

На правах рукописи

Бурмакин Артем Михайлович

НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДУГОСТАТОРНЫЙ АСИНХРОННЫЙ  
ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ СТАНКОВ-КАЧАЛОК  
МАЛОДЕБИТНЫХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и  
электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Электротехника и Электромеханика», г. Пермь.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Шулаков Николай Васильевич

Научный консультант: кандидат технических наук, профессор  
Огарков Евгений Матвеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Смолин Георгий Константинович  
(г. Екатеринбург)

кандидат технических наук, доцент  
Назаров Сергей Леонардович  
(г. Екатеринбург)

Ведущая организация: «ПермНИПИнефть» (г. Пермь)  
Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

Защита состоится 30 ноября 2011 года в 14 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-406.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФу, (факс (343) 359-16-15, [mob2011@bk.ru](mailto:mob2011@bk.ru)).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан «28» октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.285.03,  
д.т.н.,

Зюзев А.М.  
доцент

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях неблагоприятной геолого-технологической структуры запасов нефти, характерной для нефтяной промышленности Российской Федерации, а также в результате истощения месторождений наблюдается тенденция перехода многих добывающих скважин в разряд малодебитных. Количество малодебитных скважин постоянно возрастает из-за перехода месторождений в завершающую стадию разработки, ввода в эксплуатацию месторождений с низкопродуктивными пластами, расконсервации ранее законсервированных малодебитных скважин, обусловленной ростом мировых цен на нефть.

Для повышения нефтеотдачи малодебитные скважины необходимо переводить в непрерывный режим работы. Эффективность непрерывного режима работы малодебитных скважин подтверждена многочисленными исследованиями на различных скважинах. Для перевода скважины из циклического режима работы в непрерывный необходимо уменьшить число качаний станка. Работы в этом направлении ведутся давно, но результаты пока далеки от требуемых. Предлагаемые варианты приводят к усложнению конструкции и требуют переделок станка-качалки, имеют проблемы с размещением дополнительных звеньев. Кроме того, из-за дополнительных звеньев снижаются надёжность и долговечность привода, возрастают затраты на покупку, ремонт и обслуживание.

В качестве решения проблемы увеличения добычи жидкости из скважин с малым дебитом предлагается разработка низкоскоростных асинхронных электродвигателей малой мощности, которые совместно с клиноременной передачей и редуктором, используемыми в настоящее время на станках-качалках, позволяли бы получить частоту хода плунжера насоса в требуемом диапазоне. Одновременно с этим данные электродвигатели должны обладать эксплуатационными и стоимостными показателями, не уступающими аналогичным показателям штатных асинхронных электродвигателей.

В результате исследований выявлено, что поставленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют низкоскоростные дугостаторные асинхронные двигатели (ДАД). Однако проектирование таких двигателей осложняется отсутствием надёжных практических рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок и определению основных размеров машины. Также известно, что в ДАД кроме основного бегущего поля возникают дополнительные поля, обусловленные разомкнутостью магнитопровода статора. Дополнительные поля индуктируют дополнительные токи, создают дополнительные мощности и усилия. Эти явления оказывают существенное влияние на рабочие свойства ДАД и поэтому должны быть учтены при проектировании и расчете характеристик ДАД.

Таким образом, актуальной задачей является разработка рекомендаций по подбору и проектированию дугостаторного электродвигателя при

переводе скважины из циклического режима работы в непрерывный, а также разработка инженерных методик расчета электромагнитных и тепловых процессов ДАД. Данная работа основывается на разработках сотрудников кафедры электротехники и электромеханики Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета (ПНИПУ) в области линейных асинхронных машин и дополняет их.

**Объектом исследования** являются дугостаторные асинхронные двигатели.

**Предмет исследования** – электрическая и тепловая схемы замещения ДАД.

**Цели работы:**

1. Разработка рекомендаций по определению геометрических размеров и выбору электромагнитных нагрузок низкоскоростного ДАД для станка-качалки малодебитных нефтяных скважин;

2. Разработка инженерной методики расчета рабочих и пусковых характеристик низкоскоростных ДАД;

3. Разработка методики для оценки теплового состояния ДАД в продолжительном режиме работы.

Для выполнения поставленных целей решаются **следующие задачи:**

1. Анализ условий работы электропривода станка-качалки малодебитных нефтяных скважин и формулировка требований к электродвигателю при переводе малодебитных скважин в непрерывный режим работы;

2. Разработка методики проектирования низкоскоростного ДАД с учетом требований, обеспечивающих согласование его параметров с параметрами малодебитных скважин;

3. Решение квазитрехмерной полевой задачи применительно к рассматриваемому типу ДАД;

4. Расчет сопротивления продольного краевого эффекта низкоскоростных ДАД с учетом числа полюсов, электромагнитной добротности, скольжения и ряда других факторов;

5. Составление электрической схемы замещения низкоскоростного ДАД и разработка на ее основе инженерного метода электромагнитного расчета;

6. Построение тепловой схемы замещения для расчета стационарного теплового процесса в ДАД.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории электрических цепей, квазитрехмерный метод расчета электромагнитного поля, метод эквивалентных тепловых схем замещения, методы компьютерного моделирования с помощью математических пакетов *MATHCAD* и *MATLAB*.

**На защиту выносятся** следующие положения, представляющие **научную новизну:**

1. Обоснование применения низкоскоростного дугостаторного асинхронного двигателя в качестве привода станка-качалки для перевода малодебитных нефтяных скважин из циклического режима работы в непрерывный;

2. Методика проектирования низкоскоростного ДАД для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин, с учетом рекомендаций по согласованию производительности скважины и насоса при переводе малодебитных скважин в непрерывный режим работы;

3. Электрическая схема замещения и методика инженерного расчета рабочих и пусковых характеристик низкоскоростных ДАД;

4. Способ определения параметров предлагаемой электрической схемы замещения и выявление зависимостей этих параметров от основных влияющих факторов;

5. Тепловая схема замещения для расчета стационарных тепловых процессов в ДАД, с учетом присущих им конструктивных особенностей.

**Практическая ценность.** Созданный на базе низкоскоростного ДАД электропривод станка-качалки, обладая приемлемыми энергетическими показателями, позволяет наиболее простым и дешевым способом переводить малодебитные нефтяные скважины в непрерывный режим работы. Таким образом можно добиться увеличения добычи нефти в несколько раз. Предложенные методики позволяют многократно упростить выполнение электромагнитных и тепловых расчетов при проектировании низкоскоростных ДАД. Используемый в данных методиках математический аппарат не требует специальной подготовки и доступен инженеру-электромеханику.

**Внедрение.** Результаты работы используются:

1. При проектировании и расчетах низкоскоростных ДАД для установки на малодебитных скважинах ООО «Лукойл-Пермь»;

2. На кафедре электротехники и электромеханики ПНИПУ при дипломном проектировании.

**Апробация.** Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных мероприятиях:

– IV международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляющие электромеханические системы». Екатеринбург, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, март 2011 г.

– Международная научно-техническая конференция «Нефтегазовое и горное дело». Пермь, ноябрь 2009 г.

– II всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика. Инновационные направления в энергетике». Пермь, ноябрь 2008 г.

– Краевая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы комплексного освоения месторождений природных ископаемых в Пермском крае». Пермь, ПГТУ, ноябрь 2007 г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка используемых источников и 3 приложений общим объемом 166 страниц. Основная часть изложена на 133

страницах машинописного текста, иллюстрирована 43 рисунками, 13 таблицами. Библиографический список содержит 95 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена актуальность работы, сформулированы цели и задачи, изложены основные положения выносимые на защиту и их научная новизна, приведена апробация работы и структура диссертации.

