

На правах рукописи

Шатова Ирина Владимировна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре “Электротехнические комплексы автономных объектов” Московского энергетического института (технического университета).

Научный руководитель кандидат технических наук, вед. научн. сотр.
Русаков Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Остриров Вадим Николаевич

кандидат технических наук, ст. научн. сотр.
Алексеев Алексей Михайлович

Ведущая организация ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод» г. Сарапул

Защита диссертации состоится «22» февраля 2008 года в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Энергетического института (технического университета)

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан « » января 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
канд. техн. наук, доцент

Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из тенденций развития современного электропривода является постоянное расширение сферы применения регулируемого электропривода.

В ряде областей требуется работа в пределах механической характеристики гиперболического вида (тяговой характеристики) при хороших динамических качествах привода и широком диапазоне регулирования вращающего момента. Это относится к электроприводам большегрузных автомобилей, тепловозов и других транспортных средств, электроприводам грузоподъемного оборудования, приводам электроинструмента различного назначения и мощности и т.д.

Особенностью условий функционирования перечисленных выше двигателей является широкий диапазон изменения нагрузок и частоты вращения вала, что приводит к существенным перераспределениям потерь в обмотках и стали магнитопровода в зависимости от режима работы.

В настоящее время в этих областях в составе регулируемого привода широко применяются электродвигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения.

Основным недостатком двигателей постоянного тока (ДПТ) является наличие в них щеточно-коллекторного узла. При этом все возрастающие технические требования к электроприводу и к электрическим машинам в частности побуждают к разработке новых электродвигателей нетрадиционных конструкций.

Альтернативой приводам с двигателями постоянного тока являются приводы с вентильными двигателями (ВД).

В составе ВД могут использоваться электрические машины различного типа. Реализация тяговых характеристик, наиболее просто осуществляемая при использовании электродвигателей с последовательной обмоткой возбуждения, может быть обеспечена в ВД на базе одноименнополюсных индукторных машин. В дальнейшем такие двигатели будем называть вентильными индукторными двигателями (ДВИ).

Двигатели этого типа просты в изготовлении, технологичны, надежны, имеют малые потери в роторе, обладают хорошими регулировочными свойствами, способны работать в сложных условиях окружающей среды.

Несмотря на то, что машины подобного класса известны уже достаточно давно, выход на большие мощности двигателей стал возможным ис-

ключительно благодаря успехам современной электроники.

Для создания конкурентоспособных ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения требуются методики их поверочного расчета, включающие электромагнитные и тепловые расчеты, которые позволили бы производить расчеты интегральных значений и временных зависимостей параметров и характеристик двигателя, а также уточнить с учетом заданного критерия геометрические и обмоточные данные электродвигателя, провести расчет на требуемые показатели и выбрать алгоритм управления.

В публикациях, касающихся вентильных двигателей с электромагнитным возбуждением, в основном рассматриваются двигатели независимого возбуждения. В то же время в этих публикациях недостаточно внимания уделено методам расчета электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в машинах такого типа, а особенности, касающиеся машин последовательного возбуждения, практически не рассмотрены.

С учетом сказанного можно сделать вывод, что разработка и исследование вентильных индукторных электродвигателей с последовательной обмоткой возбуждения (ОВ) представляет весьма актуальную задачу. А создание методик поверочного расчета является необходимой базой для анализа и синтеза электромеханических систем такого класса в целом.

Цель диссертационной работы

Разработка математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в вентильном индукторном двигателе с последовательной обмоткой возбуждения и исследование его характеристик посредством этих моделей.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы следующие основные **задачи**:

1. Провести анализ и систематизацию сведений по различным вопросам теории и практики разработки и применения ДВИ.
2. Разработать математическую модель электромагнитных процессов в ДВИ с последовательной ОВ.
3. Разработать математическую модель тепловых процессов в ДВИ с электромагнитным возбуждением, определить основные особенности систем охлаждения.
4. С целью подтверждения адекватности разработанных математических моделей провести экспериментальные исследования и сравнение результатов натурного и математического моделирования.

Методы исследования

Комплексное исследование ДВИ последовательного возбуждения включает в себя анализ электромагнитных процессов с помощью аналитических методов исследования, базирующихся на методе мгновенных значений, теории обыкновенных дифференциальных уравнений и матричной алгебре. Исследование тепловых процессов в ДВИ проводилось посредством математической модели, основанной на методе эквивалентных схем замещения, и с применением пакета конечно-элементного анализа ELCUT.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обосновывается хорошим совпадением результатов теоретического исследования и экспериментальных данных, полученных на макетном образце для различных режимов работы исследуемого двигателя.

Новые научные результаты и практическая ценность

1. Систематизированы сведения по вопросам современного состояния теории и практики разработки ДВИ. Определены и обоснованы перспективные области применения ДВИ с последовательной ОВ.

2. Разработана и обоснована математическая модель электромагнитных процессов в ДВИ с последовательной ОВ, позволяющая адекватно с приемлемыми допущениями исследовать процессы, протекающие в машине. Дана оценка точности показателей этой модели.

3. Разработана математическая модель тепловых процессов в ДВИ с электромагнитным возбуждением, позволяющая оценить динамику процесса нагрева и охлаждения элементов конструкции электродвигателя, а также определить рациональное значение требуемой производительности системы охлаждения в соответствии с заданными режимами работы объекта исследования.

4. С учетом особенностей работы тяговых электродвигателей сформулированы рекомендации для выбора систем охлаждения ДВИ этого назначения.

Реализация результатов работы

Разработанные математические модели реализованы в виде программ для персонального компьютера. Использование программ позволяет принимать обоснованные технические решения по выбору рациональных параметров и режимов работы ДВИ.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке и проектировании ДВИ для приводов электротележки, троллейбуса и сетевого

насоса РТС «Коломенская» г. Москвы.

Разработанные в рамках данной работы программные средства реализованы в учебном процессе на кафедре ЭКАО МЭИ (ПСУН «Программа моделирования тепловых процессов в вентильных индукторных двигателях» и «Программа моделирования электромагнитных процессов в вентильных индукторных машинах»), а также используются при выполнении госбюджетных и хоздоговорных работ в данной области.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель электромагнитных процессов в ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения.

2. Математическая модель тепловых процессов в ДВИ, позволяющая исследовать тепловое состояние электродвигателя в различных режимах его работы.

3. Результаты анализа и расчета электромагнитных и тепловых процессов в ДВИ с последовательной ОВ различного назначения и мощности.

