

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

МАКАРЕНЮ
Дмитрий Васильевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
АСИНХРОННЫХ МАШИН СО СКОСОМ ПАЗОВ

Специальность: 05.09.01 - Электрические машины

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1994



00778382 (Z)

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Одесском институте ~~технических наук~~

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
ЗАХАРОВ Михаил Константинович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
АДАМЕНКО Алексей Иванович

- доктор технических наук, профессор
НОВИЦОВ Юрий Дмитриевич

- доктор технических наук, профессор
ПОВСТЕНЬ Виктор Александрович

Ведущее предприятие - СПКТЬ электродвигателей Ю "Укр-
электромаш" Министерства машиностроения, военно-промышленного
комплекса и конверсии Украины, г.Харьков.

Защита состоится "29" ноября 1994 г. в 14 час.
на заседании специализированного ученого совета Д 016.30.04
при Институте электродинамики НАН Украины, по адресу: 252680,
г.Киев-57, пр-кт Победы, 56, тел. совета 446-91-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики НАН Украины.

Автореферат разослан "14" октября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета,
доктор технических наук

Г.М. ФЕДОРЕНКО

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основу парка электрических двигателей Украины и других промышленно развитых стран составляют асинхронные двигатели, потребляющие свыше 40 % всей электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране. Из этого вытекает особое народно-хозяйственное значение развития теории и практики конструирования этих электродвигателей.

В печати высказывается мнение, что электромагнитные резервы совершенствования асинхронных двигателей, в основном, исчерпаны. Вместе с тем в последние годы в области теории асинхронных машин получены новые результаты, свидетельствующие о том, что до полной разработки теории и исчерпания электромагнитных резервов совершенствования асинхронных двигателей еще далеко. Это во многом относится к асинхронным двигателям со скосом пазов, составляющих основу парка современных асинхронных машин.

Результирующее поле основной гармонической составляющей в воздушном зазоре асинхронной машины со скосом пазов, работающей под нагрузкой, представляет собой, в общем случае, неоднородное, сложное по характеру распределения в пространстве квазистационарное магнитное поле (рис. I).

Электромагнитные поля, подобные имеющему место в воздушном зазоре асинхронного двигателя со скосом пазов, широко распространены в природе и технике.

Анализ литературных источников показал, что для этих областей знания также как и теории электрических машин характерным является то, что до сих пор не известен механизм взаимодействия проводника с результирующим магнитным полем, не известны свойства электрических цепей в рассматриваемых полях, не разработаны основы теории магнитных измерений в этих полях, от-

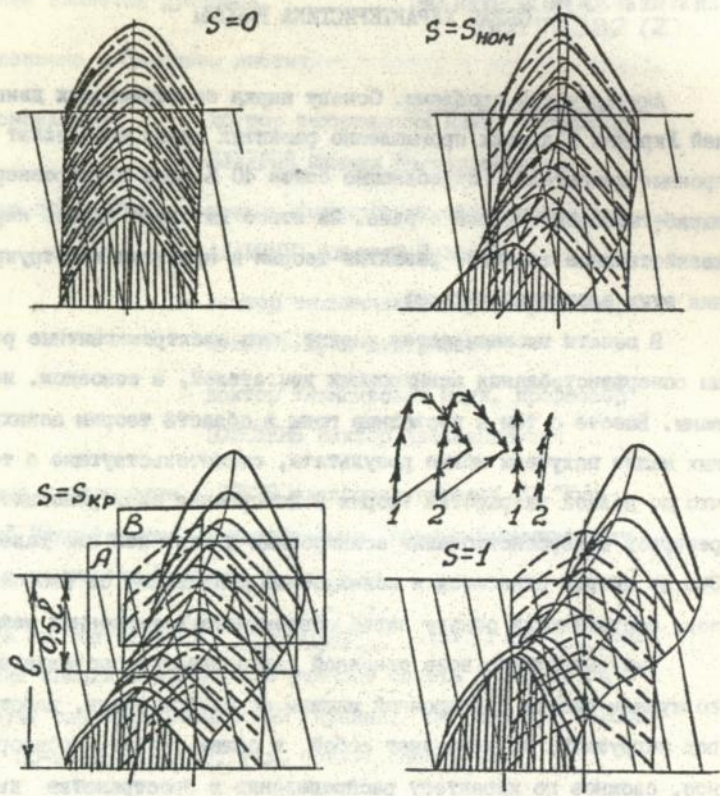


Рис.1. Полувоины результирующего магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя со скосом пазов для различных значений скольжения S . Многоугольники ЭДС проводника обмотки статора (1), ротора (2). Плоскости определяющие в аксиальном направлении симметрии геометрическую (А), электромагнитную (В).
———— эксперимент, - - - - существующее представление.

существуют фундаментальные исследования изложенных проблем. Сложившееся положение вынудило перейти в рассматриваемых полях к "точечным" методам магнитных измерений, к "точечным" методам анализа и расчета электромагнитных устройств. Это не могло не привести к кризисным явлениям — возможности утраты информации при измерениях, созданию иллюзии об исчерпании электромагнитных резервов совершенствования технических устройств, неопределенности при принятии решений в экстремальных условиях и другим отрицательным последствиям.

При определенных условиях в воздушном зазоре асинхронного двигателя со скосом пазов, работающего под нагрузкой, имеет место значительный избыток энергии результирующего магнитного поля по сравнению с тем же двигателем без скоса пазов. Однако до настоящего времени не найдены пути практического использования этого избытка энергии.

Особое значение правильное понимание особенностей электромагнитных явлений и свойств электрических цепей в рассматриваемых результирующих магнитных полях приобретает в связи с происходящим становлением и развитием микропроцессорных систем асинхронных электроприборов с векторным управлением.

Без комплексного рассмотрения изложенных и других проблем теории асинхронных электрических машин со скосом пазов нельзя выявить реально существующие, перспективные электромагнитные резервы повышения технического уровня асинхронных электродвигателей.

Цель и основные задачи научного исследования. Целью работы является разработка научных основ трехмерного системного анализа электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, и на этой основе поиск электромагнитных резервов совершенствования асинхронных машин путем разра-

ботки основной научной концепции работы, заключающейся в трехмерной системной взаимосвязи электромагнитных параметров обмоток асинхронной машины со скосом пазов и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины; разработки теории электрических цепей, находящихся в рассматриваемых полях; разработки теории и практики магнитных измерений в рассматриваемых магнитных полях с применением индукционных преобразователей; разработки теории и методики расчета асинхронных машин со скосом пазов как развитие теории и методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы; разработки конструкции, методики расчета модификаций асинхронных электродвигателей, базирующихся на электромагнитных явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов.

Для достижения данной цели оказалось необходимым решить следующие задачи:

изучить теоретически и экспериментально механизм взаимодействия проводника с квазистационарным неоднородным сложным по характеру распределения в пространстве результирующим магнитным полем (применительно к асинхронным машинам со скосом пазов);

исследовать свойства электрических цепей, находящихся в рассматриваемых полях. Разработать теорию электрических цепей, находящихся в рассматриваемых полях;

разработать применительно к магнитным измерениям в воздушном зазоре асинхронных машин с использованием индукционных преобразователей теорию магнитных измерений, методику расчета одиночных и систем индукционных измерительных преобразователей, практику магнитных измерений;

провести комплексное теоретическое и экспериментальное

исследование электромагнитных процессов в асинхронных электрических машинах со скосом пазов, разработать математическую модель электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, базирующуюся на отказе от допущений общей теории асинхронных машин, не соответствующих современному уровню знания и возможностям вычислительной техники;

разработать теорию, методику расчета асинхронных машин со скосом пазов как развитие теории и методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы;

на основе результатов проведенных исследований разработать конструкцию, методику расчета модификаций асинхронных электродвигателей повышенного технического уровня, основывающихся на электромагнитных явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов. Провести экспериментальное исследование опытных партий таких двигателей.

Степень и методы исследования. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований.

Методологические основы работы базируются на достижениях различных наук и прежде всего теоретической электротехники, технической электродинамики, теории электрических машин, электрических измерений, методов вычислительной математики.

Экспериментальные исследования проведены как на лабораторных физических моделях, так и на опытных партиях асинхронных машин, а также на серийно выпускаемых асинхронных электродвигателях.

Теоретическая ценность работы. В работе разработаны научные основы трехмерного системного анализа электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронных машинах со скосом па-

зов. На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получили дальнейшее развитие теория электрических цепей, теория электрических машин.

Научная новизна работы. Основным научным вкладом работы является создание научной концепции о трехмерной системной взаимосвязи электромагнитных параметров обмоток и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле асинхронных машин со скосом пазов. При этом был вскрыт механизм взаимодействия проводника с результирующим квазистационарным электромагнитным полем, сформированном волнами со взаимнопересекающимися фронтами. Создана теория электрических цепей в рассматриваемых полях и изучены свойства этих цепей. Создана теория магнитных измерений в рассматриваемых полях с применением одиночных и систем индукционных преобразователей конечных размеров, разработаны соответствующие средства, методы и расчетные методики. Установлены закономерности и явления, определяющие особенности электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, разработана математическая модель электромагнитных процессов в этих машинах, создана теория и методика расчета асинхронных машин со скосом пазов, как развитие общей теории и методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы.

