

На правах рукописи

ЛАЗАРЕВ Александр Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПУСКА
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Специальность 05.09.03. – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново-2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Казаков Юрий Борисович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Голубев Александр Николаевич

- кандидат технических наук
Карандашев Андрей Платонович

Ведущая организация: - ОАО «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ), г. Владимир

Защита состоится 27 ноября 2009 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. Б, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещен на сайте www.ispu.ru

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.064.02.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.В. Тютиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Улучшение условий эксплуатации автомобилей может быть достигнуто совершенствованием электротехнических систем. Для пуска автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) применяют электростартерные системы пуска (ЭСП), содержащие аккумуляторную батарею, электромагнитное тяговое реле, стартер, реле блокировки, редукторы и другие элементы. ЭСП должна разогнать ДВС в динамическом режиме и вращать его в течение некоторого времени с пусковой частотой вращения, не ниже минимально требуемой. Допускается запуск ДВС за несколько попыток пуска, т.е. работа в повторно-кратковременном режиме. Ограниченная мощность аккумуляторной батареи требует быстрого и гарантированного запуска ДВС, т.е. ЭСП должны иметь высокие динамические показатели - малое время разгона ДВС и большую достигаемую пусковую частоту вращения. Для работы от аккумуляторной батареи в качестве стартеров в настоящее время применяют магнитоэлектрические электродвигатели постоянного тока с ферритовыми магнитами. Объем выпуска ЭСП значителен и определяется объемом выпуска автомобилей. Неисправности ЭСП автомобилей ВАЗ-2110 в гарантийный период достигают 18 % всех неисправностей. При работе ЭСП в динамических режимах возникают взаимосвязанные переходные процессы: электромагнитные переходные процессы в электрических и магнитных цепях, механический процесс разгона стартером ДВС, переходной тепловой процесс нагрева элементов ЭСП. В процессе пуска изменяются ток в ЭСП и реакция якоря в стартере, возникает нестационарное электромагнитное поле, наводятся вихревые токи в массивных проводящих элементах конструкции. Все это воздействует на магнитный поток магнитов. Результирующий поток определяет электромагнитный момент и динамические показатели ЭСП. Во время нестационарного теплового процесса могут изменяться параметры термочувствительных элементов ЭСП. Нагрев не должен превышать предельно допустимых температур. Запуск ДВС должен осуществляться в широком диапазоне температур. При снижении температуры запуск осложняется - мощность аккумуляторной батареи уменьшается, минимально требуемая пусковая частота вращения, вязкость моторного масла, момент сопротивления ДВС и время разгона возрастают, изменяются сопротивления элементов ЭСП.

Для совершенствования ЭСП с целью улучшения динамических показателей в пусковых режимах, особенно при низких температурах, перспективно применение в стартерах магнитов с возрастающим магнитным потоком при снижении температуры. При низких температурах пуска за счет увеличенного магнитного потока будет создаваться больший электромагнитный момент, что приведет к более быстрому разгону ДВС, большей пусковой частоте вращения, т.е. улучшению динамических свойств ЭСП и гарантированному запуску ДВС.

Разработкой специальных электротехнических систем занимались Бертинов А.И., Глебов И.А., Демирчян К.С., Иванов-Смоленский А.В., Нестерин В.А., Овчинников И.Е., Орлов И.Н., Шереметьевский Н.Н. и другие. В развитие ЭСП и методов расчета установившихся режимов работы большой вклад внесли Акимов С.В., Боровских Ю.И., Брусенцов М.В., Болотников И.Е., Казаков Ю.Б., Квайт С.М., Литвиненко В.В., Менделевич Я.А., Мишин Д.Д., Петленко Ю.И., Чижков Ю.П., Евсеев Е.В., Пятаков И.Л., Фесенко М.Н., Филатов Б.С., Ютт В.Е. и др. Однако разработка ЭСП на основе применения в стартерах магнитов с зависимыми от темпера-

туры магнитными свойствами, моделирование и исследование динамических режимов работы ЭСП при пуске, в старт-стоповом режиме, с учетом меняющихся параметров аккумуляторной батареи, стартера и других элементов ЭСП в процессе пуска к настоящему времени не выполнялись. Целесообразно компьютерное моделирование динамических режимов работы ЭСП с учетом влияния температуры на параметры пуска, использование численных моделей нестационарных электромагнитных и тепловых полей, организации взаимодействия систем расчета переходных электромеханических процессов и нестационарных физических полей.

Таким образом, совершенствование ЭСП путем применения элементов с термозависимыми свойствами, обеспечивающими сокращение времени разгона ДВС и повышенную пусковую частоту вращения при низких температурах, моделирование и исследование динамических режимов работы таких ЭСП с учетом изменения параметров в процессе пуска является актуальной проблемой.

Актуальность проблемы позволяет сформулировать **цель диссертации** - **улучшение динамических характеристик электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания на основе применения в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами.**

Поставленная цель требует решения следующих **основных задач**:

- Обосновать возможность улучшения динамических электромеханических характеристик электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания путем применения в стартерах магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами.

- Разработать усовершенствованную электростартерную систему с улучшенными динамическими характеристиками при низких температурах на основе применения в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами.

- Разработать методику расчета, математические модели и структурно-функциональные схемы имитационного моделирования динамических режимов работы электростартерной системы с учетом изменения параметров системы в процессе пуска при разных температурах.

- Исследовать электромеханические характеристики усовершенствованной электростартерной системы в динамических режимах работы, нагрев стартеров в процессе пуска двигателей внутреннего сгорания при разных условиях пуска.

- Разработать опытный образец и испытать усовершенствованную электростартерную систему пуска двигателей внутреннего сгорания.