4. Данные экспериментальных исследований макетного образца ДВИ с последовательной ОВ, подтверждающие адекватность результатов, полученных с использованием разработанных расчетных программ.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» Московского Энергетического института (технического университета), а также на следующих конференциях: одиннадцатая, двенадцатая и тринадцатая международные научно-технические конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ март 2005-2007 гг.

Публикации

По результатам проведенных исследований и теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 71 наименования. Ее содержание изложено на 193 страницах машинописного текста, включая 78 рисунков, 16 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен обзор научных публикаций, посвященных вопросам современного состояния теории и практики разработки и применения индукторных машин (ИМ). Обоснована необходимость разработки методик поверочного расчета и математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в ДВИ с последовательной ОБ, основанных на современных методах математического моделирования.

Представлены классификация, устройство и принцип действия ИМ, а также сравнительный анализ возможных способов включения последовательной ОБ (один из вариантов представлен на рис.1). Показано, что срав-

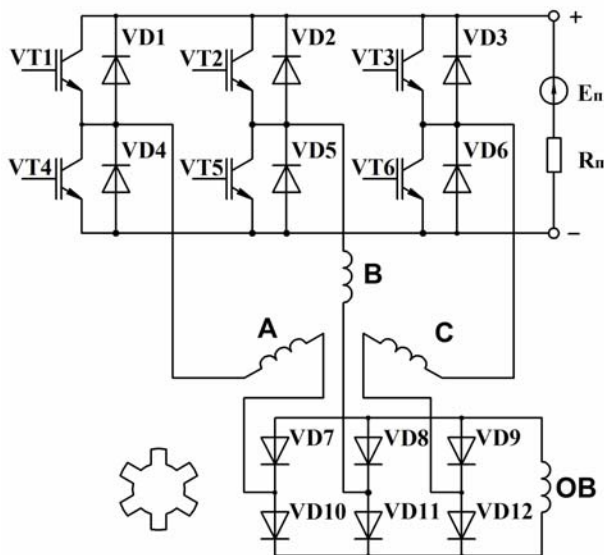


Рис. 1 Электрическая схема силовой части ДВИ

нительная простота конструкции, надежность, технологичность, способность работать в сложных условиях окружающей среды, хорошие динамические и регулировочные показатели, а также «гиперболический» вид механической характеристики обуславливают возможность и перспективность применения ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения в тяговых и транспортных приводах, приводах экскаваторов и буровых станков, а также в электроприводах специализированного назначения.

Проведен сопоставительный анализ различных методов математического моделирования, который показал, что наиболее предпочтительным из них для исследования электромагнитных и тепловых процессов в ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения является метод, использующий эквивалентные схемы замещения. Данный метод позволяет проводить расчеты с минимальными затратами времени и достаточной для инженерной практики точностью. При этом имеется возможность анализа процессов в электроприводах с различной конфигурацией магнитной цепи, разным числом фаз, схем подключения ОБ и алгоритмами работы инвертора (коммутатора).

Во второй главе рассмотрены общие проблемы, связанные с выбором и обоснованием метода электромагнитного расчета ИМ. При выборе метода расчета магнитной цепи во внимание принимались требуемая точность получаемых результатов и необходимый при этом объем вычислений.

Работа ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения в ряде режимов характеризуется насыщенным состоянием отдельных участков магнитной цепи и несинусоидальной формой фазных токов (с нулевой паузой) в обмотках.

Для математического моделирования электромагнитных процессов с учетом этих факторов наиболее пригодным является метод мгновенных значений при использовании малоузловых эквивалентных схем замещения магнитных цепей электрической машины. При этом расчёт магнитной цепи, токов и напряжений производится на периоде повторяемости электромагнитных процессов с некоторым достаточно малым шагом.

Программная реализация этого метода наряду с проведением поверочного расчета, расчета интегральных значений и временных зависимостей параметров двигателя, а также расчета характеристик позволяет с учетом заданного критерия уточнить геометрические и обмоточные данные электродвигателя, провести расчет на требуемые показатели и выбрать алгоритм управления.

В главе приведено описание подхода к построению математической модели для расчета электромагнитных характеристик ДВИ. Основным содержанием математической модели является система уравнений, описывающих по законам Кирхгофа контура протекания токов электрической цепи ДВИ на каждом шаге расчета. Основу этих уравнений составляют выражения для напряжений, записываемых для каждой из обмоток: m фаз обмотки якоря (ОЯ) и s обмоток возбуждения. Для i -той обмотки уравнение имеет вид:

$$u_i = i_i \cdot R_i + d\psi_i/dt, \quad (1)$$

где u_i ; i_i ; R_i ; ψ_i – напряжение, ток, сопротивление и потокосцепление i -той обмотки соответственно; $d\psi_i/dt$ – ЭДС, наведенная в i -ой обмотке в рассматриваемый момент времени.

Потокосцепление каждой обмотки зависит от токов всех обмоток и угла поворота ротора θ , являющихся в свою очередь функциями времени. С учетом этого после дифференцирования потокосцепления как сложной функции выражение (1) приводится к виду:

$$u_i = i_i \cdot R_i + \partial \psi_i / \partial \theta \cdot d\theta / dt + \sum_{k=1}^{n_b} \partial \psi_i / \partial i_k \cdot di_k / dt, \quad (2)$$

где $\partial \psi_i / \partial \theta$ - коэффициент ЭДС вращения; $d\theta / dt = \omega$ - электрическая угловая скорость вращения; $\partial \psi_i / \partial i_k$ - дифференциальная индуктивность L_{ik} .

Полная схема замещения электрической цепи ДВИ включает в себя схемы замещения обмоток, коммутатора, источника питания, а также выпрямителя (в случае подключения ОВ через диодный мостовой блок в разрыв нулевой точки фазных обмоток – рис.1).

Контура, описываемые системой дифференциальных уравнений, определяются с учетом состояния полупроводниковых элементов вентильного преобразователя (инвертора и выпрямителя). Алгоритм переключения транзисторов задается системой управления (СУ) в соответствии с сигналами датчиков положения ротора и других датчиков обратных связей.

В качестве неизвестных в полученной системе дифференциальных уравнений выступают токи. Их производные рассчитываются методом исключения Гаусса, а собственно токи – явным методом Эйлера.

Дифференциальные электромагнитные параметры - коэффициенты ЭДС вращения и дифференциальные индуктивности являются внутренними электромагнитными параметрами машины и определяются после расчета магнитной цепи через соответствующие производные потокосцеплений.

Расчет магнитной цепи проводится по схеме замещения (СЗ). Магнитная цепь ДВИ разбивается на ряд участков, представляемых в СЗ сосредоточенными параметрами. Степень детализации схемы замещения магнитной цепи выбирается как компромисс между точностью и временем расчета.