**В первой главе** рассматриваются режимы работы скважин. Дается сравнение циклического и непрерывного режимов работы скважин, и показываются преимущества непрерывного режима работы, позволяющие увеличить добычу нефти из малодебитных скважин.

Выполнен анализ электроприводов станков-качалок, с помощью которых в настоящее время производится добыча нефти из малодебитных скважин. Выяснено, что существующая система электропривода с серийными асинхронными двигателями позволяет создавать от 8,4 до 4 качаний балансира в минуту. В то же время для эксплуатации малодебитной скважины в непрерывном режиме требуется частота от 1 до 3 качаний балансира в минуту. Показано, что в настоящее время малодебитные скважины вынуждены работать в циклическом режиме, при этом происходит уменьшение количества добываемой жидкости, завышается мощность приводного электродвигателя, растут динамические нагрузки на элементы кинематической цепи станка-качалки, возникают дополнительные технические и организационные проблемы, обусловленные необходимостью выполнения установленного регламента работы.

В качестве решения проблемы увеличения добычи жидкости из скважин с малым дебитом предлагается разработка низкоскоростных дугостаторных асинхронных электродвигателей малой мощности, которые совместно с клиноременной передачей и редуктором, используемыми в настоящее время на станках-качалках, позволяли бы получить частоту хода плунжера насоса в требуемом диапазоне. Сравнение дугостаторного варианта низкоскоростного двигателя с “классическим” круговым показало, что первый вариант имеет меньший ток холостого хода и более высокие энергетические показатели. Выполненные исследования показали, что дугостаторные асинхронные двигатели (ДАД) должны иметь скорость вращения вала 100 – 300 об /мин при мощности 1,5 – 4,5 кВт.

**Во второй главе** рассматривается общая конструкция низкоскоростного ДАД, варианты конструкций статора и ротора, а также существующие методы электромагнитного расчета таких машин. На основании сравнения вариантов было предложено использовать однодуговой статор, а ротор выполнить шихтованным с короткозамкнутой обмоткой в пазах для получения приемлемых энергетических показателей в продолжительном режиме работы. Основные конструктивные элементы ДАД схематично показаны на рис.1.

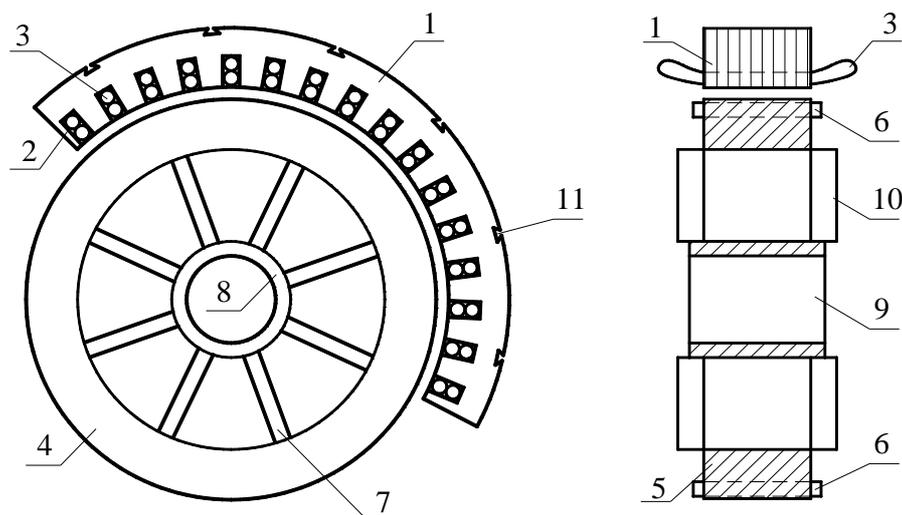


Рис. 1. Схематичный вид дугогостаторного двигателя

Дуговой статор состоит из шихтованного ферромагнитного сердечника 1 с пазами 2, в которых размещены катушки, образующие в совокупности трехфазную обмотку 3. Обмотка дугового статора двухслойная, петлевая, выпянная и выполнена из круглого провода. Ротор 4 отделён от статора воздушным зазором. Магнитопровод ротора 5 набран из кольцеобразных пластин электротехнической стали и представляет из себя полый цилиндр. При пустотелой конструкции снижается расход электротехнической стали и увеличивается поверхность охлаждения, что повышает теплорассеяние ротора ДАД. Ступица ротора 8 соединена с магнитопроводом стальными спицами 7, которые придают конструкции ротора жесткость в осевом направлении, т.е. снижают величину упругих деформаций ротора. Это позволяет минимизировать воздушный зазор на уровне 0,4–0,5 мм. К торцам спиц крепятся лопасти 10, которые улучшают циркуляцию воздуха внутри двигателя.

Дуговой статор создает силы магнитного тяжения. Эти силы направлены по радиусу и стремятся притянуть ротор к дуге статора. Предлагается расположить дугу статора, как показано на рис.1. В этом случае сила тяжения компенсируется силой натяжения ремней клиноременной передачи и весом ротора.

В главе также представлена методика проектирования низкоскоростного ДАД для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин. Изложены рекомендации по определению геометрических размеров и выбору электромагнитных нагрузок, которые должны обеспечить возможность создания необходимого вращающего момента и скорости вращения при приемлемых энергетических показателях. Проектирование ДАД начинается с определения основных размеров: длины полюсного деления  $\tau$ , внутреннего диаметра статора  $d_1$ , длины дуги статора  $l_c$ , ширины магнитопровода в осевом направлении  $l_s$ .

Для получения низкой скорости и приемлемых энергетических показателей полюсное деление принимается равным  $\tau=45\div 50$  мм. При

известной скорости вращения ротора выбор остальных основных размеров ДАД предлагается выполнять в следующей последовательности.

Внутренний диаметр статора

$$d_1 = \frac{120\tau f_1}{\pi n_0} \quad (1)$$

где  $f_1$  – частота сети (50 Гц);

$n_0$  – синхронная скорость вращения ротора.

Угловой размер полюсного деления

$$\tau^\circ = \tau \frac{360^\circ}{\pi d_1} \quad (2)$$

Число пар полюсов дугового статора

$$p = \frac{\alpha_c}{2\tau^\circ} \quad (3)$$

где  $\alpha_c$  – угол охвата дуги статора берется в пределах  $\alpha_c=150 - 170^\circ$ .

Длина дуги статора по внутреннему диаметру

$$l_c = \alpha_c \frac{\pi d_1}{360^\circ} \quad (4)$$

Сила тяги дугового статора

$$F = \frac{P_n}{v_0(1-s_n)}, \quad (5)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение.

Ширина магнитопровода дугового статора

$$l_d = \frac{F}{F_{уд} \cdot l_c} \quad (6)$$

где  $F_{уд}$  – удельное тяговое усилие на активной поверхности магнитопровода. Для рассматриваемых нами низкоскоростных ДАД принимается  $F_{уд}=0,3 \div 0,4$  Н/см<sup>2</sup>.

**В третьей главе** для определения основных характеристик низкоскоростного ДАД используется квазитрехмерный метод электромагнитного расчета. Суть квазитрехмерного метода состоит в последовательном расчете распределения электромагнитного поля по толщине, ширине и длине машины.

Наиболее сильное влияние на свойства и характеристики ДАД оказывает неравномерность распределения поля по высоте зазора, зубцовой зоны и ярма ротора. Поэтому толщинная задача решается первой. Для ее решения используется метод разбиения ротора на большое число тонких слоев, параллельных рабочей поверхности статора с использованием многослойной расчетной модели, показанной на рис.2. Сопротивления обмотки статора  $r_1$  и  $x_1$  рассчитываются известными методами и учитываются отдельно.