Разработаны конструкция, методика расчета модификаций асинхронных двигателей повышенного технического уровня, базирующихся на электромагнитных явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов. Проведено экспериментальное исследование опытных партий асинхронных двигателей новых конструкций.

Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты позволяют:

отказаться от "точечных" методов анализа и расчета электромагнитных устройств в сложных по характеру распределения в пространстве результирующих квазистационарных магнитных полях; разрабатывать новые направления создания конструкций асинхронных двигателей, повышенного технического уровня, а также проектировать эти двигатели на основе трехмерного системного анализа электромагнитных процессов, имеющих место в этих машинах; проектировать системы индукционных преобразователей, а также одиночные преобразователи конечных размеров для магнитных измерений заданной точности в рассматриваемых полях.

Теоретические и экспериментальные исследования завершены созданием теории, расчетной методики асинхронных машин со скосом пазов, учитывающих особенности реально имеющих место электромагнитных процессов в этих машинах. Разработаны конструкции, методика расчета модификаций асинхронных двигателей повышенного технического уровня. Проведено испытание опытных партий двигателей. Разработана теория, методика расчета одиночных и систем индукционных преобразователей для магнитных измерений в рассматриваемых полях.

Результаты работы использованы в научно-исследовательской и конструкторской практике ряда КБ, НИИ, заводов.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы использованы в ряде организаций стран СНГ, занимающихся разработкой, исследованием и проектированием асинхронных машин, таких как СПКБ электродвигателей ПД "Укрэлектромаш", ОЭК АН Молдовы, НИИЭМ и других.

С применением результатов диссертации спроектированы

одно- и двухскоростные асинхронные двигатели повышенного технического уровня запущенные в серийное производство.

На защиту выносятся результаты, полученные лично автором диссертации:

основная научная концепция диссертации, заключающаяся в трехмерной системной взаимосвязи электромагнитных параметров обмоток асинхронных машин со скосом пазов и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины; теория электрических цепей, находящихся в рассматриваемых полях;

теория и практика магнитных измерений в рассматриваемых полях с применением индукционных преобразователей;

асинхронные машины со скосом пазов - теория, методика расчета, как развитие общей теории асинхронных машин, методики их расчета на базе основной концепции работы;

модификации асинхронных двигателей повышенного технического уровня, основанные на электромагнитных явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов - конструкция, методика расчета, результаты теоретического и экспериментального исследования.

Достоверность научных положений работы подтверждена физически обоснованной и математически корректной постановкой и решением изучаемых проблем, применением строгих физических и математических методов анализа, достаточно хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных данных.

Основные теоретические и экспериментальные результаты диссертации прошли теоретическую, экспериментальную проверку в научно-исследовательских организациях, в промышленности, получили положительные отзывы, а также используются в практической деятельности.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены:

на Двудесятилетней научной сессии в Высшем машино-электротехническом институте, Высшем народном военно-морском училище им. Н.И. Ващарова (НФВ, 1969г.); на III Международном симпозиуме по теоретической электротехнике (Москва, 1965г.); на I-ой Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике (Ташкент, 1967г.); на Всесоюзной конференции "Современные проблемы электромеханики" (Москва, 1989г.); на 2-ой республиканской межвузовской научно-технической конференции по электротехнике (Запорожье, 1969г.); на заседании Московской городской секции НТО по электрическим машинам (1989г.); на семинаре "Электрические машины" Института электродинамики АН Украины (1990г.); на семинаре кафедры Электрические машины Одесского политехнического института (1969г.); на научных конференциях в Одесском институте инженеров морского флота (1969-1993 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 статей в журналах и сборниках и 8 отчетов по научно-исследовательским работам.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложения. Всего рукопись содержит 454 страницы, имеется 117 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 212 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и народнохозяйственное значение проблемы, решению которой посвящена диссертационная работа, сформулированы цель, задачи и методы исследования.

Изложены основные результаты, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена изучению состояния проблемы и формулировке задач исследования.

Поиск электромагнитных резервов совершенствования асинхронных машин поставил на повестку дня вопрос о переходе от "точечного" к трехмерному, системному методу анализа электромагнитных процессов. Для этого оказалось необходимым отказаться, на базе фундаментальных исследований, от ряда допущений, принятых при разработке теории асинхронных машин в начальный период ее становления и не соответствующих современному уровню знаний и возможностям вычислительной техники. Рассмотрение выявило необходимость отказаться от допущения о том, что фронт волны результирующего магнитного поля асинхронной машины, в общем случае, во всех режимах работы параллелен оси пазов обмотки статора; отказаться от допущения о независимости электромагнитных параметров обмоток машины и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины, а также других, что дает возможность приступить к разработке теории, методов анализа электромагнитных процессов, методик расчета электромеханических и энергетических характеристик асинхронных машин со скосом пазов адекватных реально имеющим место электромагнитным процессам в машине.

Анализ литературных источников свидетельствует о том, что в настоящее время не известен механизм взаимодействия проводников с неоднородным, сложным по характеру распределения в пространстве результирующим магнитным полем, сформированном волнами со взаимопересекающимися фронтами. Не разработана теория электрических цепей, находящихся в рассматриваемых магнитных полях. Это привело, в частности, к тому, что современные расчетные методики электромагнитных устройств

базируются на "точечных" математических моделях, не разработана теория и практика магнитных измерений в рассматриваемых полях с применением индукционных измерительных преобразователей следствием чего может явиться утрата информации при магнитных измерениях в асинхронных машинах со скосом пазов и другие кризисные явления.

Отсутствуют сведения о закономерностях изменения электромагнитных величин, определяемых результирующим магнитным полем основной гармонической составляющей намагничивающих сил асинхронной машины со скосом пазов.

В асинхронных машинах со скосом пазов, работающих под нагрузкой, имеют место значительные резервы энергии результирующего магнитного поля, методы практического использования которых в настоящее время не разработаны.

Не изучено влияние перераспределения полей основной и высших гармонических составляющих на основные и добавочные потери, а также на поперечные токи и обусловленные ими потери.

Отсутствует знание и понимание сущности электромагнитных процессов имеющих место в работающих под нагрузкой асинхронных машинах со скосом пазов.

Не изучена возможность и необходимость учета в расчетных методиках и конструкции электрических машин характерных особенностей результирующего магнитного поля, сформированного волнами со взаимнопересекающимися фронтами, а также особых свойств, приобретаемых электрическими цепями в рассматриваемых магнитных полях.

Проведенный анализ свидетельствует, что в настоящее время не разработаны теория и методика расчета асинхронных машин со скосом пазов, учитывающие особенности электромагнитных процессов, имеющих место в этих машинах.

Сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена изучению механизма взаимодействия проводника с квазистационарным магнитным полем интерференции, сформированном волнами со взаимопересекающимися фронтами. Исследовалась эффективность взаимодействия проводника с полем интерференции, которая определялась как

$$K_{\text{эф}} = \frac{E_0}{E_{0M}} = \left| \frac{\sum_i \vec{E}_{0i}}{\sum_i |\vec{E}_{0i}|} \right|, \quad (1)$$

где E_0 - ЭДС проводника, наводимая результирующим магнитным полем; E_{0M} - наибольшее значение ЭДС, которое данное поле могло бы навести в проводнике; E_{0i} - ЭДС, наводимая результирующим полем в i -ом элементарном участке проводника.

Для проводников, расположенных вдоль фронта воли поля напряженности H_1 , участвующего в формировании результирующего, распространяющегося в линейной среде магнитного поля, коэффициент эффективности определится как

$$K_{\text{эф}1} = \left[\left(\int_{a_1}^{a_2} A_1 dx \right)^2 + \left(\int_{a_1}^{a_2} B_1 dx \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left(\int_{a_1}^{a_2} H_0 dx \right)^{-1}, \quad (2)$$

где H_0 - напряженность результирующего магнитного поля; A_1, B_1 - соответственно модули проекций векторов H_0 (в пределах длины проводника с учетом пространственного распределения поля H_0 и ориентации в нем проводника) на оси прямолинейной декартовой системы координат; x - текущая координата, при этом значение $x = 0$ соответствует точке, в которой волны полей, формирующих результирующее поле, находятся в противофазе; a_1, a_2 - координаты крайних точек проводника вдоль оси x .

При анализе предполагалось, что $H_1 > H_2$, где H_2 - напряженность второго магнитного поля, участвующего в формировании результирующего поля. Результаты исследований для слу-

чая $H_2/H_1 = 0,99$ и длине проводника $l = 2ac$ отражены на рис. 2. При этом $K_{\text{эф}2}$ - коэффициент эффективности для проводников ориентированных вдоль фронта волны напряженностью H_2 .

