

*На правах рукописи*



Логачева Алла Григорьевна

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Чебоксары – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
**Вафин Шамсумухамет Исламович**

Официальные оппоненты:  
**Копылов Сергей Игоревич**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, заведующий лабораторией сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники

**Макаров Валерий Геннадьевич**  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», заведующий кафедрой электропривода и электротехники

Ведущая организация:  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте [www.chuvsu.ru](http://www.chuvsu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «15» октября 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.301.06



Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электрический транспорт занимает значительную нишу в транспортной системе страны, а его технический уровень и состояние определяют экономическую эффективность и безопасность перевозок. При этом электрический двигатель (ЭД) является одним из самых ответственных узлов транспортного средства, определяющим его эксплуатационные характеристики. Одной из актуальных задач при разработке современных ЭД является повышение их энергоэффективности путем совершенствования конструкции машины.

Развитие полупроводниковой техники определило широкое внедрение на транспортных средствах асинхронных двигателей (АД), питающихся от статических преобразователей частоты (ПЧ). При этом аналитический обзор литературы и практика применения показывают, что асинхронные машины при работе от ПЧ подвергаются воздействию несинусоидального напряжения, что ведет к снижению их энергоэффективности.

В последнее время особый интерес вызывают многофазные электрические машины, в которых количество фаз статора превышает три. Применение статических ПЧ, с одной стороны, открывает широкие возможности для варьирования количеством фаз электродвигателей. С другой стороны, расщепление структуры самого преобразователя позволяет снизить токовую нагрузку на ветви и использовать дискретные ключевые элементы. Кроме того, многофазные асинхронные двигатели и многофазные преобразователи частоты характеризуются повышенной надежностью и развивают кардинально иной подход к проблеме высших гармоник, так как в данном случае они могут быть полезно использованы для повышения эффективности привода. Но вопросы выбора рациональных конструкций многофазных электродвигателей и стоимости получаемой системы недостаточно изучены.

В связи с растущей стоимостью и ограниченностью энергоресурсов актуальными также являются задачи создания энергоэффективных систем преобразования энергии. Последние исследования и публикации в этой области свидетельствуют о перспективности направления разработки линейных электрических машин с постоянными магнитами, которые могут заменить вращающиеся электрические машины в автономных транспортных средствах и источниках энергии, позволив исключить кривошипно-шатунный механизм

и повысить эффективность комплекса. До сих пор не полностью исследованы возможности улучшения характеристик линейных машин путем выбора оптимальной конструкции и увеличения количества фаз.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что разработка методик, позволяющих повысить эффективность электрических двигателей переменного тока, является актуальной задачей, требующей проработки комплекса вопросов при ее решении.

**Степень разработанности.** Большой вклад в решение общих проблем повышения энергоэффективности электродвигателей, разработку методов оптимизации конструкции, создание теоретических и практических основ для исследования, разработки и совершенствования электрических двигателей переменного тока для различных областей применения внесли российские и мировые ученые: А. Блондель, А. А. Горев, Р. Парк, А.И. Вольдек, О.Б. Буль, Г. Крон, И.А. Глебов, И.Я. Браславский, Н.А. Ротанов, П.С. Сергеев, И.П. Копылов, О.Д. Гольдберг, Н.Ф. Котеленец, В.П. Рубцов, Р.Т. Шрейнер, А.А. Кецарис, F. Blaschke, В.К. Bose, M. Depenbrock, T. Noguchi, I. Takahashi, J. Holtz, R.D. Lorenz, и многие другие. В развитие теории и практики применения многофазных электрических машин большую роль имеют работы В.Ф. Бражникова, А.В. Бражникова, E. Levi, Д.М. Глухова, А.Н. Голубева, Н.А. Toliyat, A. Nanoty.

**Цель работы** – разработка методики, позволяющей повысить эффективность многофазных электрических двигателей переменного тока путем принятия рациональных конструктивных решений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- проанализировать современное состояние и предпосылки к применению многофазных электрических двигателей переменного тока;
- разработать методику определения рационального количества фаз асинхронного двигателя заданных габаритов на основе анализа особенностей электромагнитных процессов преобразования энергии в многофазном асинхронном двигателе;
- выполнить технико-экономическую оценку многофазного тягового электродвигателя и преобразователя частоты;
- исследовать влияние многофазной обмотки на характеристики линейной электрической машины.

**Научная новизна** исследования заключается в том, что:

1. Предложена методика, позволяющая определить рациональное количество фаз многофазного асинхронного двигателя с учетом габаритных ограничений и требуемых номинальных параметров на основе анализа электромагнитных процессов преобразования энергии в двигателе.