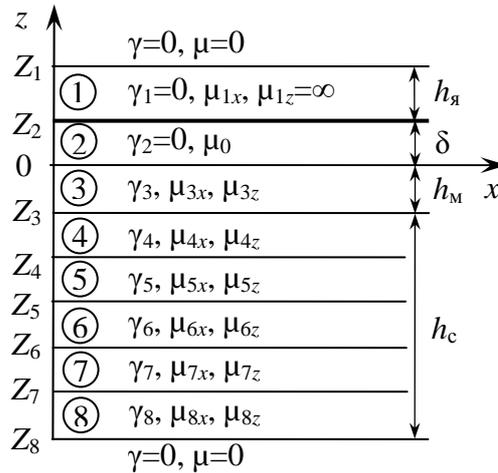


Рис. 2. Многослойная модель для расчета распределения электромагнитного поля по толщине воздушного зазора и ротора ДАД

Расчетная модель ДАД, показанная на рис.2 состоит из восьми зон. Свойства среды в пределах каждой зоны считаются постоянными. Зона 1 соответствует магнитопроводу статора, имеет электропроводность  $\gamma_1=0$ . Магнитная проницаемость по оси  $z$  принимается равной бесконечности, а по оси  $x$  имеет конечное значение  $\mu_{1x}$ , что позволяет учесть магнитное сопротивление ярма и зубцов статора. На нижней границе этой зоны имеется бегущая волна линейной токовой нагрузки

$$J_{л} = J_{лm} e^{i(\omega t - \alpha x)}, \quad (7)$$

где  $J_{лm} = \frac{3\sqrt{2} W_1 I_1 k_{об1}}{p\phi}$ .

Здесь  $W_1$  – число витков фазы обмотки статора;  $I_1$  – действующее значение тока статора;  $k_{об1}$  – обмоточный коэффициент статора;  $p$  и  $\tau$  – число пар полюсов и длина полюсного деления ДАД.

Зона 2 учитывает воздушный зазор между статором и ротором. Величина зазора рассчитывается с учетом зубчатости статора и ротора. Электропроводность  $\gamma_2=0$ , магнитная проницаемость зоны равна  $\mu_0$ .

Зоны 3–8 соответствуют пазу и ярму ротора. Электропроводности и магнитные проницаемости этих зон находятся путем усреднения свойств зубца и паза. Значения магнитных проницаемостей уточняются в процессе расчета итерационным путем.

При создании модели приняты следующие допущения: существует только волна поля, бегущая вдоль координаты  $x$ ; поле считается плоскопараллельным и не зависит от координаты  $y$ ; сопротивления обмотки статора учитываются отдельно, а статор заменяется гладким магнитопроводом; влияние зубчатости статора учитывается соответствующим увеличением зазора; ток из пазов выносится на гладкую поверхность статора; токи смещения не учитываются.

При принятых допущениях дифференциальное уравнение векторного потенциала для всех слоев расчетной модели записано следующим образом:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \frac{M_x}{M_z} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - M_x \Gamma \frac{\partial A}{\partial t} - M_x \Gamma x \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

где  $v$  – линейная скорость ротора.

Решение уравнения (8):

$$\dot{A}_k = (\dot{C}_{k1} e^{p_k z} + \dot{C}_{k2} e^{-p_k z}) e^{-i b x} \quad (9)$$

где  $k$  – номер слоя.

$$p_k = \sqrt{6^2 \frac{M_{kx}}{M_{kz}} + i M_{kx} \Gamma_k \text{шф}} \quad (10)$$

Для нахождения постоянных интегрирования  $\dot{C}_{k1}$  и  $\dot{C}_{k2}$  решается система из 16 уравнений, составленная с использованием записанных граничных условий. Таким образом, для всех зон расчетной модели определяется векторный потенциал и электромагнитная мощность ДАД.

Влияние поперечного эффекта ДАД с короткозамкнутой обмоткой и шихтованным магнитопроводом ротора учитывается введением в расчет сопротивления короткозамыкающих колец. Для этого электропроводность стержней, расположенных в пазу ротора корректировалась путем умножения на коэффициент  $k_\gamma$

$$k_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{r_k}{2r_c \sin^2(0,5 \alpha t_{z2})}}, \quad (11)$$

где  $r_c$  и  $r_k$  – сопротивления стержня и короткозамыкающего кольца ротора;  $\alpha = \pi/\tau$ , а  $t_{z2}$  – зубцовый шаг ротора.

Откорректированное значение электропроводности стержней ротора используется в расчетных формулах многослойной модели, показанной на рис.2. В этом случае рассчитанная электромагнитная мощность учитывает влияние не только толщинного, но и поперечного эффектов ДАД.

На рис.3 показана расчетная модель, по которой рассчитываются характеристики ДАД с учетом продольного краевого эффекта.

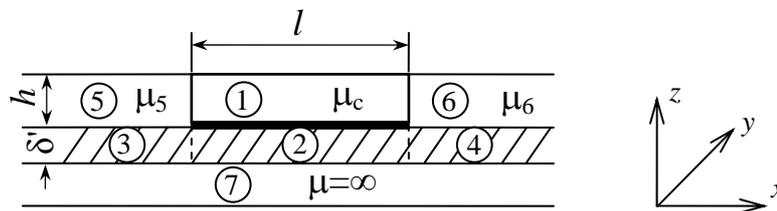


Рис. 3. Расчетная модель для определения распределения электромагнитного поля по длине ДАД

На рис.3 показаны: 1 – неподвижный статор; 2, 3 и 4 – активная и концевые зоны движущегося ротора; 5, 6 – концевые зоны за пределами статора; 7 – магнитопровод ротора. При создании модели приняты допущения: магнитопровод статора ДАД лишен пазов, а их влияние учитывается соответствующим увеличением немагнитного зазора; высота

магнитопровода  $h$  равна высоте ярма статора ДАД; магнитная проницаемость зоны 1 по оси  $z$  равна бесконечности, а по направлению оси  $x$  имеет значение  $\mu_c$ , электропроводность зоны 1 принимается равной нулю; в концевых зонах 5 и 6 магнитная проницаемость по оси  $z$  равна бесконечности, а по оси  $x$  равна проницаемости вакуума  $\mu_0$ , электропроводность этих зон равна нулю; магнитопровод ротора (зона 7) имеет бесконечно большую магнитную проницаемость, а электропроводность его равна нулю; эквивалентный немагнитный зазор  $\delta'$  учитывает влияние зубчатости магнитопровода статора и ротора; материал электропроводящего слоя вторичного элемента равномерно распределен по толщине эквивалентного зазора  $\delta'$ , среда зон 2, 3, 4 имеет эквивалентную электропроводность  $\gamma$  и движется со скоростью  $v$  в направлении оси  $x$ , в зонах 2, 3, 4 магнитная проницаемость по оси  $z$  равна  $\mu_0$ , а по оси  $x$  считается равной нулю; поле по ширине ДАД не изменяется; поле в зазоре по оси  $z$  не изменяется, при этом линейная токовая нагрузка обмотки статора равномерно распределяется в воздушном зазоре  $\delta'$  с плотностью

$$\dot{J}_1 = J_{1m} e^{-i\alpha x}, \quad (12)$$

где  $J_{1m} = \frac{J_{lm}}{\delta'}$  (13)

При принятых допущениях изменение векторного потенциала по оси  $x$  описывается дифференциальными уравнениями второго порядка. В зонах 2, 3, 4 расчетной модели рис.3 эти уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial x} - (\alpha^2 \beta_2 + i \mu_0 \gamma \omega) \dot{A}_2 = -\mu_0 J_{1m} e^{-i\alpha x};$$

$$(14) \frac{\partial^2 \dot{A}_3}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial \dot{A}_3}{\partial x} - (\alpha^2 \beta_3 + i \mu_0 \gamma \omega) \dot{A}_3 = 0;$$

$$(15) \frac{\partial^2 \dot{A}_4}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial \dot{A}_4}{\partial x} - (\alpha^2 \beta_4 + i \mu_0 \gamma \omega) \dot{A}_4 = 0. \quad (16)$$

Здесь  $\dot{A}_2, \dot{A}_3, \dot{A}_4$  – комплексные амплитуды векторного потенциала зон 2, 3 и 4. Безразмерный коэффициент  $\beta_2$  учитывает влияние магнитного сопротивления ярма индуктора на векторный потенциал зоны 2. Безразмерный коэффициент  $\beta_3$  учитывает влияние магнитного сопротивления зоны 5 на векторный потенциал зоны 3. Коэффициент  $\beta_4$  учитывает влияние магнитного сопротивления зоны 6 на векторный потенциал зоны 4.