Эффективность взаимодействия проводника с полем интерференции нелинейно, неоднозначно и глубоко зависит от длины проводника, угла взаимного скоса фронтов волн, формирующих поле интерференции, ориентации проводника относительно фронтов волн полей H_1, H_2 , зон поля, которые проходит проводник с ростом его длины и последовательности их чередования, положения в пространстве начальной точки отсчета длины проводника. Особенно низкие значения коэффициентов $K_{\text{эф}1}, K_{\text{эф}2}$ приобретают проводники в зоне поля интерференции с центром в точке $x=0$ при симметричном их расположении относительно этой точки. Установлено, что $K_{\text{эф}1} > K_{\text{эф}2}$.

Эффективность взаимодействия проводников с полем интерференции нелинейно, неоднозначно и глубоко зависит от уровня отношения H_2/H_1 . При этом вид закономерности изменения $K_{\text{эф}}$ с ростом величины H_2/H_1 зависит как от геометрии проводника, так и данных волн полей, формирующих поле интерференции.

Одному и тому же проводнику в рассматриваемом поле интерференции соответствует не одна диаграмма направленности, как это имеет место в плоскопараллельных полях, а бесчисленное множество, определяемых данными волн полей, формирующих поле интерференции, а также зоной результирующего поля, в которой находится проводник.

Квазистационарное магнитное поле, сформированное полями со взаимнопересекающимися фронтами волн, является неоднородным по уровню эффективности взаимодействия проводника с результирующим полем.

Установлено, что в рассматриваемом поле, в общем случае,

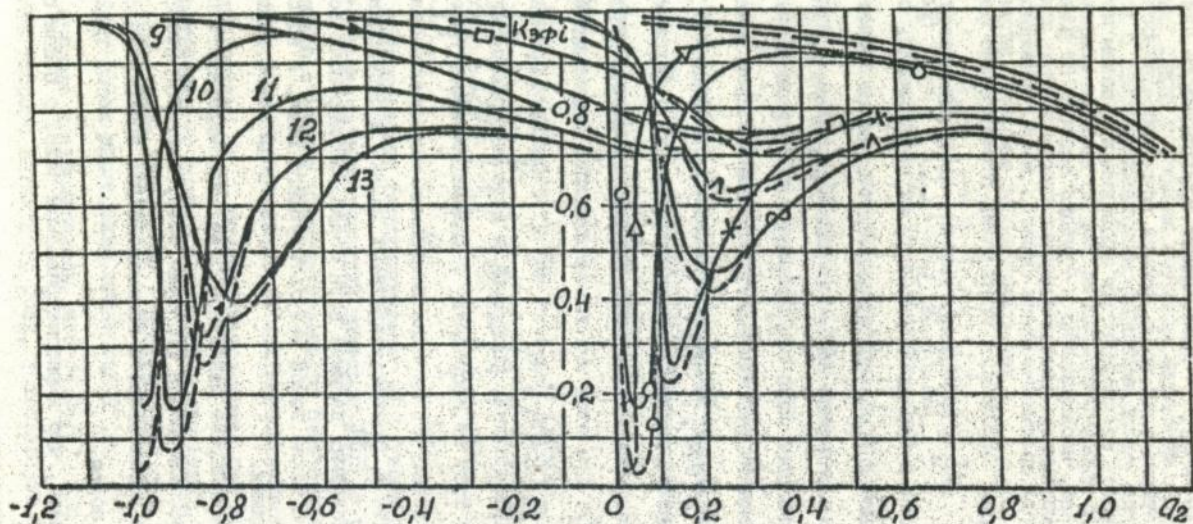


Рис. 2. Зависимость $K_{эф1}, K_{эф2}$ от длины проводника (положения его в пространстве)

для $H_2/H_1 = 0,99$. I. — $a_1 = 0$; 2. Δ — $a_1 = -0,025$; 3. \circ — $a_1 = -0,05$; 4. \ast — $a_1 = -0,015$;
 5. ∇ — $a_1 = -0,25$; 6. \wedge — $a_1 = -0,4$; 7. \square — $a_1 = -0,6$; 8. \rightarrow — $a_1 = -0,8$; 9. $a_1 = -1,0$;
 10. $a_1 = -1,025$; 11. $a_1 = -1,075$; 12. $a_1 = -1,15$; 13. $a_1 = -1,2$. — $K_{эф1}$, --- $K_{эф2}$.

$K_{\text{эф}} = f(t)$, где t - время. Характер зависимостей $K_{\text{эф}} = f(t)$ зависит от уровня H_2/H_1 , угла взаимного скоса фронтов волн, геометрии проводника.

Эффективность взаимодействия проводника с полем интерференции определяется его формой.

Нелинейность среды распространения рассматриваемого поля интерференции существенно влияет на эффективность взаимодействия проводника с полем.

Экспериментальная проверка установленных положений была проведена путем исследования эффективности взаимодействия проводника с результирующим магнитным полем в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя со скосом пазов. При этом была предусмотрена возможность плавного изменения уровня H_2/H_1 , изменения зон поля интерференции, в которой находится проводник и др. Результаты эксперимента качественно и количественно подтвердили данные теоретического анализа.

В третьей главе исследованы свойства электрических цепей, находящихся в квазистационарных неоднородных пересекающихся магнитных полях.

В линейной среде при относительном перемещении зон результирующего магнитного поля, сформированного волнами со взаимопересекающимися фронтами, и одновиткового электрического контура, ЭДС контура при заданном уровне отношения H_2/H_1 определится как

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = -c \frac{d(K_{\text{эф}}(t), H_0)}{dt} = -c \left(K_{\text{эф}}(t) \frac{dH_0}{dt} + H_0 \frac{dK_{\text{эф}}(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Периодически изменяющаяся во времени эффективность взаимодействия электрического контура с результирующим магнитным полем является причиной возникновения значительной амплитудной модуляции ЭДС контура низкочастотным сигналом сложной формы,

являющегося функцией как геометрии контура, так и данных воли полей, формирующих результирующее магнитное поле.

Для суждения о спектре гармонических составляющих ЭДС, определяемых периодически изменяющейся во времени эффективностью взаимодействия контура с результирующим полем на ЭВМ осуществлялось разложение зависимостей $K_{эф}(t)$ в ряд Эйлера-Фурье с помощью интерполяционного процесса Эйткена-Лагранжа. Гармонический анализ показал, что зависимости $K_{эф}(t)$ в общем случае описываются сходящимся рядом, в состав которого входят нулевая, четные и нечетные гармонические составляющие. Амплитудный спектр модулирующего сигнала является функцией геометрических данных воли полей, формирующих результирующее магнитное поле.

Модулируемому сигналу соответствуют две боковые полосы гармонических составляющих ЭДС, частотный спектр которых определяется частотным спектром модулирующего сигнала. В кривой ЭДС контура генерируются как высшие, так и низшие гармонические составляющие в том числе и субгармоники. Эти гармонические составляющие обусловлены не соответствующей модуляцией поля, а генерируются как результат взаимодействия контура с перераспределенным в пространстве результирующим полем.

Нелинейность среды существенно и неоднозначно сказывается на гармоническом составе ЭДС контура, обусловленном зависимостью $K_{эф}(t)$.

Уровень всех гармонических составляющих ряда $K_{эф}(t)$, кроме нулевой, можно свести к минимуму, если длина проводника (активной стороны контура) будет соответствовать $a = a_2 - a_1 = 1,0$.

Для контура, длина активной стороны которого соответствует значениям $a \ll 0,05$, влиянием на кривую ЭДС гармонических составляющих, обусловленных зависимостью $K_{эф}(t)$, во многих

случаях можно пренебречь.

Зависимость $dk_{\text{ЭФ}}(t)/dt$ представляет собой периодическую знакопеременную, сложную по характеру изменения во времени функцию. Вид зависимости $dk_{\text{ЭФ}}(t)/dt$ определяется уровнем H_2/H_1 , углом взаимного скоса фронтов волн полей H_1, H_2 ; длиной проводника, ориентацией проводника в пространстве.

Зависимости $dk_{\text{ЭФ}}(t)/dt$ соответствует две боковые полосы гармонических составляющих ЭДС, частотный спектр которых определяется частотным спектром модулирующего сигнала.

Нелинейность среды распространения результирующего магнитного поля неоднозначно и существенно влияет на амплитудные характеристики частотного спектра исследуемых зависимостей.

Результаты теоретического и экспериментального анализа свидетельствуют, что в случае влияния на величину ЭДС контура одновременно обоих слагаемых формулы (3) возникает зависимость формы модулирующего сигнала, помимо установленных факторов для отдельных слагаемых, от частоты основного сигнала. В области низких значений угловой частоты ω увеличение значений частоты основного сигнала соответствует тенденции сглаживания кривой модулирующего сигнала. При $\omega \geq 157$ рад/с форма кривой модулирующего сигнала определяется практически только первым слагаемым формулы (3).

Влияние нелинейности среды распространения результирующего поля на модулирующий сигнал при одновременном воздействии на величину ЭДС контура обоих слагаемых формулы (3) носит многоплановый, неоднозначный характер.