2. Выработаны рекомендации по выбору значений конструктивных параметров многофазного линейного электрического двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающие повышение эффективности машины.

**Практическая значимость работы.** Практическое использование предложенной методики для определения рационального количества фаз многофазного асинхронного двигателя позволяет разрабатывать и проектировать асинхронные двигатели повышенной эффективности при учете комплекса факторов, таких как массо-габаритные характеристики, пусковые характеристики и перегрузочная способность. Выработанные рекомендации по выбору значений конструктивных параметров многофазного линейного электрического двигателя с постоянными магнитами позволяют разрабатывать и проектировать машины повышенной эффективности для транспортного оборудования и автономных энергетических комплексов.

**Методы исследований.** В работе использованы методы теории электромеханических преобразователей, теории магнитного поля, теории электрических цепей, методы моделирования в среде MATLAB, объектно-ориентированного программирования Visual Basic for Applications (VBA), а также общепринятые методы инженерных расчетов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика определения рационального количества фаз электродвигателя в заданных габаритах на основе анализа особенностей электромагнитных процессов преобразования энергии в многофазном асинхронном двигателе.

2. Результаты исследований и рекомендации по выбору количества фаз, обеспечивающего наилучшие энергетические характеристики.

3. Результаты исследований и рекомендации по выбору соотношений размеров постоянных магнитов индуктора, паза, зубца статора и количества

фаз, необходимых для достижения наибольшего электромагнитного воздействия на индуктор линейной электрической машины.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов** достигается применением фундаментальных законов и принципов электродинамики, электротехники, электромеханики, корректностью принятых допущений, сопоставлением результатов, полученных в различных программных комплексах.

**Апробация работы.** Основные положения работы и ее результаты докладывались на Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г.Москва, 2013, 2014), Международных научно-технических конференциях «Тинчуринские чтения» (г.Казань, 2010, 2013, 2014), Международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи» (г.Новочеркасск, 2013), Всероссийской конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г.Кемерово, 2014), 3й «Международной конференции по научному развитию в Евразии» (г.Вена, 2014), VII Международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (г. Екатеринбург, 2015).

**Внедрение.** Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

– при выполнении модернизации стенда для послеремонтных испытаний генераторов и регуляторов напряжения, применяемых на воздушных судах, на авиапредприятии «Uzbekistan Airways Technics» (г.Ташкент) с целью повышения надежности и эффективности работы применяемых электрических машин;

– в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Казанский государственный энергетический университет» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»;

– при разработке экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия и стенда для его испытаний, выполняемых в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки

по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» № 14.577.21.0121 от 20.10.2014 г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 15 научных работ, получено 2 патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований, 4 приложений. Содержит 160 страниц основного машинописного текста, проиллюстрированного 47 рисунками и 13 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, дана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая ценность результатов исследования, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, апробация результатов и отражена структура диссертации.

**В первой главе** обозначена необходимость разработки электродвигателей повышенной энергоэффективности для систем тягового электропривода, автономных транспортных средств и источников питания. Приведен обзор современного уровня развития электрических двигателей (ЭД), применяемых в качестве тяговых. Выделены направления развития и определены требования, предъявляемые к регулируемому электроприводу. Обозначена возможность внедрения многофазных электродвигателей в существующие системы для повышения их эффективности.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы конструктивного выполнения многофазного асинхронного двигателя.

С конструктивной точки зрения многофазные двигатели могут быть изготовлены на базе выпускаемых промышленностью серийных асинхронных двигателей путем перемотки статора. Реализуемое количество фаз  $m$  можно определить по формуле

$$m = \frac{Z_s}{2pq_s}, \quad (1)$$

где  $Z_s$  – число пазов статора;  $p$  – число пар полюсов;  $q_s$  – число пазов на полюс и фазу.

Ограничивающим фактором является коэффициент заполнения паза  $k_{3m}$ , который не может превышать единицу

$$k_{3m} = \frac{3q_{s3}k_{33}}{mq_{sm}}, \quad (2)$$

где  $q_{s3}$ ,  $q_{sm}$  – число пазов на полюс и фазу в трехфазном и  $m$ -фазном двигателе;  $k_{33}$  – коэффициент заполнения паза в трехфазном двигателе.