Методы исследований. Для решения поставленных задач используются математические методы исследования переходных процессов, схемное структурно-функциональное моделирование, методы компьютерного имитационного моделирования систем, методы численного моделирования нестационарных физических полей, методы физического моделирования и натурного эксперимента.

Научная новизна:

- Разработана усовершенствованная электростартерная система пуска двигателя внутреннего сгорания, отличающаяся применением в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами, обладающая улучшенными динамическими электромеханическими характеристиками при низких температурах.

- Разработаны математические модели и структурно-функциональные схемы имитационного моделирования динамических режимов работы усовершенствованной электростартерной системы, отличающиеся использованием функциональных зависимостей изменения параметров системы в процессе пуска при разных температурах.

- Разработана итерационная методика взаимодействия системы моделирования переходных электромеханических процессов в электростартерной системе и системы моделирования нестационарных магнитных и тепловых полей в стартерах, возникающих при пуске.

- Выполнены исследования динамических электромеханических характеристик усовершенствованной электростартерной системы и нагрева стартеров при разных условиях пуска, отличающиеся учетом изменения параметров системы и тепловыделений в процессе пуска, что обеспечило повышение точности определения параметров и характеристик системы.

Практическая значимость:

- Разработанные математические модели и структурно-функциональные схемы имитационного моделирования позволяют проводить исследования характеристик электростартерных систем пуска двигателей внутреннего сгорания с учетом изменения параметров системы в процессе пуска при разных температурах, результатов расчетов нестационарных магнитных и тепловых полей в стартерах. Модели и схемы целесообразно использовать при разработке современных систем электростартерного пуска, в учебном процессе.

- Разработанная усовершенствованная электростартерная система пуска на основе применения в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами, с улучшенными динамическими электромеханическими характеристиками при низких температурах может быть применена в перспективных разработках автомобильного электрооборудования.

- Результаты исследования электромеханических характеристик электростартерных систем в динамических режимах работы при разных условиях пуска двигателей внутреннего сгорания позволяют выработать рекомендации по совершенствованию электростартерных систем и условиям их применения.

На защиту выносятся:

- Усовершенствованная электростартерная система пуска двигателя внутреннего сгорания на основе применения в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами, обладающая улучшенными динамическими электромеханическими характеристиками при низких температурах.

- Методика расчета, математические и структурно-функциональные модели имитационного моделирования динамических режимов работы усовершенствованной электростартерной системы с использованием функциональных зависимостей изменения параметров системы в процессе пуска при разных температурах.

- Результаты исследования динамических электромеханических характеристик усовершенствованной электростартерной системы и нагрева стартеров при разных условиях пуска, полученные с учетом изменения параметров системы и тепловыделений в процессе пуска, обеспечившим повышение точности определения параметров и характеристик системы.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, использованием со-

временных математических моделей и пакетов программ, принятием признанных допущений, подтверждением данными численного моделирования. Адекватность разработанных математических моделей подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных данных с экспериментальными результатами.

Результаты работы реализованы в виде рекомендаций при модернизации электростартерных систем пуска в ЗАО «Сызранская СТО», в виде экспертного заключения по определению работоспособности электростартерной системы по гражданскому делу № 2-68/07 Судебного участка № 3 Ленинского района г. Иваново, в учебном процессе в Сызранском филиале СамГТУ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, 2006 г.), Международных научно-технических конференциях "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XIII, XIV, XV Бенардосовские чтения, Иваново, 2006, 2007, 2009 г.г.), II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2007 г.), III Международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург, 2007 г.), Международном симпозиуме "Исследование проблем создания магнитных систем новых электрических машин и применения в них высокоэнергетических магнитотвердых материалов с целью совершенствования параметров и конструкций" (Суздаль, 2007 г.), научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Электромеханика» и «ЭНЕРГИЯ 2008» (Иваново, 2006, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 159 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, приложений, включает 78 рисунков и 7 таблиц, приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы работы, определены цель и задачи исследования, намечены методы их решения, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены результаты реализации работы, обоснована достоверность полученных результатов и выводов, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и публикациях по теме диссертации, описаны объем и структура диссертации.

В первой главе проведен анализ условий пуска ДВС и требований к ЭСП, рассмотрены методы моделирования динамических режимов и направления совершенствования ЭСП.

Структурная схема ЭСП представлена на рис. 1. Должна обеспечиваться минимальная пусковая частота



Рис. 1. Структурная схема ЭСП ДВС

вращения ДВС $n_{\text{ДВС мин}} > 40$ об/мин при разряженной до $\Delta C_p = 25\%$ аккумуляторной

батареи не более чем за $z_{II}=3$ попытки пуска с интервалами между ними 1 мин. Динамический процесс примерного разгона ДВС (1 стадия на рис. 2) длится до 1 сек., вращение с частотой $n > n_{ДВС}$ мин (2 стадия) - до $\tau_{II}=10$ сек., далее (3 стадия) - запуск ДВС. Запуск должен обеспечиваться при температурах $T = -30 \div +30$ °С.