Потокосцепление обмотки статора машины с результирующим магнитным потоком можно определить как

$$\Psi_{\text{рез}} = \Psi_{\text{сг}} + \Psi_{\text{1м}}, \quad (4)$$

где $\Psi_{\text{сг}}$ - потокосцепление обмотки статора с ее потоком рас-

сеяния; Ψ_{1m} - потокосцепление обмотки статора с потоком взаимоиндукции машины Φ_0 .

На основании (4)

$$L_{11} = L_{1\sigma} + L_{1m}, \quad (5)$$

где L_{11} - полная индуктивность обмотки статора; $L_{1\sigma}$ - индуктивность, соответствующая потоку рассеяния обмотки статора; L_{1m} - индуктивность взаимоиндукции, соответствующая потоку взаимоиндукции.

Из сопоставления формул (1)-(5) следует, что коэффициент $K_{\text{эф}1}$ входит в состав индуктивности L_{1m} , которая в свою очередь входит в состав полной индуктивности L_{11} . Аналогично можно показать, что коэффициент $K_{\text{эф}2}$ входит в состав полной индуктивности обмотки ротора L_{22} . Следовательно, при заданной геометрии электрических цепей, индуктивности обмоток асинхронной машины со скосом пазов нелинейно и глубоко зависят от данных волн полей, формирующих результирующее поле в воздушном зазоре машины и, в частности, от отношения намагничивающих сил обмоток F_2 / F_1 , зависящего от токов в обмотках машины. В соответствии с действующей классификацией, электрические цепи, параметры которых существенно зависят от токов, являются нелинейными.

В общем случае, в линейных электрических цепях с током и без тока, находящихся в распространяющемся в линейной среде результирующем квазистационарном магнитном поле, сформированном полями со взаимопересекающимися фронтами волн, наблюдается целый ряд явлений принципиально невозможных в линейных цепях, а именно:

амплитуда выходного сигнала непропорциональна амплитуде входного сигнала вследствие амплитудной модуляции выходного сигнала; при плавном изменении параметров входного сигнала мо-

жет иметь место практически скачкообразное изменение выходного сигнала; при действии на входе цепи синусоидального сигнала в выходном сигнале возникают дополнительные полосы гармонических составляющих, отсутствующие во входном сигнале; в общем случае, изменение частоты входного сигнала приводит к изменению характеристик частотного спектра выходного сигнала, а также другие явления.

Установлена системная трехмерная взаимосвязь электромагнитных параметров электрических цепей под током, находящихся в рассматриваемом результирующем поле и участвующих в его формировании, и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле. Результаты проведенного анализа дают возможность классифицировать электрические цепи, находящиеся в результирующем магнитном поле, сформированном волнами со взаимнопересекающимися фронтами, как, в общем случае, нелинейные электрические цепи.

Глава четвертая посвящена изучению проблемы магнитных измерений в результирующем квазистационарном неоднородном магнитном поле, сформированном волнами со взаимнопересекающимися фронтами (применительно к магнитным измерениям в воздушном зазоре асинхронных машин со скосом пазов, работавших под нагрузкой, с применением индукционных преобразователей).

Показано, что при разработке конструкции индукционного измерительного преобразователя учет только градиента скалярного поля значений индукции рассматриваемого результирующего магнитного поля, как это принято в настоящее время, не достаточен - необходим учет всех особенностей распределения в пространстве трехмерного результирующего магнитного поля,

Установлено, что каждой зоне результирующего магнитного поля соответствуют, при заданном уровне отношения индукций

полей, формирующих результирующее поле B_2/B_1 , свои закономерности изменения величины магнитного потока Φ_0 и наводимых им ЭДС в функции геометрии активной части статоров индукционного преобразователя.

Результаты исследования дали возможность математически описать зависимость точности магнитных измерений в рассматриваемых полях от параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле, и геометрических данных индукционного преобразователя.

Проведенный анализ показал, что в рассматриваемых магнитных полях точность магнитных измерений с использованием плоских индукционных преобразователей определяется не столько суммарной длиной провода обмотки, как это считается в настоящее время, сколько размерами, формой активных статоров преобразователя, ориентацией их в магнитном поле.

Полная длина провода одновиткового плоского индукционного преобразователя без ферромагнитного сердечника, сконструированного на основе проведенных исследований в десятки раз больше рекомендуемой в настоящее время, что обеспечивает резкое повышение чувствительности преобразователя при достаточном уровне точности магнитных измерений.

Точность магнитных измерений с использованием систем индукционных преобразователей в пределах зоны результирующего магнитного поля ограниченной длины, определяется не только индукционным преобразователем, находящимся в наиболее сложной по характеру пространственного распределения области результирующего поля, но совокупностью магнитных измерений всех индукционных преобразователей, входящих в систему.

Для всего диапазона скольжений в двигательном режиме асинхронных машин со скосом пазов, и всего возможного диапа-

зона значений скоса пазов, для магнитных измерений в воздушном зазоре асинхронных машин со скосом пазов может быть рекомендована измерительная система из пяти последовательно расположенных в аксиальном направлении равных плоских пассивных индукционных преобразователей без ферромагнитного сердечника, активные стороны которых сориентированы вдоль оси волн поля напряженностью H_1 .

При малых значениях угла сдвига по фазе векторов МДС F_1 и минус F_2 (менее 2 эл.град.) и высоких значениях отношения H_2/H_1 (0,97 и выше) целесообразно использование измерительной системы, состоящей из четного числа индукционных преобразователей ($N = 4$, в некоторых случаях $N = 2$), как обеспечивающую тем большую точность магнитных измерений, чем выше уровень отношения H_2/H_1 (рис.3).

Разработана методика расчета системы плоских индукционных преобразователей для магнитных измерений в воздушном зазоре асинхронных машин со скосом пазов, работающих под нагрузкой, при этом удалось снизить в несколько раз число преобразователей, входящих в систему.

Рассмотрена проблема применения плоских пассивных индукционных преобразователей в качестве первичных измерительных преобразователей в микропроцессорных системах векторного управления асинхронными электроприводами.

Разработана теория и практика магнитных измерений в "мертвой" зоне рассматриваемого поля.

Пятая глава посвящена разработке теории, методики расчета асинхронных машин со скосом пазов, как развитие теории, методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы.

Разработка теории асинхронных машин со скосом пазов осуществлялась на основе отказа от ряда допущений, введенных

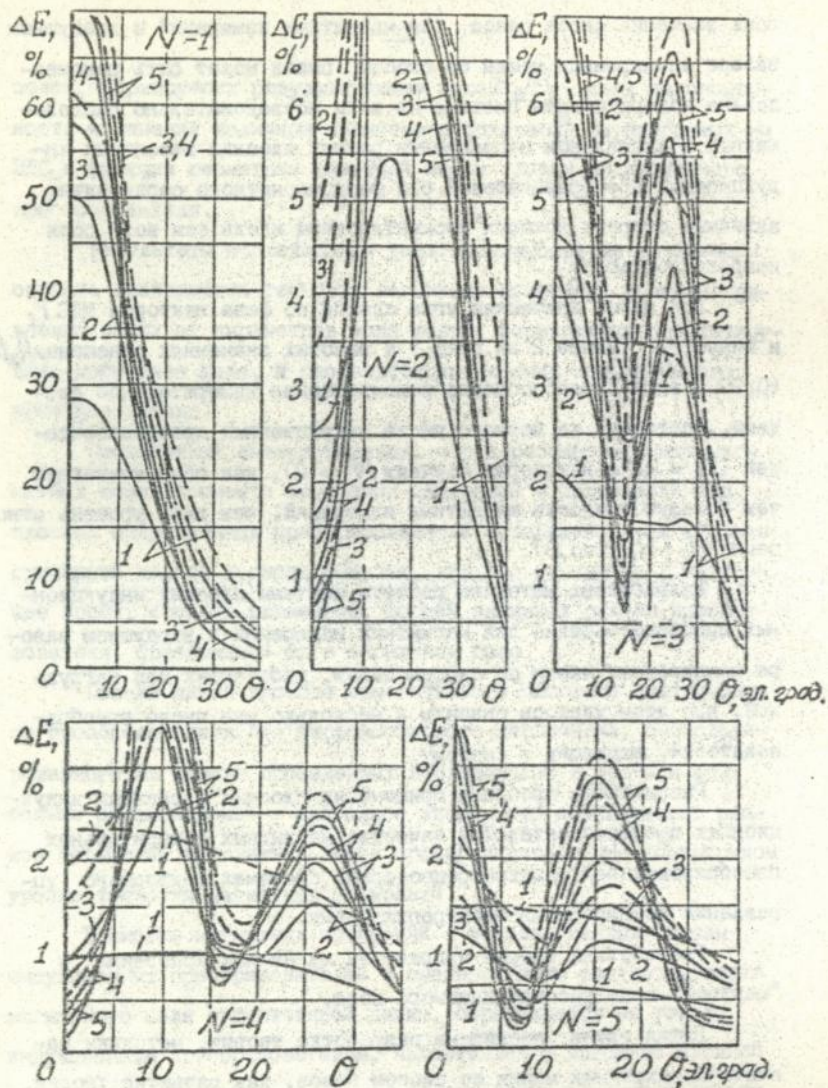


Рис.3. Уровень погрешности магнитных измерений для измерительных систем ($a_2 = 0,1$). 1. $H_2/H_1 = 0,8$; 2. $H_2/H_1 = 0,9$; 3. $H_2/H_1 = 0,93$; 4. $H_2/H_1 = 0,97$; 5. $H_2/H_1 = 0,99$.