При возможности изменения геометрии зубцово-пазовой зоны статора реализуемость  $m$ -фазной обмотки определяется выполнением условия

$$B_\delta < B_{3s} \left( 1 - b_{\text{изол}} \frac{2pmq_s}{\pi D_s} \right), \quad (3)$$

где  $D_s$  – внутренний диаметр сердечника статора;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре;  $B_{3s}$  – допустимая индукция в зубце статора;  $b_{\text{изол}}$  – размер изоляции паза по ширине.

В формуле (3) значение индукции в воздушном зазоре определяется из области допустимых значений, которая учитывает ограничения, накладываемые заданными габаритами машины, требуемыми номинальными параметрами и магнитными свойствами используемых материалов.

Предложена методика выбора количества фаз двигателя с учетом оценки действия высших гармоник.

На первом этапе выбирается способ выполнения статорной обмотки двигателя. Затем оценивается спектр пространственно-временных гармоник поля в воздушном зазоре машины для случая нечетного (4) и четного (5) количества фаз можно определить по выражениям

$$v(\alpha)_i = v(t) \pm 2mi, \quad (4)$$

$$v(\alpha)_i = v(t) \pm mi, \quad (5)$$

где  $v(t)$  – номер временной гармоники;  $v(\alpha)_i$  – номер соответствующей пространственной гармоники;  $i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

На втором этапе определяется количество полюсов и направление вращения магнитных полей, созданных на высшими гармониками токов. Для



ускорения был разработан и зарегистрирован алгоритм программы для ЭВМ, реализованной в Microsoft Excel (MS Excel). По результатам расчетов выбираются варианты с наибольшим числом синхронных полей или с наибольшим возможным диапазоном изменения числа полюсов. Как показали исследования, двигатели с нечетным количеством фаз обладают более широким диапазоном изменения числа полюсов под действием временных гармоник тока, а также характеризуются более редким составом высших гармоник, чем двигатели с четным количеством фаз.

На третьем этапе выполняется проектный расчет многофазного двигателя. С целью ускорения расчета был разработан и запатентован алгоритм программы проектирования многофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, реализованной в MS Excel. В программе реализована уточненная методика расчета, позволяющая учитывать влияние количества фаз статора на параметры двигателя. В частности, как показали исследования, проводимость дифференциального рассеяния обмотки статора необходимо вычислять формуле:

$$\lambda_{дс} = \frac{mq_s \tau l_s k_{обс}^2}{\pi^2 k_\delta \delta l'_\delta} k_{дм} (k_d - \Delta k_d), \quad (6)$$

где  $\tau$  – полюсное деление статора;  $l_s$  – длина статора;  $k_{обс}$  – обмоточный коэффициент статора;  $k_{дм}$  – коэффициент демпфирования;  $k_d$  – коэффициент дифференциального рассеяния, определяющий отношение суммы ЭДС, наведенных высшими гармониками поля статора или ротора, к ЭДС, наведенной первой гармоникой того же поля;  $\Delta k_d$  – величина, учитывающая уменьшение дифференциального сопротивления под влиянием пазов;  $k_\delta$  – коэффициент воздушного зазора;  $\delta$  – ширина воздушного зазора;  $l'_\delta$  – расчетная длина поля рассеяния.

На четвертом этапе выполняется построение механических характеристик спроектированных двигателей и выбирается двигатель с лучшей характеристикой – более гладкой в области малых скольжений и/или расположенной на графике выше других вариантов. С учетом влияния пространственно-временных гармоник асинхронный электромагнитный момент двигателя вычисляется по формуле

$$M_{v(t,\alpha)} = \frac{m \left( \frac{U_{s1}}{v(\alpha) \cdot v(t)} \right)^2 \frac{\sqrt{v(t)} r'_{r1}}{1 - \frac{v(\alpha)}{v(t)} (1-s_1)}}{v(t) \omega_0 \left[ \left( \sqrt{v(t)} r_{s1} + \frac{\sqrt{v(t)} r'_{r1}}{1 - \frac{v(\alpha)}{v(t)} (1-s_1)} \right)^2 + (v(t) x_{s1} + v(t) x'_{r1})^2 \right]}, \quad (7)$$

где  $U_{s1}$  – основная гармоника фазного напряжения статора;  $s_1$  – скольжение для поля основной гармоники;  $r_{s1}$ ,  $x_{s1}$  – активное и индуктивное сопротивление статора основной гармонике;  $r'_{r1}$ ,  $x'_{r1}$  – приведенные активное и индуктивное сопротивление ротора основной гармонике;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения поля статора;  $v(\alpha)$  – порядковый номер пространственной гармоники поля статора.