В главе приводятся сформированные автором эквивалентные схемы замещения магнитной цепи ДВИ с различной степенью детализации. В качестве основного был выбран вариант схемы замещения (рис.2), при котором зубец и спинка статора, а также зубец ротора представляются на схеме в виде одного элемента, ярмо ротора представляется в виде двух элементов, а количество элементов разбиения втулки и корпуса определяется числом зубцов ротора и статора электродвигателя соответственно.

Характеристиками нелинейных проводимостей ферромагнитных участков магнитной цепи являются в модели сплайн-аппроксимации кривых намагничивания соответствующих материалов.

Проводимости воздушных промежутков G_8 рассчитываются по методу Р.Поля с учетом вероятностных путей магнитного потока в пределах каждого зубцового деления статора и полюсного деления ротора. Такие проводимости за-

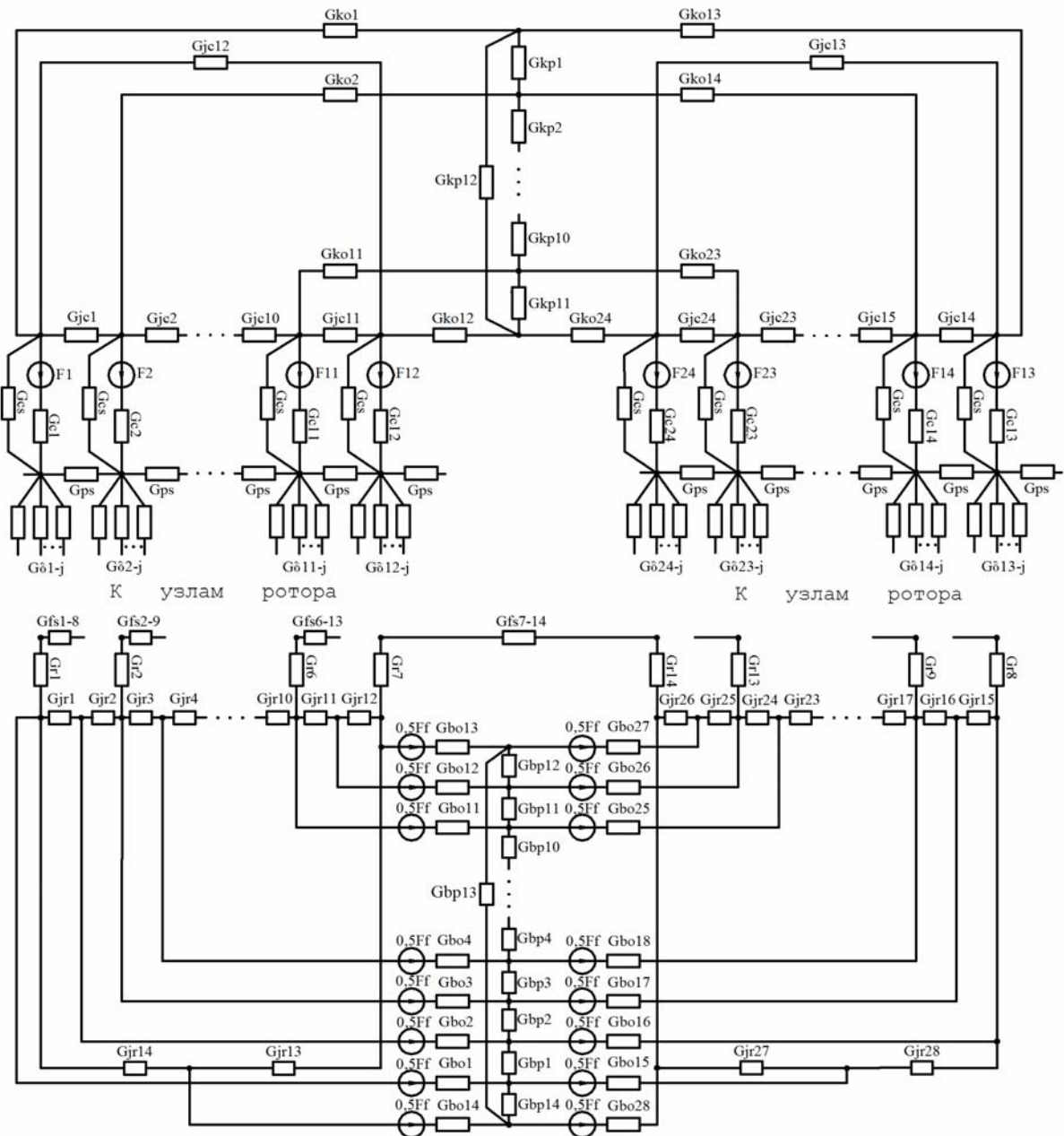


Рис. 2 Вариант схемы замещения магнитной цепи ДВИ двухпакетной конструкции с 12 зубцами на статоре и 7 зубцами на роторе

F_j - МДС j -ой катушки якоря; F_f - суммарная МДС обмотки возбуждения G_{jc} - магнитная проводимость j -ого участка спинки статора; G_{jr} - магнитная проводимость i -го участка ярма ротора; G_{cs} - суммарная магнитная проводимость лобового и продольного пазового рассеяния обмотки якоря; G_c - суммарная магнитная проводимость j -ого зубца статора; G_{ps} - магнитная проводимость пазового рассеяния; G_{ri} - магнитная проводимость i -ого зубца ротора; G_{fs} - магнитная проводимость рассеяния обмотки возбуждения; $G_{\delta ji}$ - магнитная проводимость воздушного зазора между j -ым зубцом статора и i -ым зубцом ротора; G_{ko} , G_{kp} - магнитные проводимости продольного и поперечного участка корпуса; G_{bo} , G_{bp} - магнитные проводимости продольного и поперечного участка втулки.

висят от угла поворота ротора θ , зависимость $G_s(\theta)$ рассчитывается с некоторым достаточно малым шагом на предварительном этапе.

Проводимости рассеяния схемы замещения рассчитываются по упрощенным картинам вероятностных путей замыкания потоков рассеяния.

Магнитное состояние машины, т.е. значения магнитных потоков и соответствующих им проводимостей стальных участков, определяется итерационным способом. В пределах каждой итерации расчет магнитных потоков в ветвях схемы замещения ведется методом узловых потенциалов.

Расчет магнитной цепи заканчивается, когда максимальное относительное приращение магнитных проводимостей "стальных" участков магнитопровода, полученных на двух последовательных итерациях, будет меньше некоторого заданного параметра точности поиска магнитного состояния машины.