в теорию электрических машин в начальный период ее становления вследствие недостаточности сведений и слабого развития вычислительной техники. Из них основные:

1. Отказ от допущения о том, что результирующее магнитное поле основной гармонической составляющей по своим параметрам не изменяется вдоль оси пазов обмотки статора во всех режимах работы машины. В математической модели машины будет учтено реально существующее трехмерное результирующее магнитное поле.

2. Учет в математической модели реально существующего результирующего магнитного поля выявил необходимость отказа при записи системы уравнений от допущения о том, что электромагнитные параметры обмоток и параметры волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины, взаимнезависимы. В рассматриваемых магнитных полях имеет место глубокая трехмерная системная взаимосвязь электромагнитных параметров обмоток машины и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины.

3. Отказ от допущения о том, что в асинхронных машинах со скосом пазов имеет место совпадение плоскостей, определяющих в аксиальном направлении геометрическую и электромагнитную симметрию машины (рис.1).

4. Отказ от допущения о том, что результирующее магнитное поле машины со скосом пазов может быть подразделено на два поля: неизменное по своим характеристикам вдоль оси машины и определяющее величину электромагнитного момента, а также переменную его часть, определяющую уровень рассеяния машины, обусловленный скосом пазов. Отказ от этого допущения основан на том, что оно не соответствует физике электромагнитных процессов, имеющих место в машине, и, как следствие, может

привести к ошибкам в расчетной практике.

В асинхронных машинах со скосом пазов пространственное несовпадение плоскостей, определяющих в аксиальном направлении симметрию геометрии машины и симметрию электромагнитных процессов, приводит к возникновению дополнительного электромагнитного усилия между контурами с током обмоток и, как следствие, дополнительному взаимному пространственному смещению этих контуров. Дополнительное смещение контуров изменяет энергию поля в воздушном зазоре машины, изменяет электромагнитные параметры, выходные характеристики машины. Уровень взаимного смещения контуров является функцией данных геометрии машины и данных волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины.

Установлены закономерности изменения основных электромагнитных величин асинхронных машин со скосом пазов, определяемые результирующим магнитным полем основной гармонической составляющей.

На основании (1), (2) формула для коэффициента скоса пазов обмотки статора $K_{скз}$ записывается с учетом насыщения стали машины на пути основного потока следующим образом

$$K_{скз} = \left[\int_{-0,5}^{0,5} \operatorname{th}(1+k^2-2k\cos(\theta+B_{ск}x))^{1/2} F_{00}^{-1} \cdot \cos(\operatorname{arctg} \frac{\sin(\theta+0,5B_{ск})}{k^{-1}-\cos(\theta+0,5B_{ск})} - \operatorname{arctg} \frac{\sin(\theta+B_{ск}x)}{k^{-1}-\cos(\theta+B_{ск}x)}) \cdot dx \right]^2 \int_{-0,5}^{0,5} \operatorname{th}(1+k^2-2k\cos(\theta+B_{ск}x))^{1/2} F_{00}^{-1} \cdot x$$

$$\times \sin \left(\arctg \frac{\sin(\theta + 0,5\beta_{ск})}{\kappa^{-1} - \cos(\theta + 0,5\beta_{ск})} - \arctg \frac{\sin(\theta + \beta_{ск} x)}{\kappa^{-1} - \cos(\theta + \beta_{ск} x)} \right) \times$$

$$\times dx \left. \right\}^{\frac{1}{2}} \int_{-0,5}^{0,5} \left(\operatorname{th} (1 + \kappa^2 - 2\kappa \cos(\theta + \beta_{ск} x)) \right)^{\frac{1}{2}} F_{00}^{-1} dx \Big)^{-1}$$

В (6) - $\kappa = F_2/F_1$; F_{00} - МДС машины в режиме идеального холостого хода (в относительных единицах); θ - угол сдвига по фазе МДС F_1 и минус F_2 ; $\beta_{ск}$ - угол скоса пазов.

Отдельные результаты анализа отражены на рис.4. На рис.4 коэффициент $K_{ск2}$ - коэффициент скоса пазов обмотки ротора. Теоретический анализ и эксперимент свидетельствует о том, что для асинхронных машин со скосом пазов зависимости $K_{ск1} = f(\beta_{ск})$ и $K_{ск2} = f(\beta_{ск})$, полученные с учетом реально существующих особенностей электромагнитных процессов, описываются системами кривых, при этом каждая из кривых, входящая в систему, определяется совокупным влиянием как данных геометрии машины, так и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины. При заданном значении $\beta_{ск}$ двигатель по мере изменения скольжения переходит с одной кривой на другую в связи с зависимостью от скольжения данных волн полей, формирующих результирующее магнитное поле.

Обмоточные коэффициенты, коэффициент приведения параметров вторичной цепи к первичной в асинхронной машине со скосом пазов описываются системами кривых. При этом каждая из кривых, входящая в систему, определяется совокупным влиянием как данных геометрии машины, так и данных волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины.

В асинхронных машинах со скосом пазов электромагнитные параметры обмоток и параметры волн полей, формирующих резуль-

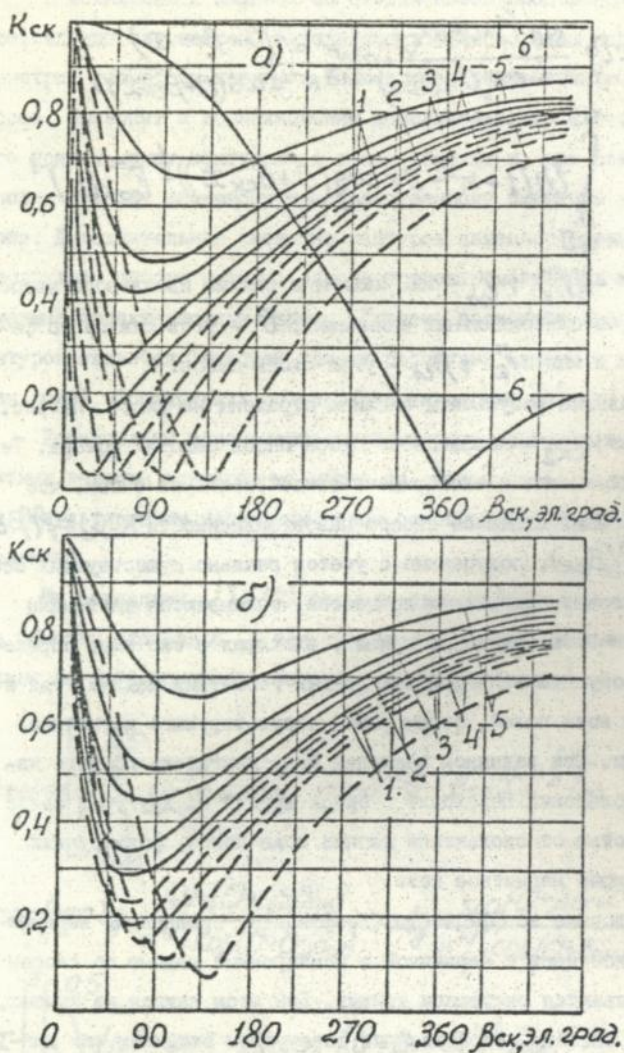


Рис. 4. Зависимость $K_{сскi}$ обмоток асинхронной машины от угла $\beta_{сск}$ и уровня отношения E_2/E_1 . а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 3$ эл.град.
1. $K = 0,99$; 2. $K = 0,97$; 3. $K = 0,93$; 4. $K = 0,9$;
5. $K = 0,8$; 6. $K_{сск}$ по существующим представлениям.
— $K_{сск1}$, - - - $K_{сск2}$.

тирующее магнитное поле машины, находятся в трехмерной системе взаимосвязи.

В рассматриваемых машинах установлено явление электромагнитной мультипликации скоса пазов, выражающееся, в частности, в возможности выхода значений $K_{ск}$ на восходящую ветвь зависимости $K_{ск} = f(\beta_{ск})$ при углах $\beta_{ск} \ll 360$ эл.град. и одновременном повышении уровня энергии магнитного поля, что особенно проявляется при $F_2/F_1 > 0,9; \theta \leq 3$ эл.град. (рис.1, рис.4).

Величина результирующего магнитного потока основной гармонической составляющей в воздушном зазоре асинхронной машины со скосом пазов является функцией, в частности, как данных геометрии машины, так и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле. В общем случае, увеличение угла скоса пазов приводит к усилению магнитного потока результирующего магнитного поля основной гармонической составляющей машины. Величины ЭДС обмоток асинхронной машины со скосом пазов, наведенные результирующим магнитным полем основной гармонической составляющей, зависят как от данных, в частности, геометрии машины, так и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле.