Для оценки зависимости температурного влияния на состояние изоляции обмотки в зависимости от количества фаз электродвигателя было получено аналитическое выражение для расчета перегрева обмотки  $\Delta \mathcal{G}_{обм}$ :

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{G}_{обм} = & P_{мс} \left( \frac{k}{\pi D_s l_s \alpha_s} \cdot \left( \frac{2l_s}{l_{cps}} \right)^2 + \frac{b_{ис}}{Z_s \Pi_s l_s \lambda_{эКВ}} \cdot \left( \frac{2l_s}{l_{cps}} \right)^2 + \frac{1}{\pi D_s l_{BS} \alpha_s} \cdot \frac{l_s l_{ls}}{l_{cps}^2} + \right. \\ & \left. + \frac{b_{и.лс}}{\pi D_s l_{BS} \lambda_{эКВ}} \cdot \frac{l_s l_{лс}}{l_{cps}^2} + \frac{k}{\pi D_{ис} \alpha_B} \cdot \frac{2l_s \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{l_{cps}} + \frac{1}{\pi D_{ис} \alpha_B} \cdot \frac{2l_s \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{l_{cps}} \right) + \\ & + \frac{P_{мр} \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{\pi D_{ис} \alpha_B} + \frac{k P_{с\Sigma}}{\pi D_s l_s \alpha_s} \cdot \frac{2l_s}{l_{cps}} + \frac{k P_{с\Sigma} \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{\pi D_{ис} \alpha_B} + \frac{P_{мех\Sigma} \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{\pi D_{ис} \alpha_B} + \\ & + \frac{P_d \cdot (l_s + 2 \cdot l_{BS})}{\pi D_{ис} \alpha_B}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $P_{мс}$  – потери в обмотке статора;  $k$  – коэффициент, учитывающей, что воздуху внутри двигателя передается только часть потерь в активной части статора (остальные потери передаются непосредственно через станину наружному охлаждающему воздуху);  $\alpha_s$  – коэффициент теплоотдачи поверхности статора;  $l_{cps}$  – средняя длина витка катушки;  $\Pi_s$  – условный периметр поперечного сечения паза статора;  $\lambda_{эКВ}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу, включающий воздушные прослойки и равный  $\lambda_{эКВ} = 16 \cdot 10^{-5}$  Вт/мм<sup>2</sup>С;  $b_{ис}$  – односторонняя толщина изоляции в пазу

статора;  $l_{вс}$  – длина витка катушки;  $l_{дс}$  – длина лобовой части катушки;  $b_{и.лс}$  – односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части;  $D_{нс}$  – внешний диаметр статора;  $\alpha_{в}$  – коэффициент подогрева воздуха;  $P_{Mr}$  – потери в обмотке ротора;  $P_{с\Sigma}$  – суммарные потери в стали;  $P_{мех\Sigma}$  – суммарные механические потери;  $P_{д}$  – добавочные потери.

На основе формулы (8) был определен параметр  $\alpha$ , физически представляющий собой поток тепла, идущий от двигателя в окружающую среду при разности температуры двигателя и окружающей среды  $1^{\circ}\text{C}$  и рассчитана его зависимость от количества фаз статора (рисунок 1). С ростом количества фаз снижается нагрев двигателя.

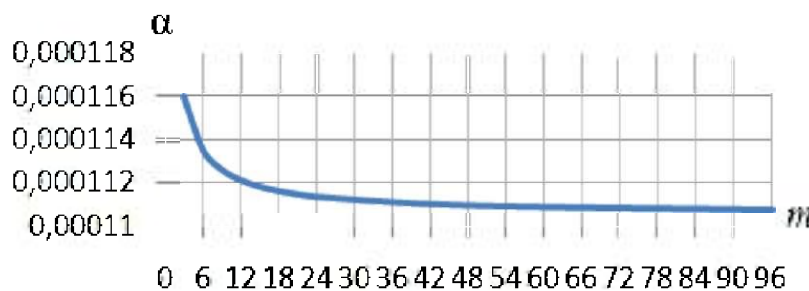


Рисунок 1 – Зависимость параметра коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от количества фаз статора

Таким образом, выбор конструкции многофазного асинхронного двигателя и определение рационального количества фаз двигателя с использованием разработанной методики осуществляется с учетом комплекса факторов, таких как:

1. Заданные номинальные параметры и габариты двигателя.
2. Гармонический состав спектра МДС в воздушном зазоре двигателя.
3. Вид механических характеристик.
4. Прогнозируемое температурное состояние изоляции обмотки статора.