Решения дифференциальных уравнений (14), (15), (16) имеют вид:

$$\dot{A}_2 = A_m e^{-i\delta x} + \dot{C}_{21} e^{p_{21} x} + \dot{C}_{22} e^{p_{22} x} \quad (17)$$

$$\dot{A}_3 = \dot{C}_3 e^{p_{31} x} \quad (18)$$

$$\dot{A}_4 = \dot{C}_4 e^{p_{42} x} \quad (19)$$

Здесь  $p_{21}, p_{22}, p_{31}, p_{42}$  – корни соответствующих характеристических уравнений. Постоянные интегрирования находятся из граничных условий между зонами 2, 3 и 2, 4.

Через векторные потенциалы  $\dot{A}_2, \dot{A}_3, \dot{A}_4$  находятся магнитная индукция  $B$  и плотность тока  $J$  в зонах 2, 3 и 4 расчетной модели ДАД, а также напряженность электрического поля в зоне 2. После этого вычисляются тяговое усилие и мощность ДАД

$$F_x = -\frac{l_\delta}{2} \delta' \sum_{k=2}^{k=4} \operatorname{Re} \int_{x_l}^{x_p} \dot{B}_k J_k^* dx \quad (20)$$

где  $k$  – номер зоны по рис.3;

$x_l, x_p$  – координаты левых и правых границ соответствующих зон;

$\dot{B}_k$  – комплексная амплитуда индукции;

$J_k^*$  – сопряженное значение комплексной амплитуды поперечной составляющей плотности вторичного тока.

$$\underline{S}_2 = -\frac{\delta' l_\delta}{2} \int_0^l \dot{E}_2 \cdot J_1^* dx \quad (21)$$

При расчете продольного краевого эффекта эквивалентная электропроводность  $\gamma$ , входящая в уравнения (14) – (16) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\varepsilon_0 \alpha^2}{\mu_0 \omega} \quad (22)$$

Здесь электромагнитная добротность  $\varepsilon_0$  берется из расчетной модели рис.2, т.е. с учетом толщинного и поперечного эффектов. Таким образом обеспечивается взаимосвязь двух расчетных моделей, а усилие и мощность определяемые по (20) и (21) учитывают неравномерность распределения электромагнитного поля по толщине, ширине и длине машины.

**В четвертой главе** излагается разработанная инженерная методика электромагнитного расчета низкоскоростного ДАД. Приведена математическая модель определения рабочих характеристик ДАД, основанная на параллельной электрической схеме замещения. Предлагаемая схема замещения показана на рис.4.

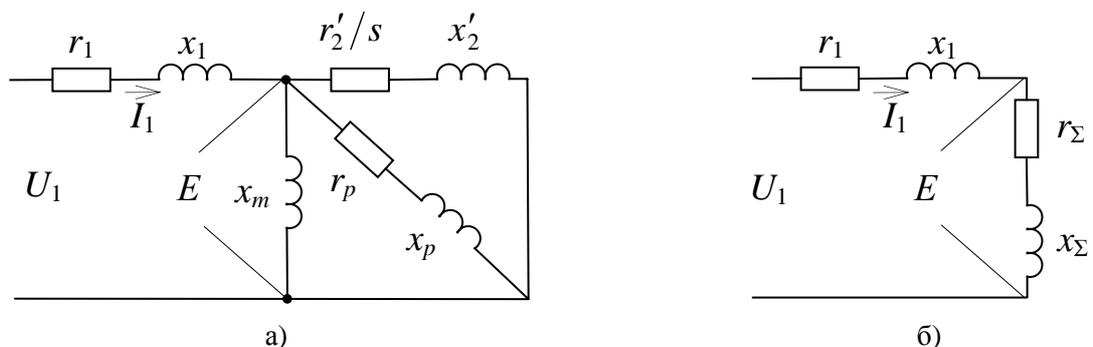


Рис. 4. Схема замещения низкоскоростного ДАД: а – параллельная схема замещения; б – последовательная схема замещения

На этой схеме сопротивления  $r_1$  и  $x_1$  учитывают сопротивления обмотки статора, а сопротивления  $x_m$ ,  $r_2'/s$  и  $x_2'$  учитывают процессы в воздушном зазоре и роторе, обусловленные только бегущим магнитным полем. Сопротивления  $r_p$  и  $x_p$  учитывают влияние полей продольного краевого эффекта (ПКЭ). При известных параметрах (сопротивлениях) схемы замещения расчет рабочих и пусковых характеристик низкоскоростного ДАД сводится к расчету электрической цепи, а необходимые для этого формулы получены непосредственно из схемы замещения.

Одним из основных вопросов, рассматриваемых в этой главе, является способ определения сопротивлений ПКЭ. Предложенный способ основан на использовании расчетной модели, показанной на рис.3. Эта расчетная модель позволяет рассчитать характеристики ДАД, обусловленные суммарным полем, включающим в себя основное бегущее поле и дополнительные поля ПКЭ. В данной модели сопротивления  $x_m$  и  $r_2'$  рассчитываются по известным формулам

$$x_m = \frac{4\mu_0 f_1 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta (1 + \beta_2)} \cdot \frac{3W_1^2 k_{об1}^2}{p} \quad (23)$$

$$r_2' = x_m (1 + \beta_2) / \varepsilon_0 \quad (24)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;

$W_1$  – число витков фазы статора;

$k_{об1}$  – обмоточный коэффициент;

$k_\delta$  – коэффициент воздушного зазора.

Сопротивление  $z_\Sigma$  для схемы рис.4б рассчитывается через мощность  $S_\Sigma$  и ток  $I_1$

$$z_\Sigma = S_\Sigma / 3I_1^2 \quad (25)$$

Мощность  $S_\Sigma$  находится по (21), а  $I_1 = \frac{p \tau J_{лm}}{3\sqrt{2} W_1 k_{об1}}$ .

Сопротивление  $z_p$  на рис.4а учитывает влияние продольного краевого эффекта. Оно определяется исходя из равенства проводимостей на эквивалентных участках последовательной и параллельной схемы замещения рис.4.

$$z_p = 1 / \left( \frac{1}{z_\Sigma} - \frac{1}{ix_m} - \frac{1}{z_2'} \right) \quad (26)$$

Используя расчетную модель рис.3 были выполнены многовариантные расчеты ДАД и определены значения сопротивления  $z_p$ . Анализ этих расчетов показал, что влияние продольного краевого эффекта зависит главным образом от четырех параметров:  $p$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $x_m$  и  $s$ . Сопротивление  $x_m$  и добротность  $\varepsilon_0$  обобщено учитывают влияние целого ряда параметров ДАД:  $\tau$ ,  $p_w$ ,  $l_\delta$ ,  $\delta$ ,  $W_1$ ,  $\gamma$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$ . По результатам расчетов были получены графические зависимости сопротивления ПКЭ  $z_p$  от параметров ДАД. На рис.5–8 представлены

зависимости действительной и мнимой частей  $z_p$  от скольжения  $s$  при конкретном числе пар полюсов  $p$  и различных значениях добротности  $\epsilon_0$ . Для удобства анализа и практического применения зависимостей используются относительные единицы. Действительная и мнимая части  $z_p$  выражены в долях от сопротивления  $x_m$  и обозначены  $r_{p*}$  и  $x_{p*}$  соответственно.