Расчет схемы замещения магнитной цепи ДВИ на периоде повторения выполняется многократно с выбранным шагом расчета $\Delta\theta$ для различных взаимных положений сердечников.

В каждой точке расчета по известным формулам рассчитываются мгновенные значения исследуемых величин вентильного двигателя. После достижения установившегося состояния рассчитываются интегральные значения выходных показателей ДВИ.

По выбранной схеме замещения магнитной цепи, учитывающей нелинейность характеристик ферромагнитных материалов, двустороннюю зубчатость сердечников и изменение конфигурации зазора между сердечниками при перемещении ротора, составлена методика и алгоритм расчета магнитной цепи ДВИ, а также разработана программа расчета, учитывающая введенные особенности схемы замещения магнитной цепи и варианты подключения последовательной ОВ.

Третья глава посвящена расчету тепловых процессов в ДВИ с электромагнитным возбуждением. Оценка теплового состояния отдельных элементов электродвигателя, включая динамику тепловых процессов, является важным этапом разработки ДВИ. Эти вопросы особенно актуальны для машин, работающих в повторно-кратковременных режимах, а в еще большей степени для машин с последовательной обмоткой возбуждения.

Результаты проведенного анализа показали, что для решения таких задач наиболее простым с точки зрения реализации и обеспечения точности, соответствующей требованиям инженерного расчета, является способ моделирования тепловых процессов с использованием эквивалентных схем замещения.

В главе рассмотрены особенности режимов работы ДВИ тягового назначения. Разнообразие условий функционирования тягового привода определяет различные варианты структур систем охлаждения электродвигателя. Более распространен способ охлаждения двигателя воздухом за счет введения специальных осевых каналов. Для сложных условий окружающей среды целесообразно применение жидкостной системы охлаждения. Предлагаемый метод исследования позволяет учесть специфику обоих способов охлаждения.

Для корректной оценки теплового состояния ДВИ с принудительным охлаждением требуется проведение гидравлического расчета, результаты которого являются исходными данными для теплового расчета.

С учетом особенностей конструкции магнитной цепи электродвигателя и его системы охлаждения формируется эквивалентная тепловая схема замещения (ТСЗ).

Автором сформирован вариант схемы замещения, в котором основными элементами разбиения выбраны: зубцы и спинка статора; корпус и подшипниковые щиты; пазовая, лобовая и межпакетная части обмотки статора; обмотка возбуждения; зубцы ротора; внутренняя среда (рис.3).

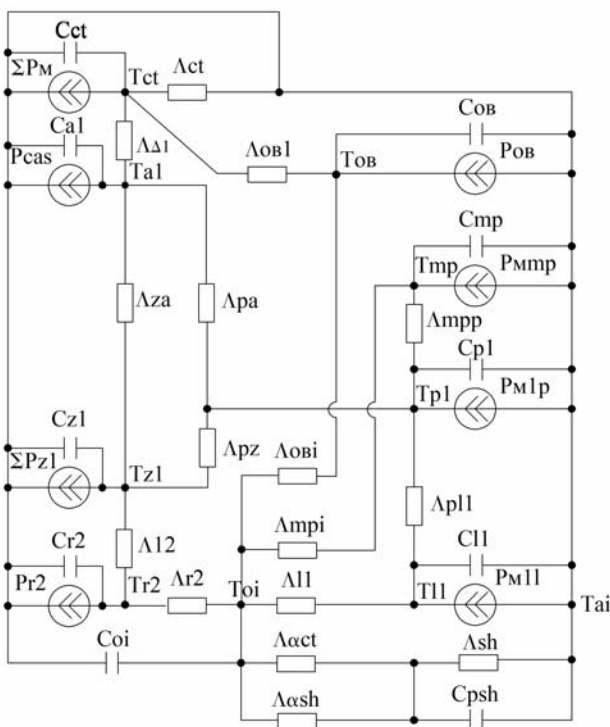


Рис. 3 Тепловая схема замещения ДВИ

Все элементы ТСЗ связываются между собой соответствующими тепловыми проводимостями Λ_i . Источниками теплоты, сосредоточенными в соответствующих узлах, являются: потери в стали магнитопровода (основные и добавочные потери в зубцах статора P_{z1} , потери в спинке статора P_{cas} , потери в стали ротора P_{r2}); потери в меди обмоток статора (P_{m1p} , P_{m1l} , P_{mp}) и возбуждения P_{MOV} ; а также внутренние механические потери P_m , состоящие из потерь на трение в подшипниках и потерь на трение ротора о воздух.

Тепловое состояние каждого элемента схемы замещения описывается следующим дифференциальным уравнением теплового баланса:

$$C_n \cdot \frac{dT_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \cdot (T_i - T_n) + P_n, \quad (3)$$

где C_n - теплоемкость n-го элемента; T_n - температура n-го элемента; T_i - температура одного из соседних элементов, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым элементом n; P_n - потери мощности в данном элементе n; Λ_{in} - тепловая проводимость i-го элемента; t - текущее время.

С целью определения теплового состояния машины в целом решается система уравнений, число которых зависит от количества элементов, на которые разбивается машина.

Несмотря на то, что в большинстве случаев метод ЭТС используется для определения теплового состояния электродвигателя в продолжительном режиме работы, в диссертации показана возможность его успешного применения для расчета нестационарных номинальных режимов, а также режимов работы электродвигателя с заданной циклограммой нагрузки.

С учетом выбранной схемы замещения составлена методика расчета тепловых процессов в ДВИ с электромагнитным возбуждением, а также разработана программа расчета, позволяющая:

- исследовать тепловое состояние электрической машины при ее работе как в установившихся, так и в переходных режимах;
- оценить динамику процесса нагрева и охлаждения элементов конструкции электродвигателя;
- исследовать чувствительность полученной системы к вариациям теплофизических и геометрических параметров;
- определить рациональное значение требуемой производительности системы охлаждения в соответствии с заданными режимами работы и циклограммами нагрузки на этапе проектирования;
- составлять обоснованные рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок и соотношений основных линейных размеров машины с заданной длительностью работы.

В случае необходимости более детального исследования теплового состояния отдельных элементов электрической машины (получение картины температурного поля) целесообразно использование и полевых методов расчета. В главе приводятся основные положения и допущения конечно-элементного метода применительно к тепловому расчету ДВИ.

В четвертой главе представлены результаты расчетных исследований параметров и характеристик ДВИ различного назначения и мощности, полученные с использованием разработанных программ.