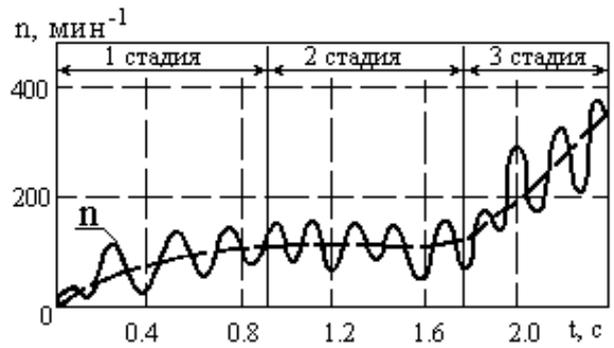


Рис. 2. Пример пуска ДВС с помощью ЭСП

Показано, что улучшение динамических электромеханических характеристик ЭСП за счет аккумуляторных батарей большей емкости и/или более мощных стартеров вызывает возрастание массы и/или стоимости системы. Пояснена возможность улучшения пусковых характеристик ЭСП при использовании стартеров с высокоэнергетическими магнитами NdFeB, у которых с понижением температуры T магнитные свойства возрастают. Достижимая частота вращения якоря стартера

$$n_{aT} = \frac{U_{ABxxT} - \Delta U_{щ}}{k_1 \Phi_T} - M_{ЭМ.T} \frac{\sum R_{ЭСП.T}}{k_1 k_2 \Phi_T^2},$$

электромагнитный момент $M_{ЭМ.T} = k_2 I_T \Phi_T$,

где U_{ABxxT} – напряжение батареи в режиме холостого хода; $\Delta U_{щ} = 2$ В - падение напряжения на щетках; k_1 и k_2 – конструктивные коэффициенты стартера; $\sum R_{ЭСП.T}$ – суммарное активное сопротивление цепи ЭСП; Φ_T – результирующий магнитный поток в стартере; I – ток ЭСП.

Очевидно, что если с понижением T возрастает Φ_T , то при значительных $M_{ЭМ.T}$ в режиме пуска при низких T , n_T может стать больше, чем в случае $\Phi_T \neq f(T)$, т.е. будут обеспечены условия для более гарантированного запуска ДВС. $M_{ЭМ.T}$ возрастает пропорционально Φ_T , что приведет к более быстрому разгону ДВС - к улучшению динамических свойств ЭСП. Так как магниты NdFeB имеют более сильные магнитные свойства, чем используемые в настоящее время ферритовые магниты, то их потребуется меньше и стартер будет иметь меньшие габариты.

Далее рассмотрены типы и свойства элементов ЭСП: аккумуляторных батарей, стартеров, ДВС. Показано, что их характеристики зависят от T , параметров пуска и изменяются в процессе самого пуска. При пуске I в ЭСП резко нарастает, достигает максимума, затем снижается до установившегося значения аperiодически. Φ_T определяется свойствами магнита и снижается с возрастанием T и реакции якоря, определяемой I . В процессе пуска Φ_T меняется сложным образом вследствие изменения I , потока якоря Φ_a , наводимых вихревых токов в сплошных проводящих элементах конструкции - корпусе, массиве постоянного магнита, ферромагнитных полюсных вставках. Отмечено, что моделирование динамических процессов ЭСП на основе стартеров с зависимыми от температуры магнитными свойствами магнитов ранее не выполнялось.

Ввиду сложности численного моделирования действия реакции якоря и вихревых токов на Φ_T в переходных режимах при нелинейной характеристике намагничивания ими зачастую пренебрегают или принимают существенные упрощения. Но даже такие упрощения разработаны только для двигателей с электромагнитным возбуждением и не подходят для магнитоэлектрических двигателей, так как: в стар-

терах с электромагнитным последовательным возбуждением с нарастанием тока Φ_T возрастает от нуля, тогда как в стартерах с постоянными магнитами Φ_T существует постоянно и с нарастанием тока при пуске будет снижаться; наводимые в процессе пуска вихревые токи в стартере с постоянными магнитами демпфируют изменение Φ_a и снижают размагничивающее действие реакции якоря, тогда как в стартерах с электромагнитным возбуждением демпфируются изменяющиеся магнитные потоки, как обмотки возбуждения, так и Φ_a ; в стартерах с постоянными магнитами из-за отсутствия последовательной обмотки возбуждения индуктивность L цепи ЭСП меньше, I будет нарастать интенсивнее, пусковой ток I_{Π} - больше, реакция якоря и наведенные вихревые токи - сильнее воздействовать на Φ_T , $M_{ЭМ}$, n_T и время запуска.

Отмечено, что изменение магнитных свойств магнитов NdFeB с изменением T и температурное ограничение работы для них до 155°C требуют корректного взаимосвязанного термомагнитного анализа состояния этих магнитов в переходных процессах и аварийных режимах. Сделан вывод, что корректное моделирование пусковых режимов ЭСП возможно на основе взаимодействия систем моделирования переходных процессов и систем моделирования нестационарных электромагнитных и тепловых полей.

Во второй главе разработаны модели и структурно-функциональные схемы имитационного моделирования динамических режимов ЭСП с учетом зависимостей переменных ЭСП от T , I , dI/dt , свойств магнита, n_T и условий пуска.

Математическая модель ЭСП представлена в виде системы (1). Здесь $e_a = k_1 n_a \Phi$ - ЭДС вращения; J - момент инерции системы «стартер - ДВС»;

$$M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мех}}(\omega) + \Delta P_{\text{маг}}(\Phi, \omega)}{\omega}$$

стартера, определяемый механическими потерями и потерями в стали, ω - угловая частота вращения.

Проанализировано изменение характеристик аккумуляторных батарей, стартеров и ДВС с изменением T и параметров пуска.

С повышением T сопротивление обмотки якоря возрастает

$$R_{aT} = \frac{L_{\text{оя}}(1 + 0,004(T_a - 20))}{57 \cdot 10^{-6} 4a^2 S_a},$$

где $L_{\text{оя}}$, S_a , a - длина и сечение провода, число параллельных ветвей обмотки якоря.