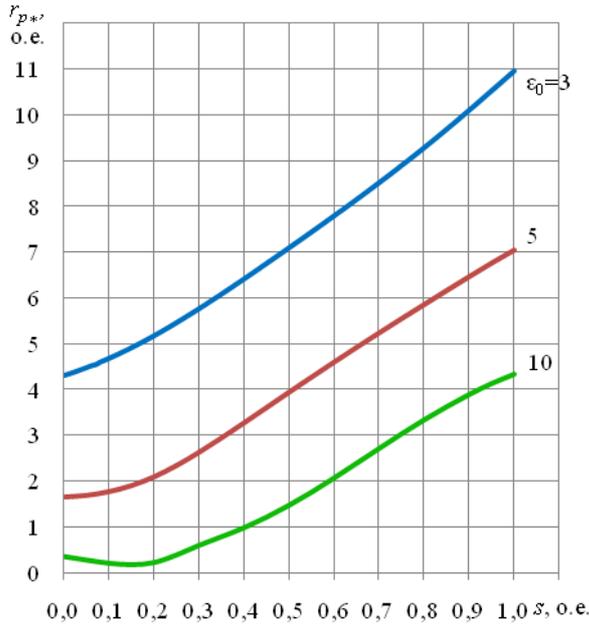


Рис. 5. Зависимость  $r_{p*}$  от скольжения при  $p=3$  и различных значениях  $\epsilon_0$

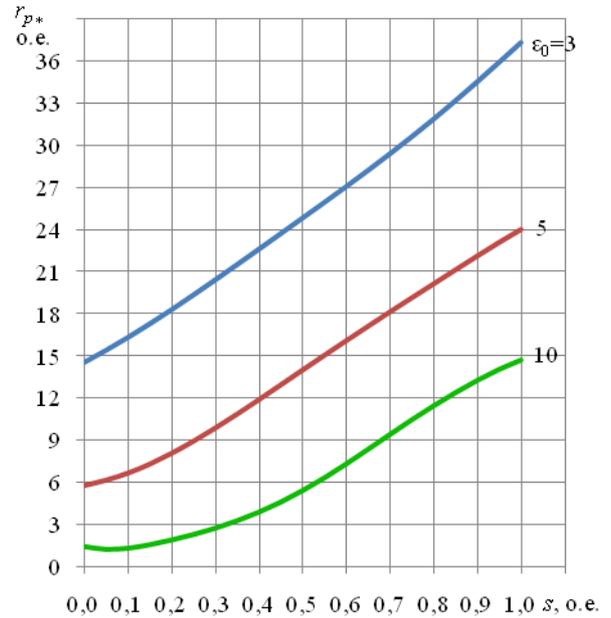


Рис. 6. Зависимость  $r_{p*}$  от скольжения при  $p=10$  и различных значениях  $\epsilon_0$

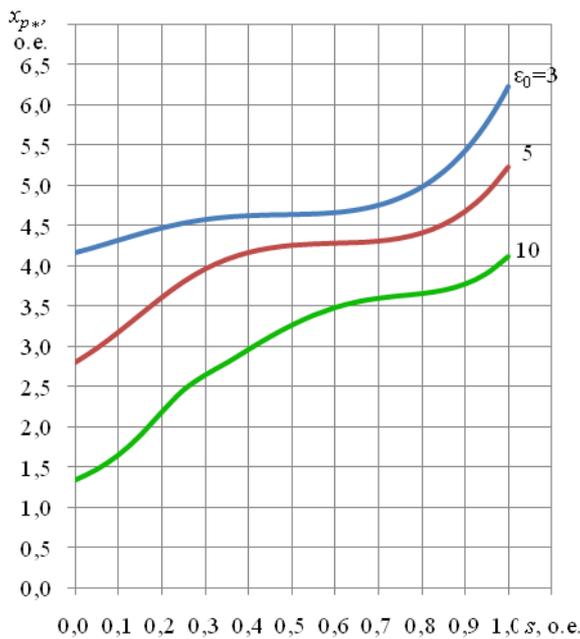


Рис. 7. Зависимость  $x_{p*}$  от скольжения при  $p=3$  и различных значениях  $\epsilon_0$

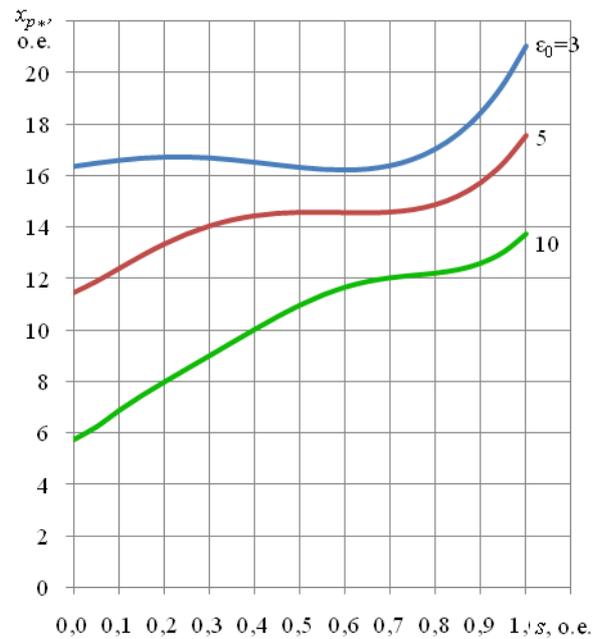


Рис. 8. Зависимость  $x_{p*}$  от скольжения при  $p=10$  и различных значениях  $\epsilon_0$

Отдельно представлены величины сопротивления ПКЭ при скольжении  $s=0$ . Эти сопротивления обозначены как  $r_{p0}$ ,  $x_{p0}$  и  $z_{p0}$ . На рис.9–10 представлены зависимости действительной и мнимой частей  $z_{p0}$  от электромагнитной добротности  $\varepsilon_0$  при различном числе пар полюсов  $p$ . Действительная и мнимая части  $z_{p0}$  выражены в долях от сопротивления  $x_m$  и обозначены  $r_{p0*}$  и  $x_{p0*}$  соответственно.