**Третья глава** посвящена исследованию технических показателей многофазных электродвигателей, выполненных на основе существующего трехфазного двигателя, оценке стоимости многофазного преобразователя частоты и реализации многофазной системы в тяговом электроприводе.

На основании области допустимых значений магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя мощностью 170 кВт было определено

максимально возможное количество фаз без изменения зубцовой зоны статора – 15, и с изменением – 79. Результаты расчетов двигателей с  $m=3;15; 21;27;31;33;39;41;45;57;69;79$  показали, что улучшение эксплуатационных характеристик, таких как синусоидальность МДС в воздушном зазоре, величина электромагнитного момента, перегрузочная способность, при диаметральном шаге обмотки и обеспечении величины суммарных потерь и массы обмотки на уровне, не превышающем аналогичные величины для исходного трехфазного двигателя, достигается при количестве статора равным и более 69.

На рисунке 2 приведены для сравнения механические характеристики для двигателей с  $m=3;15; 21;27;31;33;39;41;45;57;69;79$ .

С увеличением количества фаз механическая характеристика меньше искажается высшими гармониками, а также возрастает кратность пускового и максимального момента двигателя.

Выполнена экономическая оценка целесообразности увеличения количества фаз преобразователя частоты. Для этого на основании действующих рыночных цен на IGBT-транзисторы была найдена зависимость условной цены преобразователя частоты  $C_{пч}$  от количества его фаз  $m$  (рисунок 3). С увеличением количества фаз цена на инвертер (преобразователь частоты) снижается. При этом минимум ценовых затрат с увеличением удельного тока, вычисляемого как отношение мощности инвертора к фазному напряжению  $P/U_{\phi}$ , смещается в зону больших значений количества фаз, а также увеличивается разность между минимальными затратами и затратами на трехфазный инвертер.

Приведена запатентованная структура построения многофазного тягового электропривода электровоза и спроектирован 79-фазный асинхронный тяговый двигатель на базе ДТА170У2, установленного на составах типа «Русич» поездов метрополитена, приведены его расчетные рабочие характеристики.

При значительном увеличении количества фаз и значительном снижении токовой нагрузки на фазу возможно выполнение статора многофазной машины беспазовым. Получен патент на полифазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и беспазовой статорной обмоткой, выполненной в виде тонких проводящей пленки нанесенной на диэлектрическую основу.

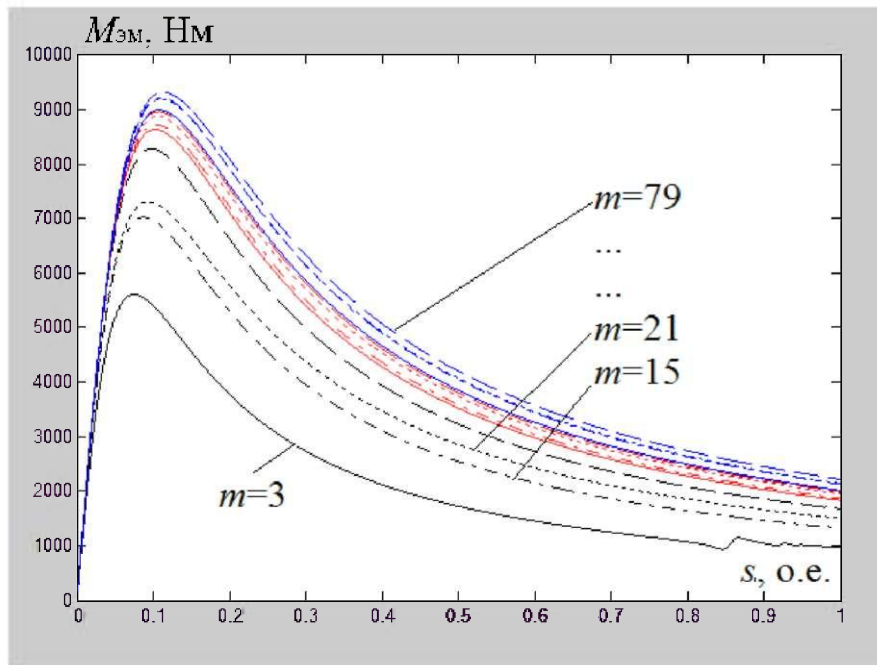


Рисунок 2 – Механические характеристики асинхронных двигателей с количеством фаз статора  $m$  равным 3; 15; 21; 27; 31; 33; 39; 41; 45; 57; 69; 79