Напряжение $U_{\text{АБХХТ}}$ и ток КЗ батареи возрастают с повышением T :

$$U_{\text{АБХХТ}} = k(2,02 + 0,00136T_{\text{АБ}} - 0,001\Delta C_p),$$

$$I_{\text{кз}} = k(I_{+0} + k_b T_{\text{АБ}} - k_c \Delta C_p - k_d(z_{\Pi} - 1) - k_e(\tau_{\Pi} - 10)(z_{\Pi} - 1)).$$

Здесь: k - число пластин батареи; I_{+0} - ток КЗ, приходящийся на одну пластину при $z_{\Pi}=1$ и $T=0^{\circ}\text{C}$; k_b , k_c , k_d , k_e - коэффициенты, учитывающие влияние T , ΔC_p , τ_{Π} , z_{Π} .

В целом сопротивление батареи $R_{\text{АБТ}} = U_{\text{АБХХТ}}/I_{\text{кз}}$ с повышением T снижается, а напряжение, выдаваемое батареей в ЭСП возрастает $U_{\text{АБТ}} = U_{\text{АБХХТ}} - IR_{\text{АБТ}}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{АБ}} = L \frac{dI}{dt} + IR_a + e_a + \Delta U_{\text{ш}}; \\ U_{\text{АБ}} = f(U_{\text{АБХХТ}}, I, R_{\text{АБ}}, T_{\text{АБ}}); \\ L = f(I); \\ R_a = f(T_a); \\ e_a = f(\omega, \Phi); \\ \Phi = f(I, \frac{dI}{dt}, T_{\text{ПМ}}); \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ЭМ}} - M_0 - M_{\text{ДВС}}; \\ M_{\text{ЭМ}} = f(I, \Phi); \\ M_0 = f(\omega, \Phi); \\ M_{\text{ДВС}} = f(\omega, T_{\text{ДВС}}). \end{array} \right. \quad (1)$$

Характеристики батареи 6СТ-55М представлены на рис. 3.

Пусковой ток ЭСП

$$I_{ПТ} = (U_{АБХХТ} - \Delta U_{Щ}) / \sum R_{ЭСПТ}$$

с понижением T снижается. Так при $T=+25^{\circ}\text{C}$ в ЭСП, содержащей аккумуляторную батарею 6СТ-55М и стартер 5702.3708, $R_{a+25}=3,33 \cdot 10^{-3}$ и $R_{АБ+25}=10,9 \cdot 10^{-3}$ Ом, $\sum R_{ЭСП+25}=0,01422$ Ом, что соответствует $I_{ПТ+25}=702$ А. При $T=-30^{\circ}\text{C}$ $R_{АБ}$ возрастает, а R_a уменьшается, $\sum R_{ЭСП-30}=0,03306$ Ом и $I_{ПТ-30}=303$ А.

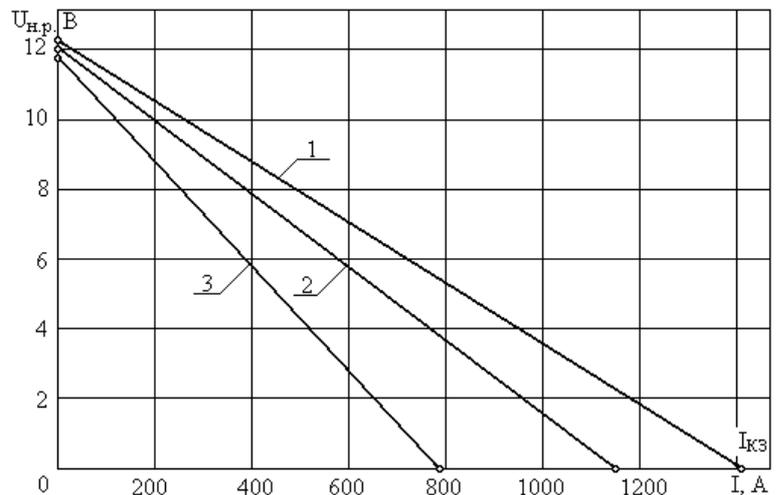


Рис. 3. Характеристики батареи 6СТ-55М:

1 – $z_{П}=1$, $T=+25^{\circ}\text{C}$, $\Delta C_p=0\%$; 2 – $z_{П}=3$, $T=0^{\circ}\text{C}$, $\Delta C_p=25\%$;
3 – $z_{П}=3$, $T=-20^{\circ}\text{C}$, $\Delta C_p=25\%$

Индуктивность обмотки якоря L_a с увеличением I снижается $L_a = \frac{0.6U_H I_{П} - 0.2I}{pI_H \omega_H I_{П}}$.

Для стартера 5702.3708 при номинальном токе $I_H=286$ А, соответствующем $0.42I_{П}$, $L_a=0,0164$ мГн. Общая индуктивность цепи ЭСП, включающая индуктивность аккумуляторной батареи 6СТ-55М, обмотки якоря стартера, втягивающего реле и коммутационной аппаратуры принята $0,04$ мГн.

Момент сопротивления ДВС $M_{ДВС}$ возрастает с повышением $n_{ДВС}$, вязкости моторного масла ν и объема цилиндров $V_{Ц}$, для двигателя ВАЗ 2110 $V_{Ц}=1500 \cdot 10^{-6}$ м³,

$$M_{ДВС} = (390 + 3.12n_{ДВС})\sqrt{\nu V_{Ц}}.$$

С повышением T существенно снижается ν . Так для масла 15W-30 при $T=-18^{\circ}\text{C}$ $\nu_{-18}=6000$ мм²/с, при $T=+100^{\circ}\text{C}$ $\nu_{+100}=10$ мм²/с. При $T < 0^{\circ}\text{C}$ для ν подобран полином

$$\nu(T_{ДВС}) = -1.3349T_{ДВС}^3 - 16.308T_{ДВС}^2 - 129.214T_{ДВС} + 1172.656.$$

$$\text{При } T > 0^{\circ}\text{C} \quad \nu(T_{ДВС}) = -11.62656T_{ДВС} + 1172.656.$$

Частота вращения якоря стартера $n_a=n_T i_1$, частота вращения вала ДВС $n_{ДВС}=n_T/i_2$, где i_1 и i_2 - передаточные числа планетарного редуктора и редуктора между шестерней выходного вала стартера и шестерней маховика коленчатого вала ДВС. $M_{ДВС}$ приводится к валу якоря стартера $M'_{ДВС}=M_{ДВС}/(i_1 i_2 \eta_1 \eta_2 \eta_3)$, где $\eta_1=0,96$ и $\eta_2=0,98$ - КПД планетарной и зубчатой передач, $\eta_3=0,99$ - КПД подшипников.