Для электродвигателя ДВИ-5 с последовательной ОВ, предназначенного для привода электротележки, были получены механические характеристики при постоянстве мощности и различных углах включения фазы (рис.4). Проведенные расчеты показали, что управление начальным углом включения при парной коммутации и током возбуждения ДВИ может обеспечить механические характеристики аналогичные характеристикам двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

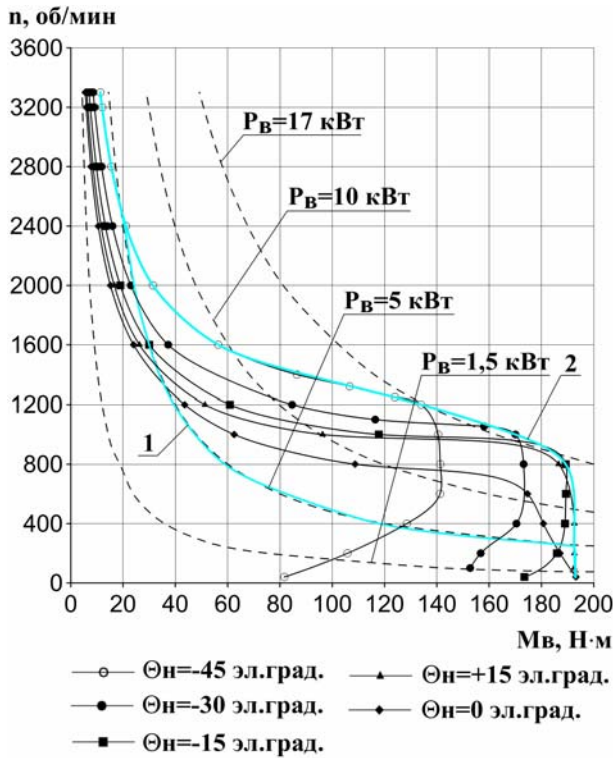


Рис. 4 Механические характеристики ДВИ-5 ($U_{п}=75В$, $I_{ф\max}=350А$)

При выборе рационального закона управления (например, для реализации предельной механической характеристики 2 рис.4) при разработке ДВИ-5 выявлено, что при больших нагрузках (малых частотах вращения) рациональными являются углы $0 \div 15$ эл.град., а при малых нагрузках (больших частотах вращения) более рациональными являются углы $-15 \div -45$ эл.град.

Сравнение характеристик двигателя постоянного тока типа ПТ6,3, и разработанного с помощью предлагаемых методик для его замены электродвигателя ДВИ-5 (рис.5) показало, что замена ДПТ на ДВИ позволит повысить ресурс привода, увеличить его КПД (в среднем с 0,7 до 0,92) и улучшить ряд других потребительских качеств.

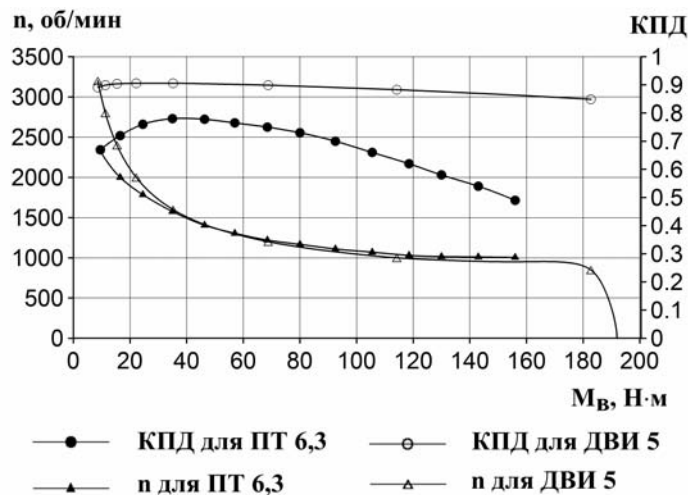


Рис. 5 Предельные механические характеристики и зависимости КПД от момента на валу электродвигателей ПТ6,3 и ДВИ-5 ($U_{п}=75В$)

В главе также приведены результаты электромагнитного и теплового расчета электродвигателя ДВИ-180 с последовательной ОВ. Двигатель имеет независимую осевую вентиляцию через пазы статора и ротора и предназначен для замены электрической машины постоянного тока типа ДК-117 в составе привода троллейбуса.

Движение троллейбуса характеризуется частыми пусками и торможениями. Для оценки теплового состояния двигателя при среднестатистических условиях (движение троллейбуса по циклограмме нагрузки) было выделено несколько характерных режимов работы привода и принято допущение о постоянстве тепловыделения в этих режимах при усредненных условиях (таблица 1).

Таблица 1

№ п/п	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$n_{\text{ср}}, \text{об/мин}$	$M_{\text{ср}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Мощность потерь в элементах двигателя, Вт						Примечание
				$P_{\text{ОЯ}}$	$P_{\text{ОВ}}$	$P_{\text{МЕХ}}$	$P_{\text{р}}$	$P_{\text{СП}}$	P_{Z}	
1	21	1230	700	1318	422	360	566	994	756	Разгон
2	10	3650	230	584	185	1100	899	2750	2047	V_{max}
3	20	1875	700	1655	589	560	1179	520	693	Торможение
4	30	—	—	—	—	—	—	—	—	Стоянка
5	30	500	1600	6203	1995	150	432	328	403	Подъем ($V=10$ км/час)
6	40	1000	140	168	52	300	120	126	191	$V=20$ км/час
7	5	500	700	1124	344	150	181	239	258	Торможение
8	25	—	—	—	—	—	—	—	—	Стоянка
9	180	2000	1000	6804	2425	600	1366	838	1284	Спуск ($V=40$ км/час)
10	25	—	—	—	—	—	—	—	—	Стоянка
11	190	1000	1400	4214	1406	300	939	705	846	Подъем ($V=20$ км/час)
12	25	—	—	—	—	—	—	—	—	Стоянка
13	180	1000	1000	2042	663	300	801	601	768	Спуск ($V=20$ км/час)

При определении теплового состояния электродвигателя принималось, что все режимы его работы образуют цикл и последовательно повторяются.