Экспериментально изучены поля пространственных высших гармонических составляющих в воздушном зазоре асинхронного короткозамкнутого электродвигателя со скосом пазов, работающего под нагрузкой. Установлено, что, в отличие от результирующего магнитного поля основной гармоники, поля высших гармонических составляющих в воздушном зазоре машины с ростом скольжения существенно не перераспределяются. Причиной этого является низкое значение уровня отношения МДС F_{2r}/F_{1r} , формирующих результирующее магнитное поле.

На базе основной научной концепции диссертации разрабо-

тана математическая модель, описывающая электромагнитные процессы в асинхронной машине со скосом пазов. Математическая модель представляет собой нелинейную систему трансцендентных интегральных уравнений, позволяющая осуществить трехмерный системный анализ электромагнитных процессов в асинхронном двигателе при любом значении скольжения. Для решения системы уравнений был применен итерационный метод Ньютона, как давший лучший результат, по сравнению с другими существующими, по времени счета на ЭВМ.

Признаком решения системы уравнений является стабилизация величины дополнительного электромагнитного усилия, действующего между контурами с током обмоток машины, по мере изменения взаимного пространственного положения рассматриваемых контуров.

Разработана методика расчета асинхронных машин со скосом пазов, как развитие современной методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы. В основу методики расчета положена изложенная выше математическая модель, описывающая электромагнитные процессы в асинхронной машине со скосом пазов; методы расчета основных и добавочных потерь в стали и меди машины, учитывавшие трехмерное распределение результирующего магнитного поля основной и высших гармонических составляющих, влияние на электромагнитные процессы явления электромагнитной мультипликации скоса пазов; пространственного несовпадения плоскостей, определяющих в аксиальном направлении геометрическую и электромагнитную симметрию машины и др. При этом, в частности, при расчете потерь от поперечных токов, учитываются не только потери определяемые высшими гармоническими составляющими, но также потери от поперечных токов основной гармонической составляющей.

Глава шестая посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию модификаций асинхронных электродвигателей, основанных на явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов.

Установлено, что совокупность электромагнитных явлений, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, обуславливает для всех имеющих место в машинах уровней отношения F_2/F_1 и значений углов θ в диапазоне $0 \leq \beta_{ск} < 30$ эл.град. ухудшение электромеханических характеристик. Диапазону значений $\beta_{ск} \geq 30$ эл.град. и уровню $F_2/F_1 > 0,9$; $\theta \leq 3$ эл.град. отвечает совокупность электромагнитных явлений, прежде всего явление электромагнитной мультипликации скоса пазов, улучшающее электромеханические характеристики машины, причем чем выше уровень F_2/F_1 , меньше величина угла θ , тем при меньших значениях угла $\beta_{ск}$ происходит улучшение характеристик машины.

Зависимость $M=f(\beta_{ск})$, построенная в относительных единицах, описывается не одной кривой, а системой кривых, каждая из которых определяется совокупным влиянием данных геометрии машины и параметров волн полей, формирующее результирующее магнитное поле машины (рис.5). Каждая из зависимостей $M=f(\beta_{ск})$ имеет восходящую часть, выход на которую является функцией уровней

$$F_2/F_1, \theta$$

Проведенные исследования показали возможность и целесообразность создания на основе электромагнитных явлений, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, модификации асинхронных электродвигателей с улучшенными пусковыми, виброакустическими характеристиками. Для этих двигателей в режиме пуска уровень

$$F_2/F_1 > 0,9; \theta \leq 3 \text{ эл.град.}; \beta_{ск} \geq 30 \text{ эл.град.}$$

Установлено, что вдоль оси машины со скосом пазов, работающей в зоне номинальной нагрузки, можно выделить две примерно

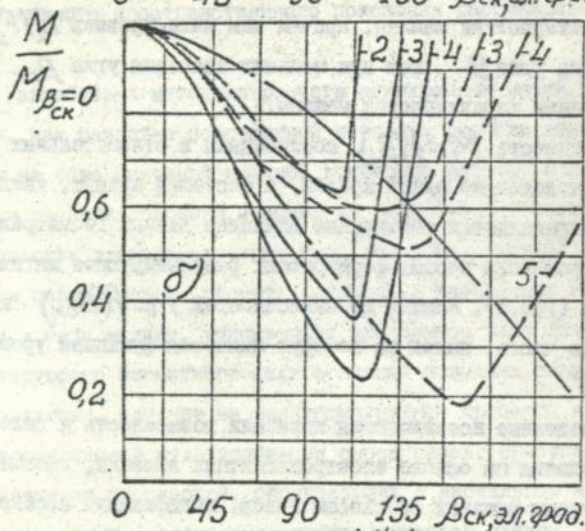
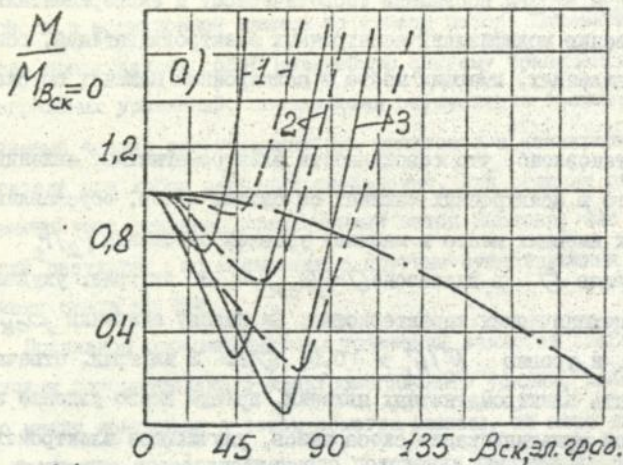


Рис. 5. Зависимость отношения $M/M_{B_{ск}=0}$ от угла $B_{ск}$.

а) $\theta = 1$ эл.град.; 3 эл.град.; б) $\theta = 7$ эл.град.;

15 эл.град. 1. $F_2/F_1 = 0,99$; 2. $F_2/F_1 = 0,97$;

3. $F_2/F_1 = 0,93$; 4. $F_2/F_1 = 0,9$; 5. $F_2/F_1 = 0,8$.

--- существующее представление, --- большее значение θ , — меньшее значение θ .

равные зоны, соответствующие половине длины пакета стали каждая - зону повышенного значения результирующего магнитного потока основной гармонической составляющей, значений $\cos \psi_2$ по сравнению с той же машиной без скоса пазов (для заданного значения скольжения) и зону пониженных значений потока и $\cos \psi_2$. Здесь ψ_2 - угол сдвига по фазе тока I_2 относительно ЭДС E_2 . Одновременно зоне повышенных значений потока и $\cos \psi_2$ соответствует повышенное значение коэффициента $K_{ск2}$, пониженное значение приведенных значений активного, реактивного и полного сопротивлений обмотки ротора (рис.6).

Установлено, что половина длины машин со скосом пазов, обладающая повышенными электромагнитными параметрами имеет, как правило, повышенное сцепление обмоток с результирующим магнитным потоком в зазоре при всех значениях скольжения, пониженной величиной приведенных значений активного, реактивного и полного сопротивлений обмотки ротора. В связи с этим целесообразно, с точки зрения повышения величины электромагнитного момента машины при заданном скольжении, выполнение взаимного скоса пазов лишь на части длины ее пакета стали.

Проведено экспериментальное исследование опытных партий асинхронных электродвигателей с частичным скосом пазов с фазным и короткозамкнутым роторами.

Теоретическое и экспериментальное исследование показало, что у асинхронных электродвигателей со скосом пазов на длине 0,3-0,5 общей длины пакета стали при рационально выбранной величине угла скоса пазов (в диапазоне $\Pi+35$ эл.град.) происходит улучшение электромеханических и виброакустических характеристик.

Разработана методика расчета асинхронных электродвигателей с частичным скосом пазов.

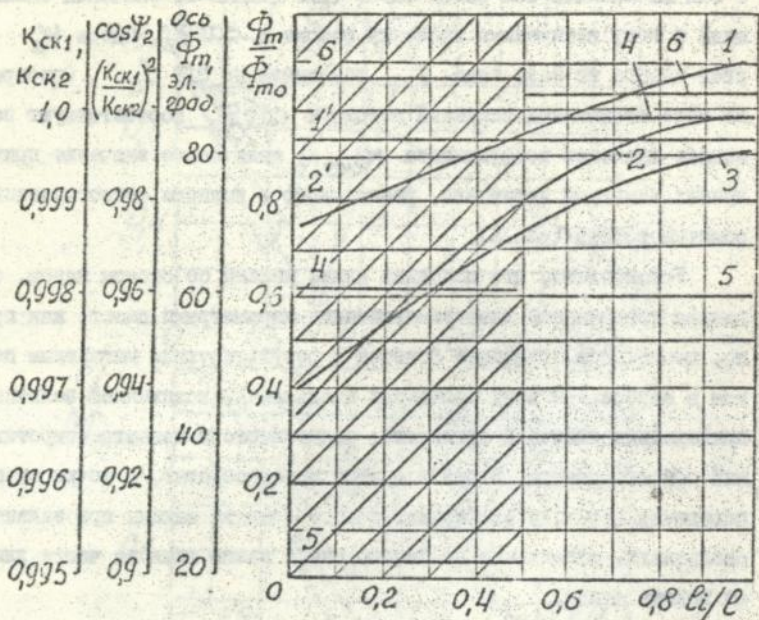


Рис. 5. Распределение электромагнитных параметров вдоль оси двигателя $P_{ном} = 2,2$ кВт; $\rho = 2$ ($\beta_{ск} = 0,3491$ эл.рад.) при номинальной нагрузке.