Потери на трение в подшипниках приняты как $\Delta P_{ПОД}=0,03P_{ЭМ \text{ МАХ}}n_{ам}/n_a$, где $P_{ЭМ \text{ МАХ}}$ - максимальная электромагнитная мощность; $n_{ам}$ - частота вращения якоря при $P_{ЭМ \text{ МАХ}}$. Потери на трение в щетках определялись как $\Delta P_{Щ}=k_{ТР}F_{Щ}N_{Щ}v_{КОЛ}$, где $k_{ТР}$ - коэффициент трения; $F_{Щ}$ - сила давления на щетку; $v_{КОЛ}$ - линейная скорость коллектора; $N_{Щ}=4$ - число щеток.

Магнитные потери в зубцах и якоре определялись как

$$\Delta P_z = 2B_{z1/3}^2 M_z (0.044f + 2240\Delta^2 f^2); \quad \Delta P_y = 2B_y^2 M_y (0.044f + 2240\Delta^2 f^2),$$

где M_z , M_y , - массы зубцов и якоря; B - магнитная индукция в зубцах и якоре; $f = \rho n_a/60$ - частота перемагничивания стали; Δ - толщина листа стали якоря.

$$\text{Таким образом, } M_0 = 9.55 \frac{\Delta P_{ПОД} + \Delta P_{Щ} + \Delta P_z + \Delta P_y}{n_a}.$$

У ферритовых магнитов с изменением T магнитные свойства не меняются. Магнитные свойства магнита NdFeB изменяются: для остаточной индукции с интенсивностью до $\beta_B = -0.12 \text{ \%} / ^\circ\text{C}$; для коэрцитивной силы - до $\beta_H = -0.6 \text{ \%} / ^\circ\text{C}$, т.е.

$$B_{rT} = B_{r20}[1 + \beta_B(T - 20)], \quad H_{cBT} = H_{cB20}[1 + \beta_H(T - 20)].$$

На основе математической модели (1) и приведенных соотношений разработана система имитационного моделирования динамических режимов ЭСП на базе стартеров с зависимыми от T магнитными свойствами, структура моделей которой и их взаимосвязи приведены на рис. 4.

На рис. 5 представлена основная структурно-функциональная схема имитационного моделирования динамических режимов ЭСП. Далее приведены некоторые структурно-функциональные схемы имитационного моделирования элементов ЭСП: на рис. 6 - схема задания условий и параметров пуска и аккумуляторной батареи; на рис. 7 - схема имитационного моделирования момента сопротивления нагрузки; на рис. 8 - схема имитационного моделирования активного сопротивления цепи ЭСП; на рис. 9 - схема задания магнитного потока Φ при разных T .

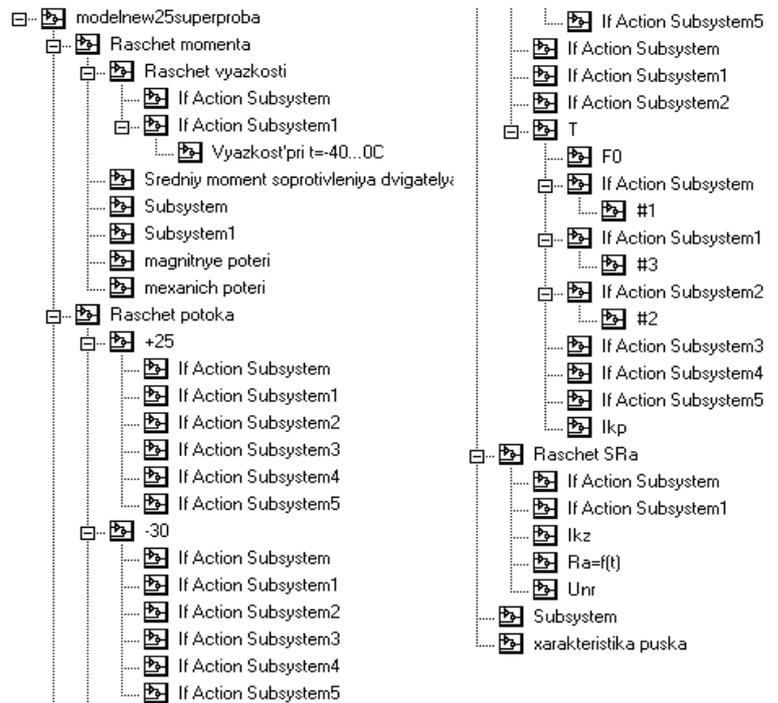


Рис. 4. Структура моделей в системе имитационного моделирования динамических режимов работы ЭСП