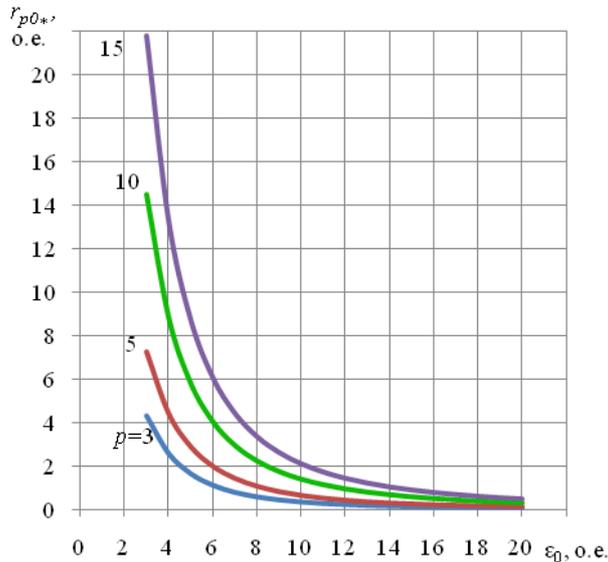


Рис. 9. Зависимость  $r_{p0*}$  от  $\varepsilon_0$  при различных значениях  $p$

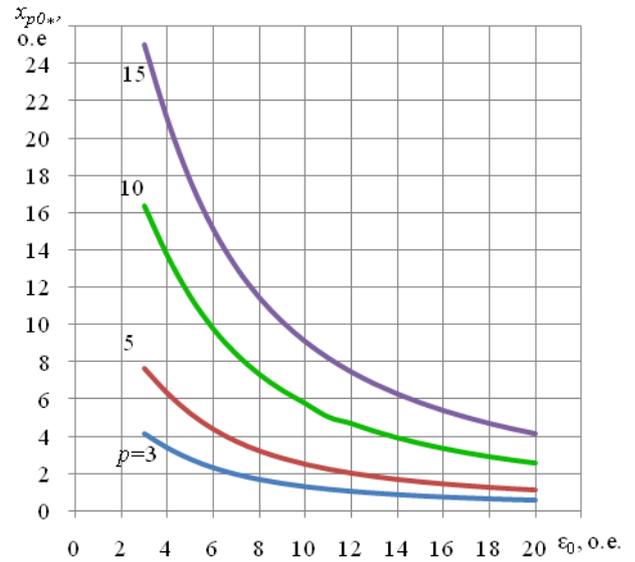


Рис. 10. Зависимость  $x_{p0*}$  от  $\varepsilon_0$  при различных значениях  $p$

По представленным на рис. 5–10 зависимостям можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении скольжения в пределах  $s=0 \div 1$  действительная и мнимая часть сопротивления  $z_p$  увеличиваются, что означает снижение влияния продольного краевого эффекта при уменьшении скорости вращения ротора.
2. Чем выше электромагнитная добротность  $\varepsilon_0$ , тем в большей степени  $z_p$  зависит от скорости входа стержней ротора в магнитное поле статора.
3. С ростом электромагнитной добротности сопротивления ПКЭ резко уменьшаются, т.е. увеличивается влияние продольного эффекта.
4. Увеличение числа полюсов ведет к практически пропорциональному увеличению сопротивлений ПКЭ, а, следовательно, и к ослаблению продольного краевого эффекта.

**В пятой главе** приведены результаты проверки достоверности предлагаемой инженерной методики расчета низкоскоростного ДАД. Для этого были выполнены расчеты одного и того же двигателя двумя способами: по квазитрехмерному методу (расчетная модель рис.3) и по схеме замещения рис.4а. Сопоставление результатов расчета показало хорошую сходимость. Для дальнейшей оценки возможности использования предлагаемой схемы

замещения для определения характеристик ДАД было проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в ходе приемочных испытаний опытно-промышленных образцов низкоскоростных ДАД. Экспериментальные и расчетные характеристики ДАД представлены на рис.11 – 16.