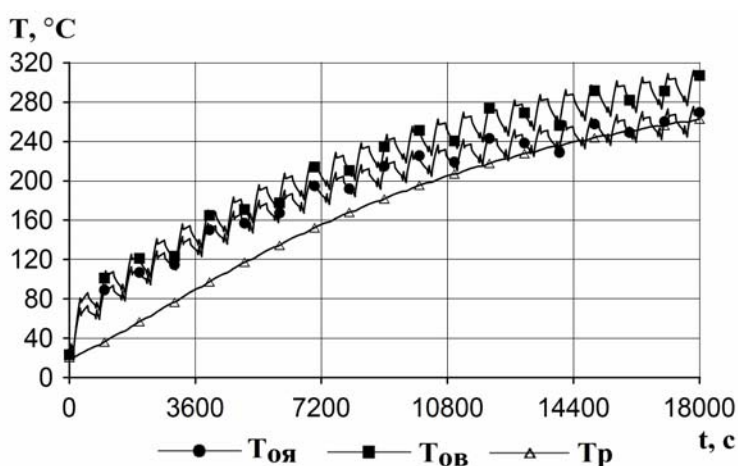


Рис. 6 Зависимости температур элементов ДВИ-180 от времени при работе по циклограмме максимальных нагрузок

Результаты проведенного теплового расчета показали, что при движении троллейбуса с циклом максимальных нагрузок динамика нагрева элементов электродвигателя такова, что при отсутствии независимой осевой вентиляции возможна его работа в течение времени не более часа (рис.6). Здесь и далее $T_{\text{оя}}$, $T_{\text{ов}}$ – температура ОЯ и ОВ, $T_{\text{р}}$ – температура стали ротора.

С целью определения требуемого расхода воздуха, необходимого для отвода тепла, было проведено исследование его влияния на установившееся значение температуры элементов конструкции электродвигателя (рис.7).

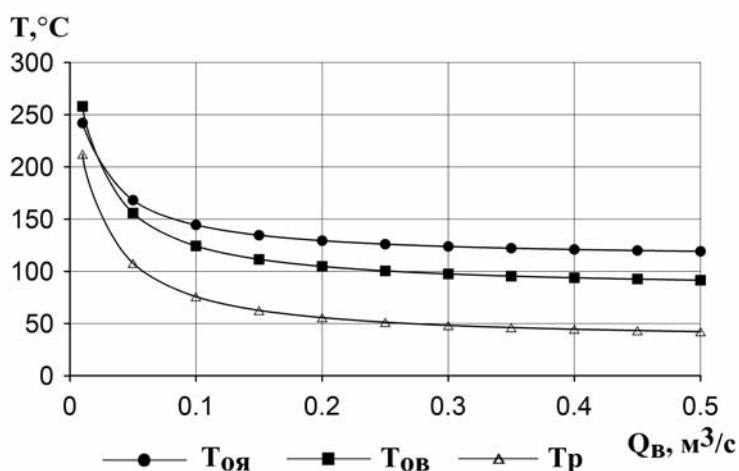


Рис. 7 Зависимости температур элементов электродвигателя ДВИ-180 от расхода охлаждающего воздуха ($T_{\text{окр.ср.}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$)

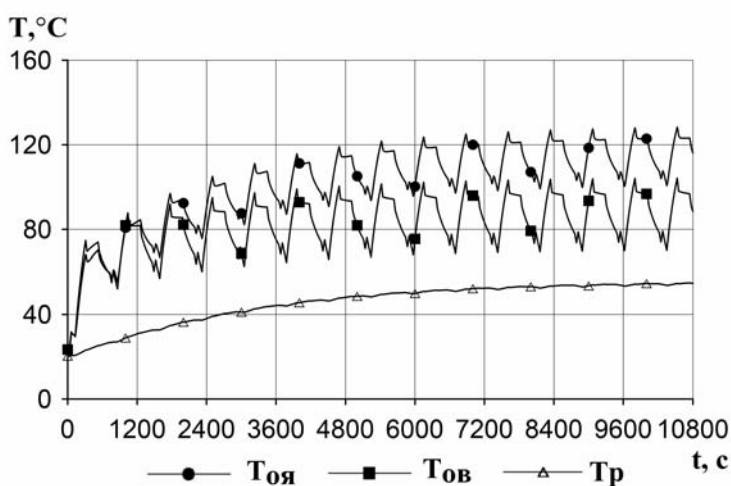


Рис. 8 Зависимости температур элементов двигателя ДВИ-180 от времени при работе по циклограмме ($Q_{в}=0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, $T_{\text{окр.ср.}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$)

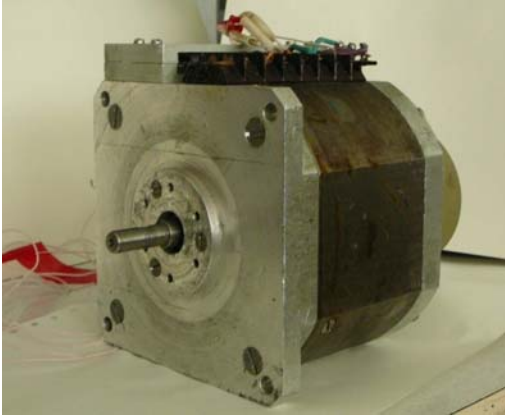
Результаты расчета показали, что рациональное значение расхода воздуха составляет $Q_{в}=0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ (дальнейшее увеличение расхода практически не влияет на снижение температуры элементов конструкции двигателя).

Очевидно, что работа привода по циклограмме максимальных режимов будет встречаться крайне редко, особенно в течение времени более часа, но и в этом случае при наличии осевой вентиляции (рис.8) максимальный перегрев обмоток, как наиболее нагретых элементов двигателя не превысит $100 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует классу изоляции F. Если же после одного часа работы делать перерыв на $15 \div 20$ минут, то температура элементов двигателя нормализуется.

В главе приведены результаты исследований распределения температуры в пазах

статора электродвигателя ДВИ-630 в зависимости от различных вариантов охлаждения двигателя (продува) и способа укладки обмотки в пазы. Расчет проводился полевым методом. Результаты теплового расчета позволили выбрать параметры системы охлаждения (вентилятора, размеров каналов охлаждения и др.), а также сформулировать рекомендации по изготовлению узлов и деталей двигателя, правильность которых была позднее подтверждена при испытаниях реального объекта.

В пятой главе приведены результаты проверки адекватности разработанных математических моделей электромагнитных и тепловых процессов реальному объекту. Адекватность проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных исследований макетного образца ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения (рис.9). По своему конструктивному и



схемному исполнению рассматриваемый ДВИ двухпакетной конструкции позволяет учесть и использовать основные возможности разработанных математических моделей.

В работе приведены описание испытательного стенда и данные макетного образца, а также результаты электромагнитных испытаний в виде графиков (рис.10, 12) и осциллограмм (рис.11), на которых для сравнения указаны аналогичные зависимости, полученные расчетным путем.

Рис. 9 Макетный образец

полученные расчетным путем. Результаты тепловых испытаний представлены на рис.13.