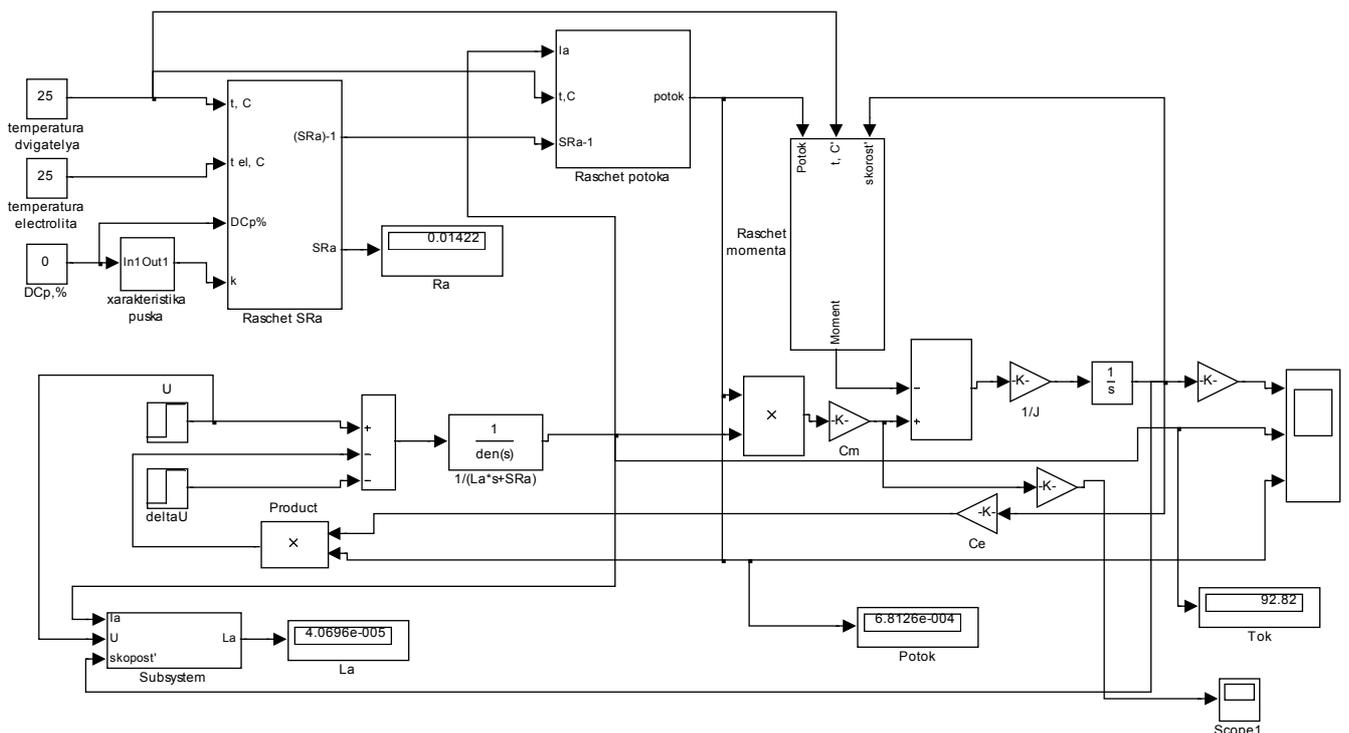


Рис. 5. Главное окно структурно-функциональной схемы имитационного моделирования ЭСП. Обозначение блока в структуре схемы “Modelnew25superproba”

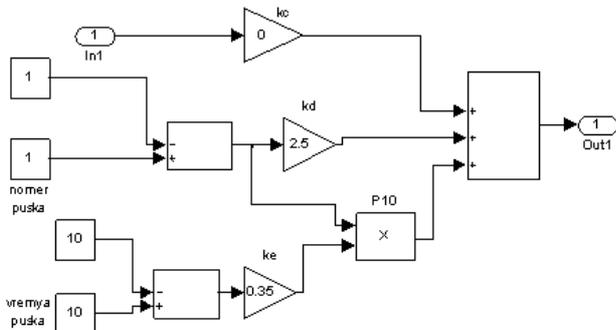


Рис. 6. Функциональная схема задания параметров пуска и аккумуляторной батареи (обозначение “характеристика пaska”)

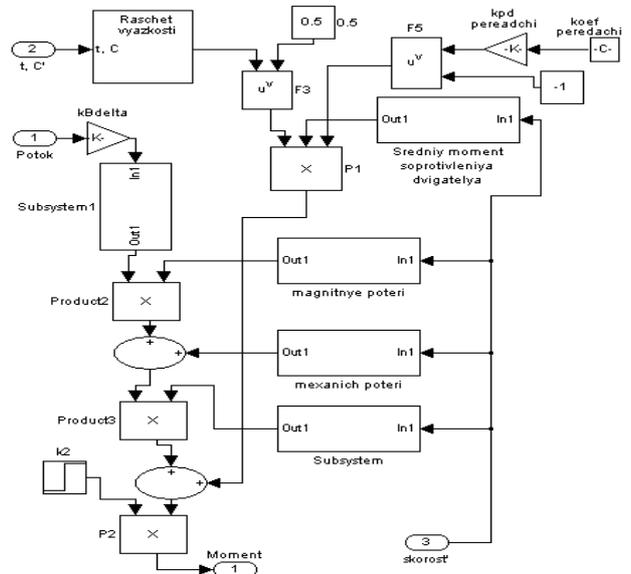


Рис. 7. Функциональная схема моделирования момента сопротивления (обозначение “Raschet momenta”)

