждения жестко связан со значением числа зубцов на полюс и фазу якорной обмотки. Получены соотношения, позволяющие определить гармонический состав поля возбуждения в зависимости от значения числа зубцов на полюс и фазу для обмоток с $q < 1$. Показано влияние насыщения магнитопровода на амплитуды гармоник в поле возбуждения.

2. По результатам исследования магнитного поля с использованием метода планирования эксперимента получены полиномы, позволяющие оценить влия-

ние соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны на амплитуды преобладающих высших гармоник в поле возбуждения для двух рассматриваемых конструкций индуктора. Разработаны рекомендации по выбору соотношений зубцово - пазовой зоны для уменьшения этих гармоник.

3. Проведено исследование влияния высших гармоник поля возбуждения на форму ЭДС. Показано, что из всего спектра высших гармоник поля возбуждения на форму кривой ЭДС оказывают влияние гармоники порядка $\nu_{z2} = k\nu_{осн}$, где $k = 3, 5, 7, \dots$, а $\nu_{осн}$ - рабочая гармоника для конкретного значения q , в то время как гармоники порядка ν_{z1} меняют ЭДС генератора по амплитуде.

4. По результатам расчета магнитного поля с использованием метода планирования эксперимента получены полиномы, позволяющие оценить влияние соотношений геометрии зубцово - пазовой зоны и магнитной проводимости постоянных магнитов на собственные индуктивности по осям d, q и предварительно вычислить их значения. Показано влияние насыщения магнитопровода на собственные индуктивности по осям d, q для обеих конструкций индуктора.

5. Показано, что в синхронных генераторах с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками величина индуктивности дифференциального рассеяния, обусловленная высшими гармониками поля, достигает 50 и более процентов от величины индуктивности обмотки якоря. Для более точного учета индуктивности дифференциального рассеяния при расчете собственных индуктивностей по результатам численного моделирования в работе предложен метод их расчета по среднеквадратичным значениям токов и потокосцеплений.

6. Получены аналитические выражения для расчета собственных индуктивных сопротивлений СГПМ и дробными зубцовыми обмотками учитывающие особенности распределения МДС создаваемой дробной зубцовой обмоткой, конфигурацию ротора и свойства постоянных магнитов. Получены коэффициенты для расчета полных индуктивных сопротивлений и представлены в табличном виде в функции q . Разработаны схемы замещения магнитной цепи СГПМ и дробной зубцовой обмоткой для двух рассматриваемых конструкций индуктора.

7. Проведено сравнение результатов расчетов по данным, полученным в ходе проведения экспериментальных исследований, полученным в ходе математического моделирования и предложенным аналитическим выражениям, подтверждающее верность проделанных исследований.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

Научные публикации по теме диссертации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Шевченко, А.Ф. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин/ А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина// Электротехника. – 2009. - № 12. - С. 3-7.
2. Бухгольц, Ю.Г. Определение индуктивностей магнитоэлектрических машин с однозубцовыми обмотками/ Ю.Г. Бухгольц, А.Г. Приступ, Т.В. Честюнина// Электротехника. – 2011 - № 6. - С. 25-29.
3. Бухгольц, Ю.Г. К вопросу расчета индуктивностей дробных зубцовых обмоток/ Ю.Г. Бухгольц, А.Г. Приступ, Т.В. Честюнина // Электро. – 2012. - №1. – С. 48-52.

Другие научные публикации по теме диссертации:

1. Synchronous motors for mechatronic units/ Д.И. Багазей, В.В. Капустин, А.Г. Приступ, Т.В. Честюнина, А.Ф. Шевченко// Материалы 4-го Международного форума по стратегическим технологиям (IFOST- 2009), г. Хошимин. [Синхронные двигатели для мехатронных устройств]
2. Честюнина, Т.В. Анализ поля возбуждения магнитоэлектрического генератора с зубцовыми обмотками/ Т.В. Честюнина//: материалы четвертой науч.-технич. конф. с международным участием ЭЭЭ-2009, – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2009. – С. 78-83.
3. Честюнина, Т.В. Влияние насыщения магнитной цепи на гармонический состав поля возбуждения магнитоэлектрического синхронного генератора/Т.В. Честюнина// Сборник трудов НГТУ. - №3. – С. 109-115.
4. Честюнина, Т.В. Особенности расчета индуктивных сопротивлений магнитоэлектрических машин с дробными зубцовыми обмотками/ Т.В. Честюнина// материалы XVII междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», Томск: изд-во ТПУ, - 2011. – 1Т. С. 559–561.
5. Честюнина, Т.В. Расчет внешних характеристик синхронного магнитоэлектрического генератора с учетом насыщения магнитной цепи/ Т.В. Честюнина// материалы всерос. науч. конф. молодых ученых НТИ – 2011 в 6-ти частях, Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 2Т. С. 129-132.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного
технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Формат 60x84/16, объем 1 п.л., тираж 100 экз.
заказ № , подписано в печать .04.12.