Сопоставление результатов электромагнитного и теплового расчетов и данных экспериментальных исследований показало, что количественные расхождения между ними не превышают 10-12%, что позволяет считать предлагаемые методики и разработанные расчетные программы приемлемыми для практического использования.

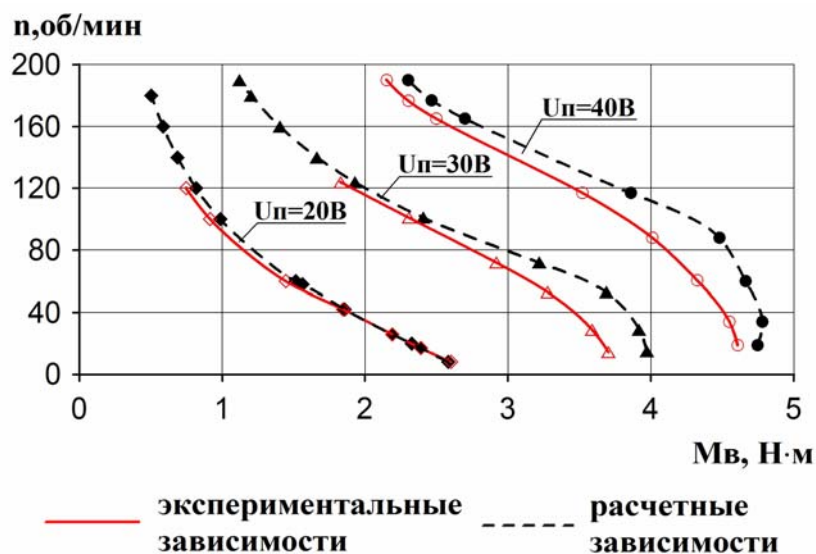


Рис. 10 Механические характеристики макетного образца ДВИ, полученные при различных значениях напряжения питания (U_n) ($\theta_n=30$ эл.град.)

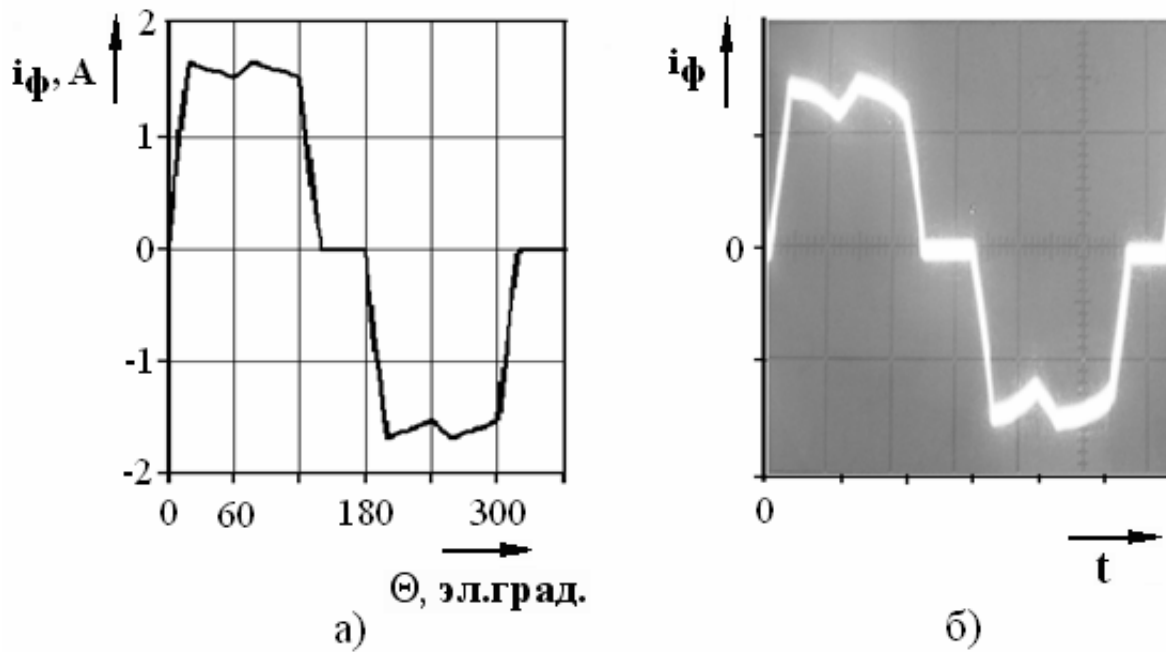


Рис. 11 Расчетная зависимость (а) и осциллограмма фазного тока (б) при $U_n=27\text{В}$, $n=250$ об/мин, $\Theta_n=0$ эл.град