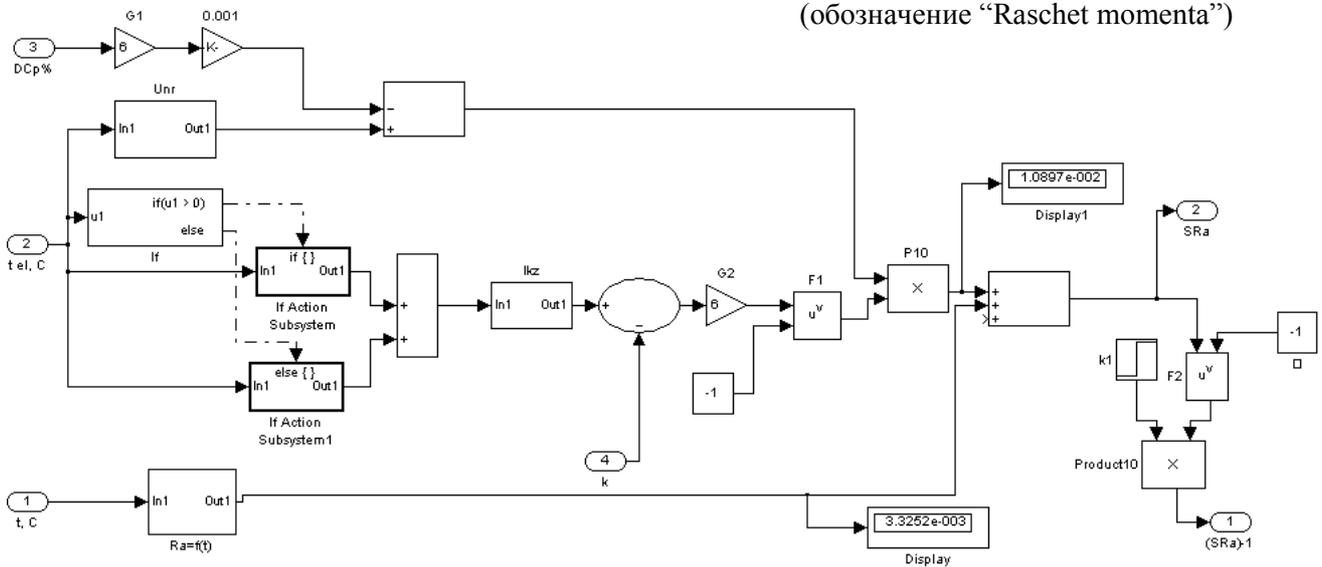


Рис. 8. Функциональная схема расчета сопротивления ЭПС (обозначение “Raschet SRa”)

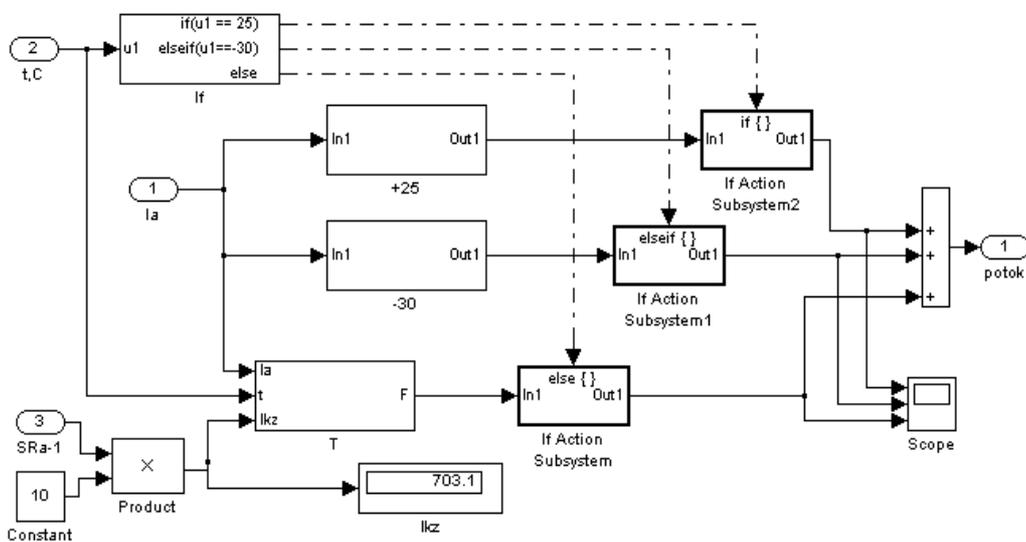


Рис. 9. Функциональная схема задания Φ при разных T (обозначение “Raschet potoka”)

В третьей главе разработана усовершенствованная ЭСП, осуществлено численное моделирование нестационарных магнитных и тепловых полей, предложена процедура итерационного взаимодействия системы моделирования физических полей и системы моделирования переходных процессов в ЭСП, исследовано изменение в процессе пуска магнитных потоков при разных температурах.

Так как магниты NdFeB имеют магнитные свойства при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 15 раз выше, чем ферритовые магниты 28CA250, то объем магнитов NdFeB требуется пропорционально меньший. В усовершенствованной ЭСП рассмотрен модернизированный стартёр 5702.3708, в котором ферритовые магниты толщиной 9 мм заменены на магниты NdFeB толщиной 0.6-0.8 мм. Размеры магнитов NdFeB подобраны такими, при которых Φ при $T=+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ такой же, как и с ферритовыми магнитами. При модернизации стартёра число полюсов, якорь, диаметр и толщина корпуса не менялись. Магниты NdFeB дороже ферритовых, но правильно разработанный стартёр с магнитами NdFeB будет стоить не дороже, чем стартёр с ферритовыми магнитами.

Рассмотрены алгоритмы конечно-элементного моделирования нестационарных физических полей. Решением является пространственно-временная функция, получаемая для ряда моментов времени. Для нестационарного плоскопараллельного магнитного поля в момент t относительно z -й составляющей векторного магнитного потенциала A минимизировался энергетический функционал

$$Q_{M,t} = \iint_{xy} \left[\frac{1}{2} \left\{ v_{x,t} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)_t^2 + v_{y,t} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_t^2 \right\} + \gamma_t \left(A \frac{\partial A}{\partial t} \right)_t - \gamma_t \left(A \frac{1}{S_{np}} \int_{s_{np}} \frac{\partial A}{\partial t} ds \right)_t - \left(M_x \frac{\partial A}{\partial x} - M_y \frac{\partial A}{\partial y} \right)_t - j_{ct} A_t \right] dx dy,$$

где M_x и M_y - намагниченности магнитов по осям x, y ; j_{ct} - плотность изменяющегося во времени тока ЭСП; v и γ - удельные магнитная анизотропная проводимость материала и электрическая проводимость по оси z ; S_{np} - сечение проводящего элемента.