1, 1' - Φ_m / Φ_{m0} , где Φ_{m0} - значение Φ_m в режиме холостого хода; 2, 2' - $\cos^2 \psi_2$; 3 - ось волны Φ_m ,
 4 - $K_{ск1}$; 5 - $K_{ск2}$; 6 - $(K_{ск1} / K_{ск2})^2$.
 1', 2' - для двигателя с $\beta_{ск} = 0$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Развитие теории и практики электромашиностроения, задачи, поставленные перед отраслью экономикой страны, выдвинули на повестку дня вопрос об отказе, на базе фундаментальных исследований, от ряда допущений, введенных в теорию электрических машин в начальный период ее развития вследствие ограниченности как сведений, так и возможностей вычислительной техники.

Поставленные в диссертации задачи решались в рамках одной цели — разработки научных основ трехмерного системного анализа электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов и поиска на этой базе электромагнитных резервов совершенствования асинхронных машин. Разработанные научные основы анализа и вскрытые электромагнитные резервы нашли себе применение при проектировании серийных асинхронных электродвигателей различных модификаций и при создании новых модификаций асинхронных машин.

Получены следующие основные выводы и результаты.

I. Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование позволило:

разработать научную концепцию о трехмерной системной взаимосвязи электромагнитных параметров обмоток асинхронных машин со скосом пазов и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машин;

разработать теорию электрических цепей в рассматриваемых полях;

разработать теорию магнитных измерений в рассматриваемых полях с применением индукционных преобразователей, разработать соответствующие средства, методы и расчетные методики;

установить закономерности изменения основных электромагнитных величин, определяемых результирующим магнитным полем асин-

хронной машины со скосом пазов;

разработать теорию и методику расчета асинхронных машин со скосом пазов, как развитие теории и методики расчета асинхронных машин на базе основной научной концепции работы;

разработать конструкцию и методику расчета модификаций асинхронных двигателей, основанных на электромагнитных явлениях, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов.

2. В квазистационарном магнитном поле интерференции, сформированном полями со взаимнопересекающимися фронтами волн, эффективность взаимодействия проводника с полем интерференции нелинейно и глубоко зависит от геометрических параметров волн полей, формирующих результирующее поле, геометрических данных проводника.

Рассматриваемое квазистационарное неоднородное магнитное поле является неоднородным по уровню эффективности взаимодействия проводника с результирующим полем.

Диаграмма направленности проводника в поле интерференции, в общем случае, является функцией геометрических данных проводника и волн полей, формирующих результирующее поле.

3. В электрических печах, находящихся в рассматриваемых результирующих квазистационарных магнитных полях возникают явления, которые принципиально не могут иметь места в линейных печах (нелинейная и неоднозначная зависимость амплитуд входного и выходного сигналов, возможность скачкообразного изменения и др.).

Индуктивность электрических печей, находящихся в рассматриваемых полях, нелинейно и неоднозначно зависит от совокупности ряда одновременно действующих факторов (параметров волн, формирующих результирующее магнитное поле, геометрии проводников активной части контуров, магнитных свойств среды).

Установлена системная взаимосвязь индуктивности электрических цепей, находящихся в рассматриваемом результирующем магнитном поле, и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле. Результаты проведенного исследования дают возможность классифицировать электрические цепи, расположенные в результирующем магнитном поле, сформированном волнами со взаимопересекающимися фронтами, как, в общем случае, нелинейные электрические цепи.

4. В рассматриваемом результирующем квазистационарном магнитном поле электрические параметры катушек индукционных измерительных преобразователей зависят от параметров волн полей, формирующих результирующее поле.

Результирующее квазистационарное магнитное поле, сформированное полями со взаимопересекающимися фронтами волн, является неоднородным по уровню точности магнитных измерений с использованием одного и того же индукционного преобразователя.

Разработана методика расчета плоских маловитковых индукционных преобразователей конечных размеров, предназначенных для магнитных измерений в рассматриваемых магнитных полях, не требующих усиления выходного сигнала.

Разработана методика расчета систем плоских индукционных измерительных преобразователей для магнитных измерений в воздушном зазоре асинхронных машин со скосом пазов, работающих под нагрузкой. При этом удалось снизить в несколько раз число преобразователей, входящих в систему.

5. Разработана теория асинхронных машин со скосом пазов как развитие теории асинхронных машин на базе основной научной концепции работы.

Установлены закономерности изменения основных электромагнит-

ных величин, определяемых результирующим магнитным полем основной гармонической составляющей асинхронной машины со скосом пазов.

Обмоточные коэффициенты, коэффициенты скоса пазов $K_{СК1}, K_{СК2}$, коэффициент приведения параметров вторичной цепи к первичной в асинхронной машине со скосом пазов описываются системами кривых, при этом каждая из кривых, входящих в систему, определяется совокупным влиянием как данных геометрии машины, так и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле машины.

В асинхронных машинах со скосом пазов плоскости, определяющие в аксиальном направлении симметрию геометрии машины и симметрию электромагнитных процессов, в общем случае, не совпадают, что приводит к возникновению дополнительного электромагнитного усилия между контурами с токами обмоток и, как следствие, дополнительному взаимному смещению этих контуров. Дополнительное смещение контуров изменяет энергию поля в воздушном зазоре машины, изменяет электромагнитные параметры и выходные характеристики машины.

В асинхронных машинах установлено явление электромагнитной мультипликации скоса пазов, выражающееся, в частности, в возможности выхода значений $K_{СК}$ на восходящую ветвь зависимости $K_{СК} = f(\beta_{СК})$ при углах $\beta_{СК} \ll 360$ эл.град. и одновременном повышении уровня энергии магнитного поля, что особенно проявляется при $F_2/F_1 > 0,9$; $\theta \leq 3$ эл.град.

Разработана математическая модель электромагнитных процессов асинхронной машины, учитывающая вскрытие в процессе анализа явления и закономерности.

Разработана методика расчета асинхронных машин со скосом пазов, как развитие современной расчетной методики на базе основной научной концепции работы.

6. Для асинхронных машин диапазон значений $0 < \beta_{СК} < 30$ эл.град. отвечает ухудшению электромеханических характеристик, обу-

словенные электромагнитными явлениями, имеющими место в машинах со скосом пазов; зоне значений $\beta_{СК} \geq 30$ эл.град. и уровне $F_2/F_1 > 0,9$; $\theta \leq 3$ эл.град. отвечают электромагнитные явления, улучшающие электромеханические характеристики машины, причем чем выше уровень отношения F_2/F_1 , меньше величина угла θ , тем при меньших значениях угла $\beta_{СК}$ происходит улучшение характеристик машины.

Зависимость $M = f(\beta_{СК})$, построенная в относительных единицах, описывается не одной кривой, а системой кривых, каждая из которых определяется совокупным влиянием данных геометрии машины и параметров волн полей, формирующих результирующее магнитное поле.

На основе электромагнитных явлений, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, возможно создание модификации асинхронных электродвигателей с улучшенными пусковыми характеристиками. Для этих двигателей в режиме пуска уровень $F_2/F_1 > 0,9$; $\theta < 3$ эл.град.; $\beta_{СК} \geq 30$ эл.град.

Установлено, что в асинхронных машинах со скосом пазов, работающих под нагрузкой, всегда существует вдоль оси машины зона пониженных значений электромагнитных параметров, занимающая примерно половину длины пакета стали машины.

Обоснована возможность создания на базе электромагнитных явлений, имеющих место в асинхронных машинах со скосом пазов, модификации асинхронных электродвигателей с частичным скосом пазов, обладающих улучшенными электромеханическими вращающими характеристиками. Диапазон рациональных значений β и $\beta_{СК}$: $0,5 \leq \beta \leq 0,8$; $11 \leq \beta_{СК} \leq 35$ эл.град.