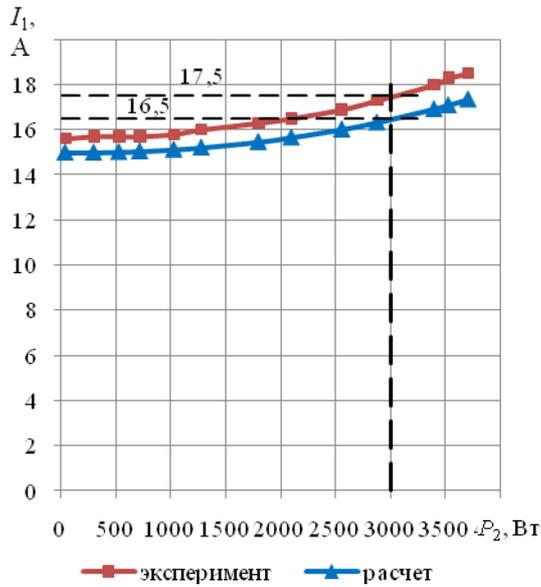


Рис. 11. Зависимость потребляемого тока от полезной мощности

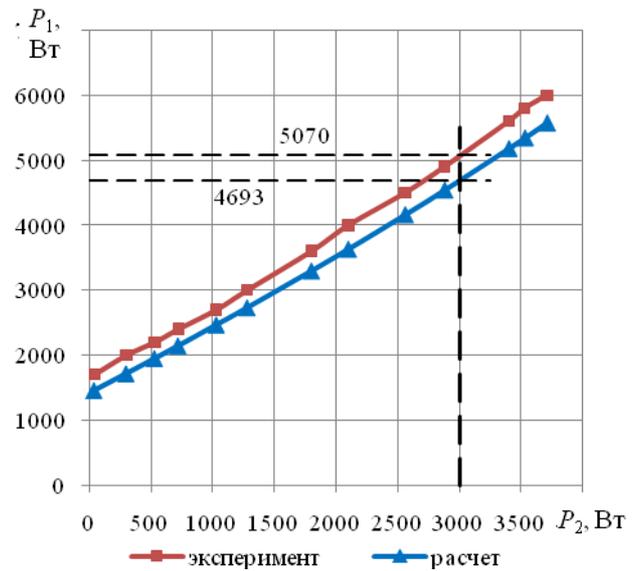


Рис. 12. Зависимость потребляемой мощности от полезной мощности

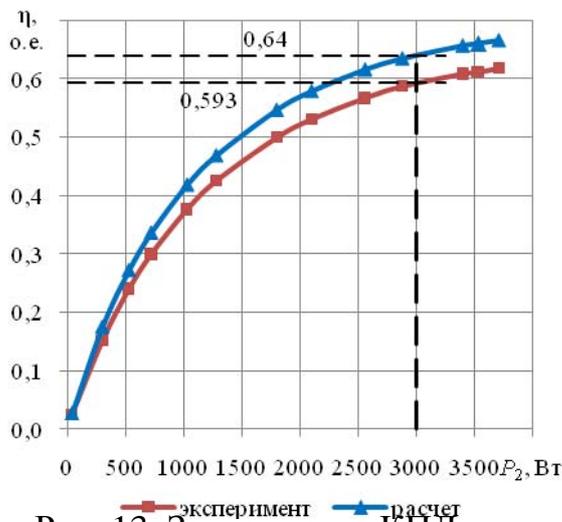


Рис. 13. Зависимость КПД от полезной мощности

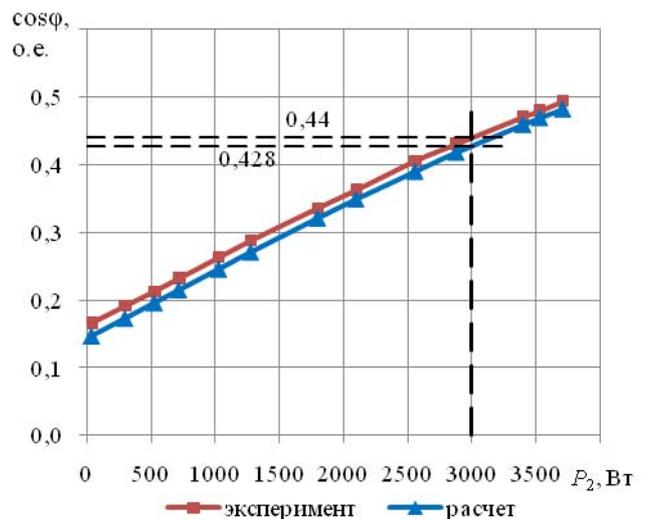


Рис. 14. Зависимость  $\cos\phi$  от полезной мощности

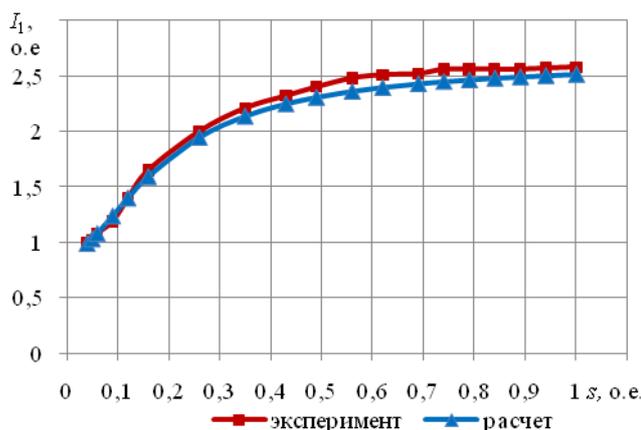


Рис. 15. Зависимость тока статора от скольжения

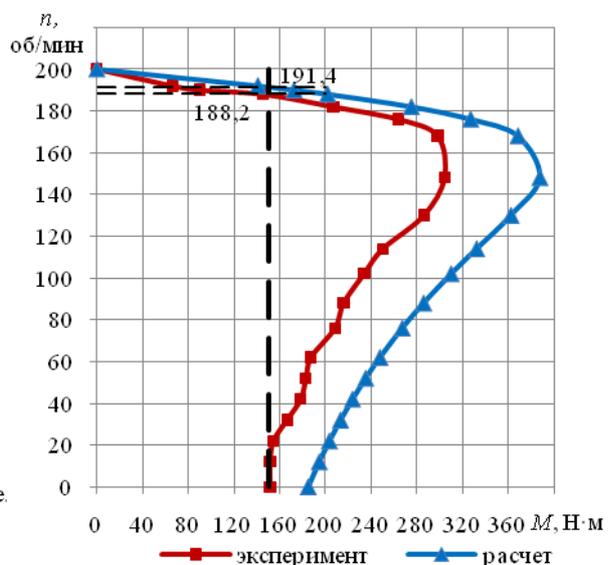


Рис. 16. Механическая характеристика ДАД

Как видно из графиков, погрешность по основным параметрам не превышает 10% (по пусковому моменту 18%), что позволяет нам считать разработанную схему замещения достоверной.

Опытные образцы низкоскоростных дугостаторных асинхронных электродвигателей для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин (рис.17,18) были разработаны по заданию ООО “Лукойл-Пермь”. Двигателям впоследствии было дано наименование ДАД 750-150 УХЛ1. Разработкой технической документации рабочего проекта и изготовлением опытно-промышленных образцов ДАД занимались специалисты предприятия ХК ОАО “Привод” и ООО «Уралэлектромаш».



Рис. 17. Магнитопровод дугового статора с обмоткой



Рис. 18 Ротор ДАД

**В шестой главе** описаны задачи и известные методы теплового расчета электрических машин. Дается обоснование выбора метода эквивалентных тепловых схем (ЭТС) для расчета тепловых процессов низкоскоростного дугостаторного асинхронного двигателя. Описываются особенности теплопередачи в ДАД и его тепловая схема. Специфика конструкции ДАД учитывается наличием дополнительных путей теплопередачи, которые на тепловой схеме учтены соответствующими тепловыми проводимостями: со свободной наружной поверхности ротора, с внутренней поверхности ротора, с концевых поверхностей магнитопровода статора. Полная эквивалентная тепловая схема ДАД показана на рис.19.

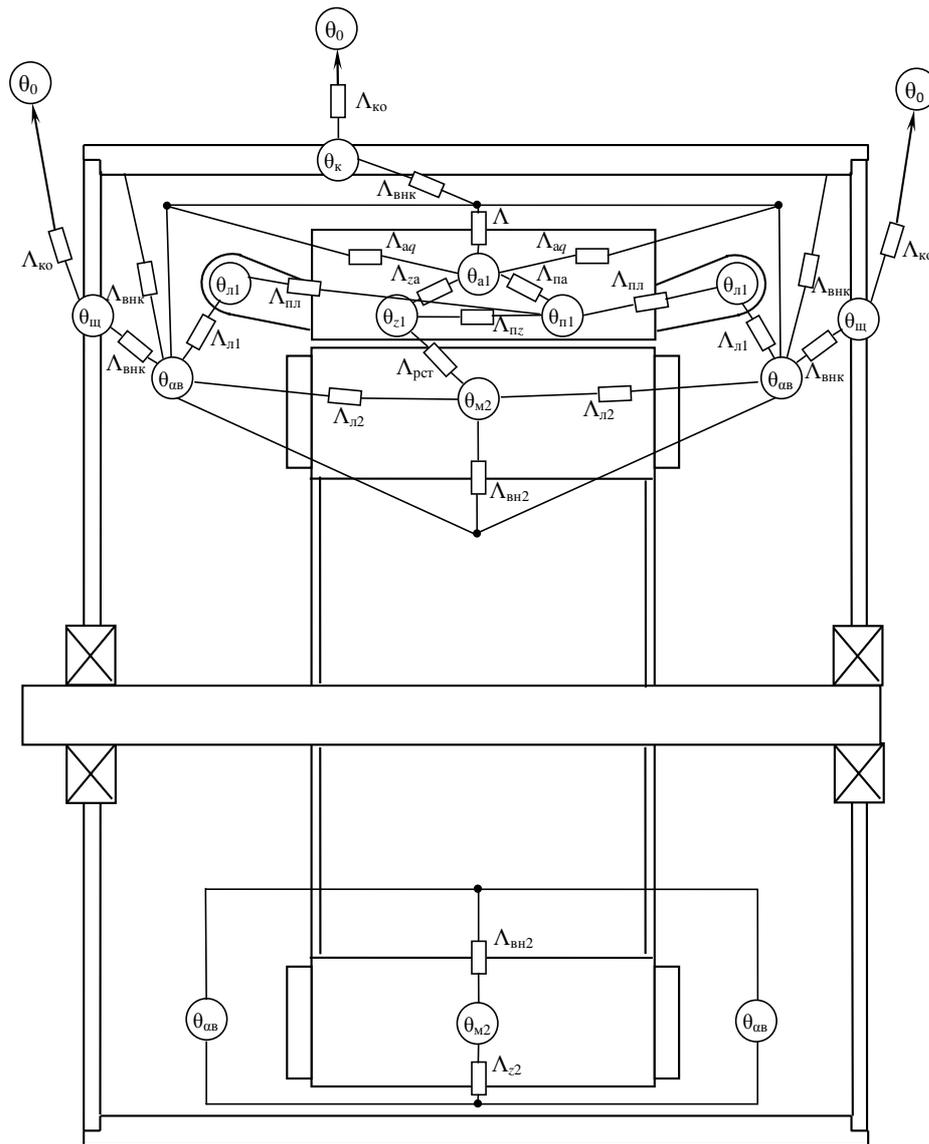


Рис. 19. Эквивалентная тепловая схема замещения ДАД

Схема состоит из 8 элементов: спинки статора со средней температурой  $\theta_{a1}$ ; зубцов статора со средней температурой  $\theta_{z1}$ ; пазовой части обмотки статора со средней температурой  $\theta_{n1}$ ; лобовой части обмотки статора со средней температурой  $\theta_{l1}$ ; ротора со средней температурой  $\theta_{m2}$ ; внутреннего воздуха со средней температурой  $\theta_{ov}$ ; оболочки, состоящей из щитов и

станины со средними температурами  $\theta_{ш}$  и  $\theta_{к}$  соответственно. Температура окружающей среды обозначена через  $\theta_0$ . Тела связаны между собой соответствующими тепловыми проводимостями. Источниками теплоты в двигателе являются: потери в пазовой части  $P_{п1}$ ; потери в лобовых частях  $P_{л1}$ ; потери в ярме статора  $P_{а1}$ ; потери в зубцах статора  $P_{z1}$ ; потери в обмотке ротора  $P_{м2}$ ; внутренние механические потери  $P_{мех}$ .