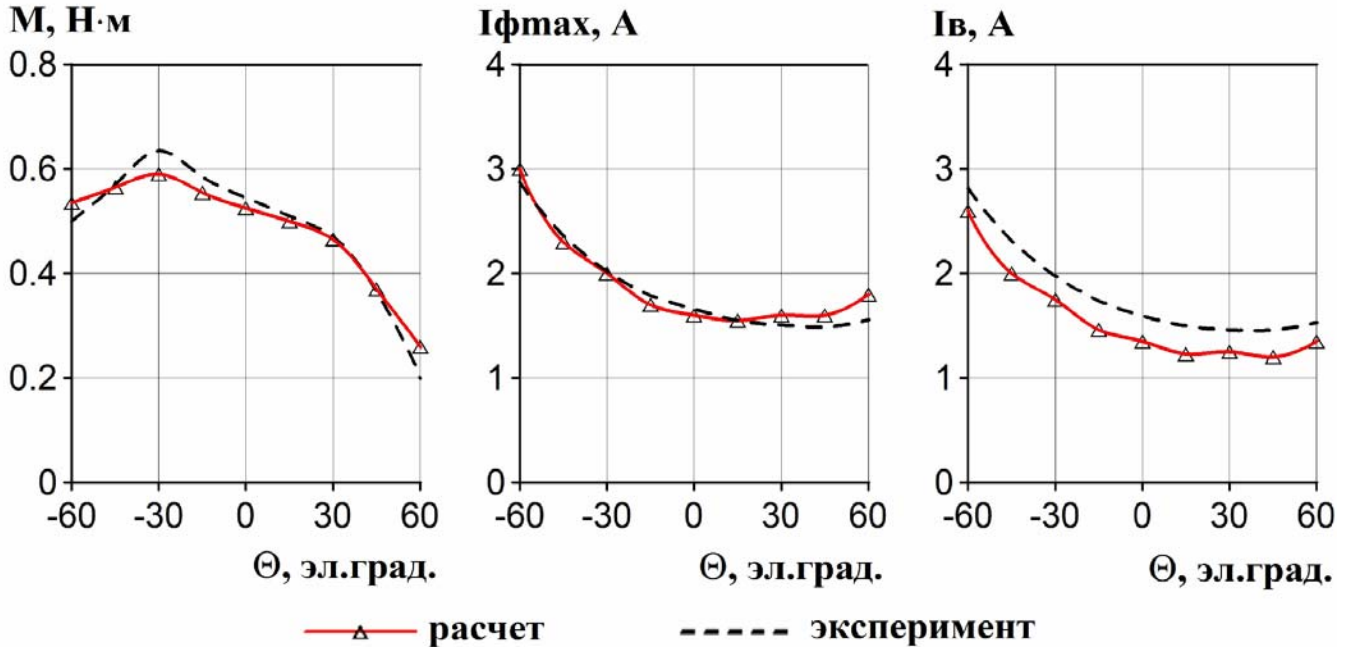


Рис. 12 Зависимости вращающего момента на валу ($M_{\text{в}}$), максимального значения тока в фазе ($I_{\phi\text{max}}$) и тока возбуждения ($I_{\text{в}}$) от начального угла включения фазы при $U_n=27\text{В}$, $n=250$ об/мин

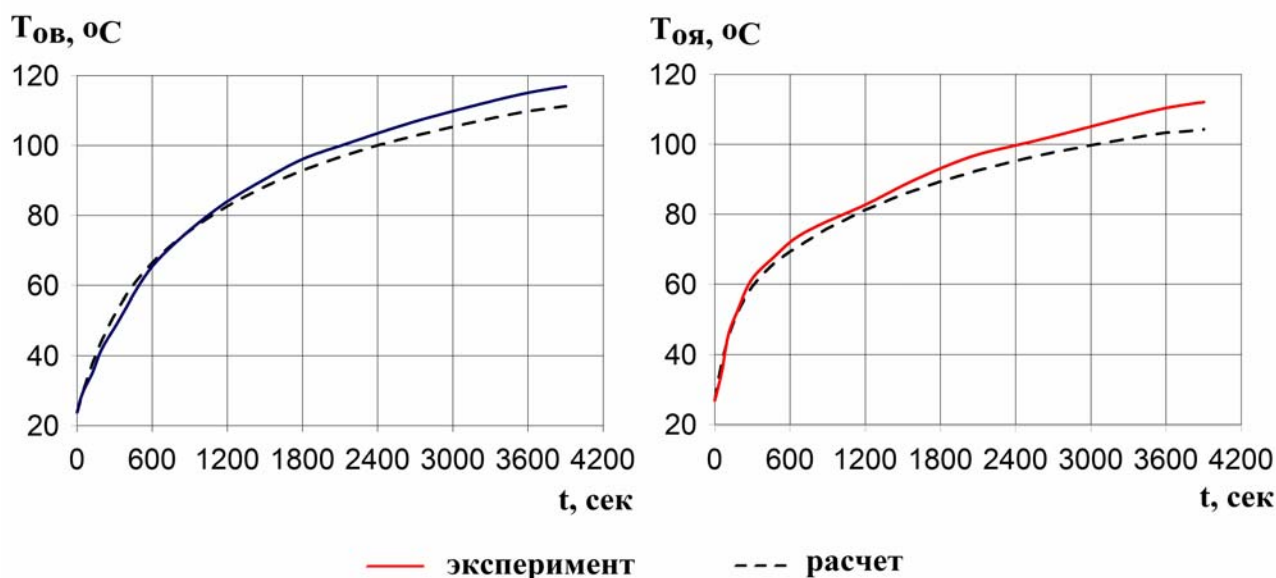


Рис. 13 Экспериментальная и расчетная зависимости температуры ОЯ ($T_{оя}$) и ОВ ($T_{об}$) от времени (t)

В заключении обобщены основные результаты и выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ и систематизация сведений по различным вопросам теории и практики разработки и применения ДВИ, показавшие, что ДВИ с последовательной ОВ перспективен для использования в тяговом электроприводе как альтернатива электродвигателю постоянного тока.

2. Показано, что метод математического моделирования на базе эквивалентных схем замещения в анализе электромагнитных процессов в ДВИ не уступает по точности результатам полевым методам и более экономичен в использовании машинного времени.

3. Разработана математическая модель электромагнитных процессов в ДВИ с последовательной обмоткой возбуждения, позволяющая адекватно исследовать процессы, протекающие в машине. Полученная точность в оценке магнитных систем ДВИ различного назначения и мощности не превышала 10-12 %.

4. С использованием цепных схем замещения и сосредоточенных источников тепла разработана математическая модель тепловых процессов в ДВИ с электромагнитным возбуждением. Модель позволяет оценить динамику процесса нагрева и охлаждения элементов конструкции электродвигателя, а также определить рациональное значение требуемой производительности системы охлаждения в соответствии с заданными режимами работы.

5. Разработанные математические модели реализованы в виде программ для персонального компьютера на языке программирования FORTRAN. При приемлемых затратах машинного времени и объема памяти машины модели позволяют исследовать протекающие в ДВИ процессы и рассчитывать его характеристики.

6. Произведен расчет вентильных индукторных электродвигателей, предназначенных для работы в составе привода электротележки, троллейбуса и привода сетевого насоса тепловой станции, отличающихся величиной и соотношением потерь, а также имеющих различные системы охлаждения. Для перечисленных электродвигателей на основе вычислительного эксперимента выявлен характер влияния различных параметров на выходные показатели ДВИ и показана принципиальная возможность выбора с помощью разработанных математических моделей рациональных законов регулирования ДВИ и оптимальной структуры системы охлаждения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Русаков А.М., Шатова И.В. Моделирование тепловых процессов в вентильном индукторном двигателе с электромагнитным возбуждением // Электричество.- 2007.- №4.- С. 42-49.**

2. **Русаков А.М., Окунеева Н.А., Соломин А.Н., Шатова И.В. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильных двигателях // Вестник МЭИ.- 2007.- №.3- С. 33-39.**

3. Шатова И.В. (Капкова И.В.) Результаты моделирования электромагнитных процессов в индукторном вентильном двигателе с последовательным возбуждением // Одиннадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл.- М., 2005.- С. 84-85.

4. Шатова И.В. Результаты исследования вентильных индукторных электродвигателей с последовательной обмоткой возбуждения // Двенадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл.- М., 2006.- С. 90-91.

5. Шатова И.В. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильных индукторных двигателях с последовательным возбуждением // Тринадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл.- М., 2007.- С. 89-90.