Разработана методика расчета асинхронных машин с частичным скосом пазов, базирующаяся на основной научной концепции работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование аксиальных усилий в асинхронных электродвигателях со скосом пазов. //Электротехническая промышленность. - 1967. - Вып.277. - С.3-4.
2. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование магнитного поля в асинхронной машине со скосом пазов // Электротехническая промышленность. - 1967. - Вып.292. - С.9-10.
3. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование аксиальных усилий в судовых электродвигателях. //Судовые машины и механизмы. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - 1967. - Вып.І. - С.189-196.
4. Макаренко Д.В. О зубовом рассеянии электрических машин. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1967. - Вып.5. - С.20-29.
5. Макаренко Д.В. Особенности расчета магнитного поля судовых электродвигателей со скосом пазов. //Судовые машины и механизмы. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - 1968. - Вып.2. - С.289-296.
6. Макаренко Д.В. Об аксиальных усилиях в электрических машинах со скосом пазов. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1969. - Вып.7. - С.75-83.
7. Макаренко Д.В. До розрахунку втрат в ід поперечних струмів в асинхронних двигунах. //Енергетика. - Одеса. - 1969. - С.24-29.
8. Макаренко Д.В. К вопросу о добавочных потерях в судовых асинхронных электродвигателях. // Судовые машины и механизмы. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - 1970. - Вып.3. - С.258-267.
9. Захаров М.К., Макаренко Д.В., Сухоцкий А.К. До питання про гармонічний склад е.р.с. обмоток асинхронних машин. //Електромашинобудування і Електрообладнання. - 1971. - Вып.ІЗ. - С.55-58.
10. Макаренко Д.В. К вопросу о магнитомеханических потерях в судовых асинхронных машинах. //Судовые машины и механизмы. /Одесск.

- ия-т инж.мор.флота. - 1971. - Вып.4. - С.265-272.
- II. Макаренко Д.В. К вопросу выбора величины скоса пазов в асинхронных электродвигателях. //Материалы научной конференции молодых ученых /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - 1971. - Вып.2. - С.231-233.
12. Захаров М.К., Макаренко Д.В., Сухоцкий А.К. К расчету моментов высших гармонических в асинхронных машинах. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1972. - Вып.14. - С.79-83.
13. Макаренко Д.В. К расчету коэффициента скоса пазов асинхронных машин. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1972. - Вып.14. - С.83-89.
14. Макаренко Д.В. К расчету величины переходного сопротивления в асинхронных электродвигателях. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1972. - Вып.15. - С.93-97.
15. Макаренко Д.В. Высшие гармонические в асинхронных машинах. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1973. - Вып.17. - С.66-73.
16. Макаренко Д.В., Коченко Б.С., Чек А.Б. Исследование тепловой несимметрии электрических машин со скосом пазов. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1973. - Вып.17. - С.98-104.
17. Макаренко Д.В. К выбору двигателей электроприводов подъемно-транспортного оборудования морских портов. //Морские порты. - 1978. - Вып.11. - С.106-109.
18. Макаренко Д.В. Исследование эффективности взаимодействия проводника с электромагнитным полем интерференции. //Изв.вузов. Электромеханика. - 1985. - № 8. - С.23-30.
19. Макаренко Д.В. К измерению индукции результирующего переменного магнитного поля. // Техническая электродинамика. - 1985. - № 4. - С.96-101.

20. Макаренко Д.В. К вопросу о сплелении обмоток асинхронной машины с результирующим магнитным полем. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1985. - Вып.39. - С.75-82.
21. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование эффективности взаимодействия проводника с результирующим магнитным полем. //Теоретическая электротехника. - 1986. - Вып.40. - С.61-69.
22. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование возможности повышения КПД крановых асинхронных электродвигателей. //Вопросы проектирования и эксплуатации инженерных сооружений и оборудования портов: Сб.науч. трудов Одесск.ин-та инж. мор. флота. - М., 1986. - С.137-140.
23. Макаренко Д.В. Гармонический состав ЭДС проводника в результирующем магнитном поле. //Техническая электродинамика. - 1987. - № 2. - С.21-27.
24. Макаренко Д.В. Об эффективности взаимодействия проводника с результирующим электромагнитным полем. // Изв.вузов. Электромеханика. - 1988. - № 5. - С.21-28.
25. Макаренко Д.В. К исследованию магнитного поля асинхронного электродвигателя со скосом пазов. //Электромашиностроение и электрооборудование. - 1989. - Вып.43. - С.121-128.
26. Макаренко Д.В. Закономерности изменения электромагнитных величин при скосе пазов асинхронных машин. //Техническая электродинамика. - 1989. - № 4. - С.73-80.
27. А.с. 655036 СССР МКИ²Н02 К Г7/02. Асинхронный электродвигатель. /Макаренко Д.В. - № 2405289/24-07; Заявлено 21.09.76; Опубл. 30.03.79, Бюл. № 12//Открытия. Изобретения. - 1979. - № 12. - С.206.
28. А.с. 796998 СССР.МКИ³Н02 К Г7/02. Асинхронный электродвигатель. /Макаренко Д.В. - № 2678127/24-07; Заявлено 25.10.78; Опубл. 15.01.81, Бюл. № 2//Открытия. Изобретения. - 1981. -

№ 2. - С.238.

29. А.с. I7I29I0AI СССР. ОI 33/02. Индукционный преобразователь для магнитных измерений в воздушном зазоре асинхронной машины. /Макаренко Д.В. - № 465282I/2I; Заявлено 20.02.89; Опубл. 15.02.92., Бюл. № 66 //Изобретения. - 1992. № 6.
30. А.с. I8I0850 СССР. ОI 33/00. Индукционный преобразователь для магнитных измерений в воздушном зазоре асинхронной машины. /Макаренко Д.В. - № 4898828/2I; Заявлено 02.01.91. Опубл. 23.04.93., Бюл. № 6 //Изобретения. - 1993. - № 15.
31. Захаров М.К., Макаренко Д.В. Влияние скоса пазов на электромагнитные и электромеханические характеристики асинхронных к.з. электродвигателей. //Юбилейна научна сесия /Высш. машиноэлектр технич. ин-т, Высш. народное военно-морское училище Н.И.Вапшарова. - НРБ, Варна, 1970. - ТЗ. - С.149-162.
32. Макаренко Д.В. К расчету параметров схемы замещения вторичного тока асинхронных машин. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - Одесса, 1984. - 12 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама", № 326 мф-ДВ4.
33. Макаренко Д.В. Экспериментальное исследование распределения результирующего магнитного поля в зазоре асинхронных электродвигателей. /Одесск.ин-т инж.мор. флота. - Одесса, 1984. - 21 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама", № 367 мф-ДВ4.
34. Макаренко Д.В. Коэффициенты скоса пазов судовых асинхронных машин. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - Одесса, 1989. - 17 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама" № 1005-мф.
35. Макаренко Д.В. К расчету параметров вторичной цепи судовых асинхронных машин со скосом пазов. /Одесск.ин-т инж.мор.флота. - Одесса, 1989. - 10 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама" 1004-мф.
36. Захаров М.К., Макаренко Д.В. Потери и моменты от поперечных токов высших гармоник в асинхронных электродвигателях с ко-

роткозамкнутым ротором. //Тезисы докладов 2-й республиканской межвузовской научно-технической конференции по электротехнике. - Днепропетровск, 1969. - С.35-36.

37. Макаренко Д.В. К вопросу о причинах нелинейности электрических цепей. //Тез.докл. III Международн. симпозиума по теор. электротехн. - М., 1985. - С.92-93.
38. Макаренко Д.В. Электрические цепи в пересекающихся неоднородных магнитных полях. //I Всесоюзная конференция по теорет. электротехнике. /Тезисы докладов и сообщений. - Ташкент, 1987. - С.158-161.
39. Захаров М.К., Макаренко Д.В. Закономерности изменения электромагнитных величин асинхронных машин со скосом пазов. //Всесоюзная конференция к 100-летию изобретения трехфазного асинхронного двигателя (современные проблемы электромеханики) /Тезисы докладов. - М., 1989. - С.52.

Личный вклад автора: В работах, написанных в соавторстве, [9, 12, 16, 31, 36, 39] автору диссертации принадлежит ведущая роль, которая заключается в постановке задач и исследования, определении теоретических и экспериментальных положений для решения этих задач, подготовке выводов и редактированию.

Соискатель

Д. Макаренко

Макаренко Д.В. Електромагнітні параметри асинхронних машин со скосом пазів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - електричні машини. Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1994.

Захищається 35 наукових праць і 4 авторських свідоцтва, у яких містяться теоретичні та експериментальні дослідження наукових основ тримірної системної аналізу електромагнітних процесів, що мають місце в асинхронних машинах зі скосом пазів.

Обґрунтовується можливість створення модифікацій асинхронних електродвигунів, які базуються на електромагнітних явленнях, що мають місце в асинхронних машинах зі скосом пазів. Результати роботи застосовані при проектуванні серійних асинхронних електродвигунів різних модифікацій та при магнітних вимірюваннях.

Ключові слова:

тримірний системний аналіз, асинхронна машина, скос пазів.

Makarenko D.V. Electromagnetic parameters of induction machines with skewed slots.

The thesis is submitted for a doctor's degree of technical sciences on the speciality 05.09.01 - electrical machines, the Institute of Electrodynamics of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, 1994.

35 scientific works and 4 author's certificates are defended. They contain theoretical and experimental researches of the scientific principles of three-dimensional system analysis of the electromagnetic processes taking place in the induction machines with skewed slots. The possibility of creation of the induction motors modifications based on the electromagnetic effects that take place in the induction machines with skewed slots is substantiated. The results of the work were employed in projecting of serial induction motors of various modifications and in magnetic measuring.

Подписано к печати 23.09.94г. Формат 60x64/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист, 2,0 Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 449.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.



AB 31.136

AB 31.136