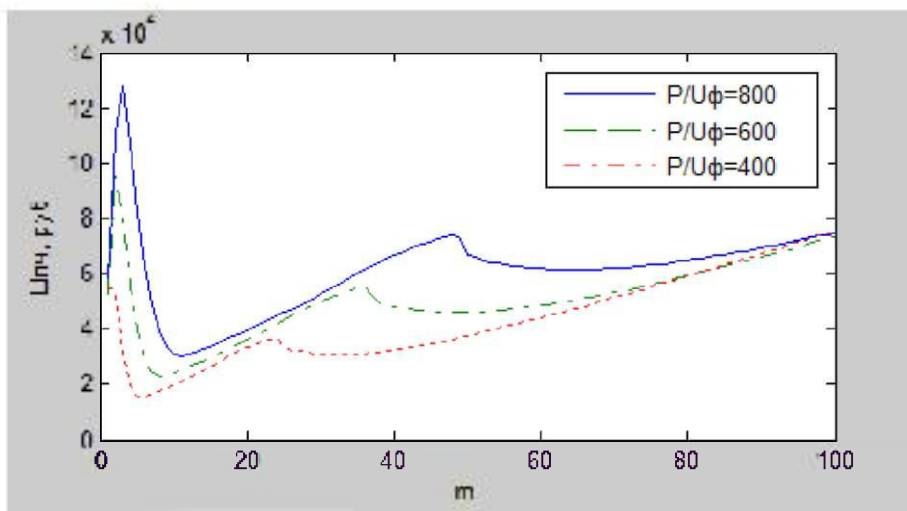


Рисунок 3 – Зависимость цены преобразователя частоты от количества фаз при 1200 В

**В пятой главе** рассмотрено применение многофазной обмотки в линейной электрической машине и выполнено исследование распределения электромагнитной силы, действующей на индуктор двухполюсного линейного синхронного двигателя в зависимости от количества фаз статора.

Для расчета электромагнитной силы, действующей на индуктор двигателя, необходимо было определить проводимости участков магнитной цепи на всем пути перемещения. Для этого был разработан алгоритм расчета, основывающийся на следующих положениях:

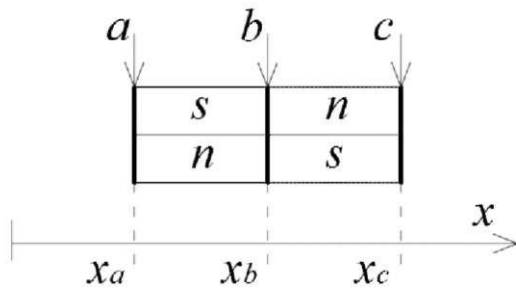


Рисунок 4 – Элементарный индуктор линейного двигателя, состоящий из двух спаренных магнитов, с обозначением граней магнитов по координате пути перемещения

гранью определенной координаты будет изменяться состав магнитных проводимостей участка и, соответственно, формулы для их вычисления.

На основании разработанного алгоритма и полученных формул было проведено исследование влияния параметров магнитной системы на величину и распределение электромагнитной силы.

Так при одинаковой мощности двигателей максимальную величину  $Q(x)$  на участке  $x \in [0; b_w]$  имеет при количестве фаз  $m=3$  (рисунок 5). Но рассматривая зависимость  $Q(x)$  на более длинном промежутке движения, среднее значение силы  $Q(x)$  возрастает с ростом  $m$ .

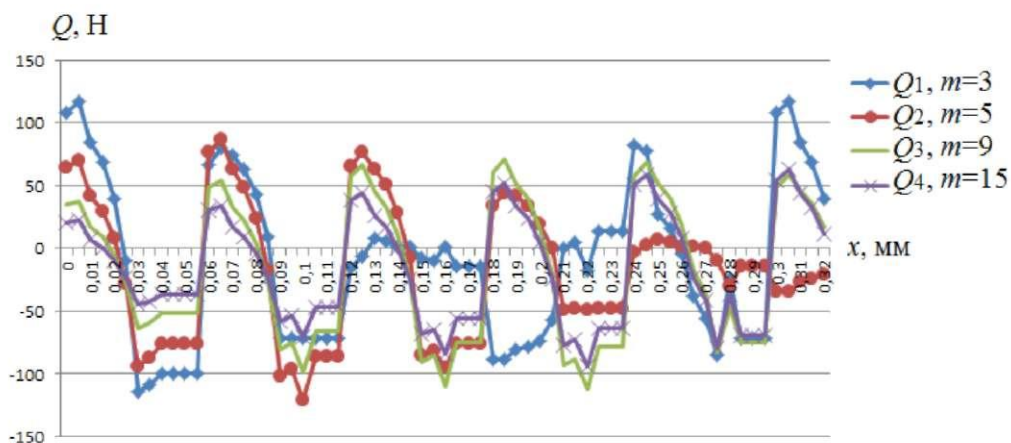


Рисунок 5 – Зависимость  $Q(x)$  для различного количества фаз статора при одинаковом удельном токе на все фазы

Таким образом, при необходимости обеспечения длинного пути перемещения индуктора целесообразно выполнение статора с большим количе-

1) Рассматривать весь путь индуктора внутри статора как совокупность отрезков с повторяющимся характером проводимостей. Длина одного такого отрезка равна  $b_w + b_a$ .