Для проверки адекватности предлагаемой тепловой модели в главе было проведено сравнение результатов расчета с данными, полученными в ходе испытаний дугостаторного асинхронного двигателя типа ДАД 750-150УХЛ1. Сравнение результатов теплового расчета с экспериментом показало, что погрешность расчета температуры обмоток равна 6%, а температуры магнитопровода – 20%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа развивает разработки кафедры электротехники и электромеханики ПНИПУ в области исследования линейных и дугостаторных асинхронных машин.

В диссертации предложен новый вариант низкоскоростного привода для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин, основным элементом которого является дугостаторный асинхронный двигатель (ДАД). Выявлены значения мощности и скорости ДАД необходимые для непрерывного режима работы малодебитных скважин.

Создана методика проектирования ДАД с учетом требований станков-качалок малодебитных нефтяных скважин. Разработаны методы электромагнитного и теплового расчета низкоскоростных ДАД. Предложена схема замещения и соответствующий ей метод расчета рабочих и пусковых характеристик низкоскоростных ДАД для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин.

Основные результаты работы могут быть выражены в следующих выводах:

1. Проанализированы режимы работы большого числа малодебитных нефтяных скважин, в том числе, и работавших в непрерывном режиме при различных вариантах низкоскоростного привода. В результате проведенного анализа и дополнительных исследований был предложен новый вариант низкоскоростного привода для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин. Основным элементом этого привода является низкоскоростной дугостаторный асинхронный двигатель со скоростью вращения 100÷300 об/мин. При этом сохраняются в прежнем виде все остальные звенья кинематической цепи станка-качалки. Такой привод позволяет с минимальными затратами переводить малодебитные скважины в непрерывный режим работы и увеличивать добычу нефти.

2. Разработана методика определения геометрических размеров низкоскоростного ДАД, а также даны рекомендуемые значения электромагнитных нагрузок. Предлагаемая методика составлена с учетом

наработок по созданию опытно-промышленных образцов ДАД. Двигатели, спроектированные по данной методике, обеспечивают требуемую частоту качаний насоса станка-качалки и обладают при этом приемлемыми энергетическими и эксплуатационными показателями.

3. Откорректирован и уточнен метод электромагнитного расчета с учетом особенностей конструкции ДАД.

4. Предложена инженерная методика расчета рабочих и пусковых характеристик низкоскоростного ДАД, основанная на электрической схеме замещения. В предлагаемой схеме замещения кроме сопротивлений, характеризующих бегущее поле, имеются сопротивления, позволяющие учесть влияние полей продольного краевого эффекта (ПКЭ). Исследования, выполненные с использованием квазитрехмерного метода расчета ДАД, показали, что сопротивления, учитывающие ПКЭ, главным образом зависят от четырех параметров. Следовательно, эти сопротивления можно представить в виде простых алгебраических или графических зависимостей. После определения сопротивлений, учитывающих влияние ПКЭ, расчет характеристик низкоскоростного ДАД можно вести по простым алгебраическим выражениям, полученным непосредственно из схемы замещения ДАД. Предлагаемая методика позволяет значительно упростить расчет характеристик и делает его доступным для инженерного применения.

5. Сравнение расчетных характеристик и экспериментальных данных, полученных в ходе приемочных испытаний опытно-промышленных образцов низкоскоростных ДАД, подтверждает возможность использования предлагаемой методики, а точность расчета приемлема для инженерной практики и по основным параметрам находится в пределах 10%.

6. Разработана тепловая модель, основанная на тепловой схеме замещения и учитывающая особенности стационарных тепловых процессов в низкоскоростных ДАД. Предлагаемая тепловая схема замещения составлена с учетом дополнительных путей теплопередачи, обусловленных особенностями конструкции низкоскоростного ДАД. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало сходимость в пределах 6% для температуры обмотки статора и 20% для температуры магнитопровода статора. Это позволяет применять предлагаемую тепловую модель для тепловых расчетов низкоскоростных ДАД на этапе проектирования.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Шулаков Н.В. Схема замещения линейного асинхронного двигателя / Н.В. Шулаков, Е.М. Огарков, А.М. Бурмакин // Электротехника. – 2010. – №6. – С. 9-13.
2. Шулаков Н.В. Тепловые процессы дугостаторного асинхронного двигателя / Н.В. Шулаков, А.М. Бурмакин // Электротехника. – 2010. – №6. – С. 14-19.

3. Огарков Е.М. Повышение эффективности добычи нефти из низкодебитных скважин / Е. М. Огарков, П.Н. Цылев, А.Д. Коротаев, А.М. Бурмакин // Нефтегазовое и горное дело / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: ПГТУ, 2005. – Вып.6. – С. 172–175.
4. Бурмакин А.М. Тихоходные асинхронные электродвигатели малой мощности / А.М. Бурмакин, Е. М. Огарков // Нефтегазовое и горное дело / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: ПГТУ, 2005. – Вып.6. – С. 176-178.
5. Асинхронные электродвигатели для привода станков-качалок низкодебитных скважин / Е.М. Огарков, П.Н. Цылёв, А.Д. Коротаев, А.М. Бурмакин, В.А. Лобанов, В.А. Чекменёв, А.С. Ипанов. // Наука производству: Научно-технический журнал / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: ПГТУ, 2006. – №1. – С. 39-40.
6. Коротаев А.Д. Безредукторный электропривод станков-качалок / А.Д. Коротаев, Е.М. Огарков, П.Н. Цылёв, А.М. Бурмакин // Информационные управляющие системы: Сборник научных трудов / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: Пермский ЦНТИ, 2006. – С. 138-141.
7. Коротаев А.Д. Уравнения электромагнитного поля в движущихся электропроводящих изотропных средах / А.Д. Коротаев, Е.М. Огарков, П.Н. Цылёв, А.М. Бурмакин // Информационные управляющие системы: Сборник научных трудов / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: Пермский ЦНТИ, 2006. – С. 106-109.
8. Огарков Е.М. Выбор электродвигателя при переводе скважины из циклического режима работы в непрерывный / Е.М. Огарков, А.М. Бурмакин // Проблемы комплексного освоения месторождений природных ископаемых в Пермском крае: Материалы краевой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: ГОУ ВПО, 2007. – С. 236–238.
9. Бурмакин А.М. Определение основных размеров низкоскоростного двигателя малой мощности / А.М. Бурмакин, А.Д. Коротаев, Е.М. Огарков, П.Н. Цылёв // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляющие электромеханические системы: сб. ст. III междунар. конф. – Екатеринбург, 2007.
10. Бурмакин А.М. Теплопередача дугостаторного асинхронного двигателя и его полная тепловая схема / А.М. Бурмакин // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. 2-я всероссийская научно-техническая конференция. – Пермь, 2008. – С. 329-333.
11. Бурмакин А.М. Тихоходные асинхронные двигатели для станков-качалок низкодебитных скважин / А.М. Бурмакин // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. 2-я всероссийская научно-техническая конференция. – Пермь, 2008. – С. 340-350.

12. Огарков Е.М. Модернизация электрооборудования станков-качалок низкодебитных нефтяных скважин / Е.М. Огарков, А.Д. Коротаяев, П.Н. Цылёв, А. М. Бурмакин // Научные исследования и инновации: Научно-технический журнал / Перм. гос. техн. университет. – Пермь: ПГТУ, 2009. – №4. – С. 59-65.