2) При определении проводимостей на каждом из таких отрезков их также удобно разбить на отрезки.

3) Чтобы вывести формулы расчета магнитных проводимостей, обозначим грани спаренных магнитов, как показано на рисунке 5. При достижении каждой

ством фаз. Также увеличение количества фаз может быть целесообразным при большой длине перемещения индуктора и требуемой высокой скорости.

**В приложениях** приводятся параметры спроектированных многофазных электродвигателей, данные серийно-выпускаемых четырехполюсных двигателей мощностью 160-220 кВт отечественного и зарубежного производства, обобщенные формулы к расчету проводимостей участков магнитной цепи линейной электрической машины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение количества фаз позволяет улучшать эффективность электрических двигателей переменного тока, в частности, тяговых электродвигателей, питающихся от статических преобразователей частоты, и линейных электрических машин с постоянными магнитами.

2. Разработана методика, позволяющая определить рациональное количество фаз двигателя на основе оценки влияния высших гармоник на скорость, направление вращения и количество полюсов магнитных полей, образующихся в воздушном зазоре машины, механическую характеристику двигателя, нагрев двигателя, а также разработан алгоритм для программы автоматизированного проектирования многофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, позволяющий учитывать влияние количества фаз на параметры машины. Двигатели с нечетным количеством фаз обеспечивают более близкое к синусоидальному распределение МДС в воздушном зазоре машины и обладают более широким диапазоном изменения числа полюсов под действием временных гармоник тока. С увеличением количества фаз механическая характеристика меньше искажается высшими гармониками, а также возрастает кратность пускового и максимального момента двигателя. Суммарные потери в электродвигателе снижаются с увеличением количества фаз, что приводит к меньшему нагреву его активных частей.

3. По сравнению с выпускаемыми в России трехфазными тяговыми двигателями мощностью 170 кВт расчетный КПД 79-фазного двигателя такой же мощности и габаритов больше на 3%, кратность максимального момента выше в 2 раза, а масса двигателя меньше на 12 кг. Экономическая оценка стоимости многофазного преобразователя частоты на основе рыночной стоимости IGBT-транзисторов, являющихся элементной базой для по-

строения 79-фазного автономного инвертора напряжения показала, что расчетная стоимость 79-фазного автономного инвертора напряжения на 44% меньше трехфазного аналога.

4. Повышению эффективности линейного электрического двигателя с постоянными магнитами, в котором обмотка статора выполнена многофазной, а индуктор представляет собой два спаренных магнита, способствует выполнение двух полюсов индуктора суммарной длиной меньше суммарной ширины паза и зубца статора, выбор ширины паза вдвое меньшей ширины одного полюса индуктора, при ширине зубца статора равной половине ширины полюса индуктора. Увеличение количества фаз статора линейной машины обеспечивает повышение ее эффективности при длинном пути перемещения индуктора и при необходимости обеспечения высокой линейной скорости перемещения индуктора.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Логачева, А.Г. О потенциальной возможности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Известия Высших учебных заведений: Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 63–67.

2. Логачева, А.Г. Влияние количества фаз статора на нагрев электродвигателя / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, энергетическая промышленность. – 2014. – № 3. – С. 63–67.

3. Логачева, А.Г. Полезное использование высших временных гармоник в многофазном асинхронном двигателе / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин, Р.Р. Хуснутдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 7. – С. 21–28.

4. Логачева, А.Г. Особенности автоматизированного проектирования многофазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / А.Г. Логачева // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 2. – С. 34–39.



Патенты и свидетельства регистрации программ:

5. Пат. на полезную модель 124081 РФ, МПК H02K17/16, H02K1/12, H02K3/04, H02K15/08. Полифазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором / Ш.И. Вафин, А.Г. Логачева // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2013. – № 1. – 2 с.

6. Свидетельство № 2013661902 РФ. Программа проектирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.Г. Логачева. – № 2013619493; заявл. 21.10.2013; зарегистр. 18.12.2013; опубл. 20.01.2014. – 1 с.

7. Свидетельство № 2014613473 РФ. Программа для определения направления вращения магнитных полей, созданных временными гармониками токов статора в многофазном асинхронном двигателе / А.Г. Логачева. – № 2014610730; заявл. 04.02.2014; зарегистр. 27.03.2014; опубл. 20.04.2014. – 1 с.

8. Пат. на полезную модель 149206 РФ, МПК B60L9/16, B60L9/22. Тяговый электропривод электровоза / Ш.И. Вафин, А.Г. Логачева // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2014. – № 36. – 2 с.

Публикации в других научных изданиях:

9. Логачева, А.Г. Оценка надежности многофазных асинхронных двигателей / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Материалы докладов V международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Изд-во Казанского государственного энергетического университета, 2010. – Т.1. – С. 154–155.

10. Логачева, А.Г. Магнитные потери в многофазных электродвигателях, их учет и оценка / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Материалы докладов VI международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – Т.1. – С. 118 – 119.

11. Логачева, А.Г. Управление многофазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Девятнадцатая Между-нар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – Т.2. – С.193.

12. Логачева, А.Г. Многофазные асинхронные двигатели как инструмент повышения надежности и энергоэффективности электропривода / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Материалы докладов VIII международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – С.166–167.

13. Логачева, А.Г. Повышение надежности работы электропривода собственных нужд электростанции путем применения многофазного асинхронного электропривода / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14-18 октября 2013 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2013. – С.271–274.

14. Логачева, А.Г. Исследование магнитных полей высших гармоник в многофазных асинхронных двигателях / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двдцатая между-нар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т.2. – С.190.

15. Логачева, А.Г. Оценка срока службы многофазного асинхронного двигателя / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Материалы докладов IX международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Изд-во Казанского государственного энергетического университета, 2014. – Т.1. – С. 143–144.

16. Вафин, Ш.И. О расчете дифференциальных сопротивлений статора и ротора многофазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс] / Ш.И. Вафин, А.Г. Логачева // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово: ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т. им. Т.Ф. Горбачева», 2014. – 5 с. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2014/oldenerg1/energ1/pages/Articles/4/Vafin.pdf>.

17. Логачева, А.Г. Обоснование выбора конструкции обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин, И.В. Ившин, А.Р. Сафин // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International conference on Eurasian scientific development. «East West» As-

sociation for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – Vienna, 2014. – P. 157–165.

18. Логачева, А.Г. Влияние количества фаз обмотки статора на тяговое усилие линейного синхронного двигателя / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин, Р.Р. Гибадуллин, А.М. Копылов // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Ежемесячный научный журнал. – 2015. – № 2 (7). – С.138–143.

19. Логачева, А.Г. Математическая модель многофазного асинхронного двигателя / А.Г. Логачева, Ш.И. Вафин // Материалы докладов VII международной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Изд-во Казанского государственного энергетического университета, 2012. – Т.1. – С. 197.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:

[1, 18] – выбор методики исследования, выполнение исследования, обработка результатов;

[2, 3] – постановка задачи исследования, выполнение исследования, анализ результатов;

[5] – патентный поиск, выбор прототипа, доработка схемных решений реализации полифазной статорной обмотки асинхронного двигателя;

[8] – патентный поиск, проработка схемных решений реализации тягового электропривода электровоза, исследование многофазной системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»;

[9]. – обзор подходов и методик оценки надежности электрических машин, выбор математической модели, выполнение расчетов, обработка результатов;

[10, 14, 15] – выполнение исследования, обработка, анализ результатов;

[11] – моделирование многофазной системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и ее системы управления в среде MATLAB Simulink, выполнение исследования, обработка и анализ результатов;

[12, 13, 16,] – постановка задачи исследования, выбор методики исследования, выполнение исследования, обработка результатов;

[17] – сравнение существующих конструкций обратимых электрических машин возвратно-поступательного движения;

[19] – моделирование и исследование многофазного асинхронного двигателя в среде MATLAB Simulink, обработка и анализ полученных данных.

Логачева Алла Григорьевна

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 12.10.2015г. Формат 60x84<sup>1/16</sup>  
Бумага офсетная. Печать оперативная.  
Гарнитура «Times». Усл.печ.л.1.25.  
Тираж 100 экз. Заказ № 112.

Отпечатано в типографии ООО «Адория»  
420021, г. Казань , ул. Габдуллы Тукая, 91