Для нестационарного плоскопараллельного теплового поля с учетом границ теплоотдачи минимизировался функционал

$$Q_{T,t} = \frac{1}{2} \iint_{xy} \left[\lambda_{x,t} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_t^2 + \lambda_{y,t} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_t^2 - 2P_t T_t + C_t \frac{\partial T_t^2}{\partial t} \right] dx dy + \int_G \left(\frac{1}{2} \alpha_t T_t^2 - P_{G,t} T_t \right) dG.$$

Здесь: λ и α - коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи; C_T - теплоемкость; P и P_G - объемная и поверхностная плотности тепловыделений; G - граница теплообмена наружной поверхности стартёра с окружающей средой.

Принято, что M распределена по объему магнита и является функцией магнитной индукции B ; магнитная проницаемость магнитов $\mu=1/v \approx \mu_0$; рабочее состояние элементов магнита определяется кривой возврата; применены симплекс-элементы, в пределах которых μ , j_{ct} , M и B не зависят от координат; свойства сред - μ , j_{ct} , M , λ , α , C_T , P , P_G - являются переменными и зависящими от результатов расчетов полей. Так T влияет на магнитные свойства магнитов NdFeB и сопротивления элементов ЭСП, а удельные потери в стали являются функцией и B и T .

Разработаны конечно-элементные модели магнитных и тепловых полей стартёра, содержащие до 80 000 треугольных конечных элементов. Учтены нелинейности тепловыделений, магнитных и теплофизических характеристик, влияние на пазовые токи щеточного перекрытия и сдвига щеток и др.

Для достижения корректных результатов моделирования пусковых процессов в ЭСП реализована итерационная процедура взаимодействия системы моделирования динамических режимов и системы моделирования нестационарных физических по-

лей в стартере (рис. 10). Выполняется уточнение параметров в одной системе и задание их в качестве исходных данных в другую систему.

На первой итерации рассчитываются стационарные магнитные поля для ряда значений $I=0\div 703$ А при $T=+25^{\circ}\text{C}$ и $0\div 303$ А при $T=-30^{\circ}\text{C}$, определяются Φ_T с учетом насыщения стали и действия реакции якоря. В результате расчетов получены аппроксимирующие зависимости $\Phi=f(I, T)$ полиномы третьей степени:

$$\text{при } T=+25^{\circ}\text{C} \quad \Phi_{25}^{\text{Стат}}(I) = 1.205 \cdot 10^{-13} I^3 - 2.739 \cdot 10^{-10} I^2 - 4.378 \cdot 10^{-7} I + 7.214 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб};$$

$$\text{при } T=-30^{\circ}\text{C} \quad \Phi_{-30}^{\text{Стат}}(I) = -5.635 \cdot 10^{-14} I^3 - 1.185 \cdot 10^{-10} I^2 - 3.526 \cdot 10^{-7} I + 8.313 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}.$$

Полученные зависимости $\Phi_T^{\text{Стат}} = f(I)$ заданы в модель динамических режимов ЭСП, из расчета которой получены зависимости $I=f(t, T)$ в виде экспонент (рис. 11):

$$I_{25}(t) = 93.35 + 609.8e^{-12t} \text{ при } T=+25^{\circ}\text{C};$$

$$I_{-30}(t) = 233.6 + 68.9e^{-8t} \text{ при } T=-30^{\circ}\text{C}.$$

Далее зависимости $I=f(t, T)$ заданы в модель расчета нестационарных магнитных полей при $\gamma_{+25}=4 \cdot 10^6$ и $\gamma_{-30}=5 \cdot 10^6$ См/м. Результаты второй итерации расчетов магнитных полей – аппроксимирующие полиномы:

$$\Phi_{25}^{\text{Нестат}}(I) = 5.236 \cdot 10^{-13} I^3 - 4.759 \cdot 10^{-10} I^2 - 3.394 \cdot 10^{-7} I + 7.165 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб};$$

$$\Phi_{-30}^{\text{Нестат}}(I) = -6.65 \cdot 10^{-13} I^3 + 5.889 \cdot 10^{-10} I^2 - 4.125 \cdot 10^{-7} I + 8.291 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}.$$

Зависимости $\Phi_T^{\text{Нестат}} = f(I, T)$ вновь заданы в модель динамических режимов ЭСП, из расчетов которой получены уточненные зависимости $I=f(t, T)$. Далее они аппроксимированы уже на двух временных участках. В первый временной период пуска I нарастает, на втором - экспоненциально снижается. На первом участке при $0 < t < t_{\text{КЗ}}$ принята зависимость $I'(t) = I_{\text{ПТ}} t / t_{\text{КЗ}}$, $t_{\text{КЗ}}$ – время достижения $I_{\text{ПТ}}$. Для второго участка на интервале времени $t > t_{\text{КЗ}}$ изменение I принято в виде $I''(t) = I_{\text{УСТ}} + I_{\text{св}} e^{-12(t-t_{\text{КЗ}})}$, где $I_{\text{УСТ}}$ - установившееся значение; $I_{\text{св}} = I_{\text{ПТ}} - I_{\text{УСТ}}$.

$$\text{Для } T=25^{\circ}\text{C} \quad t_{\text{КЗ}+25} = 0.0125 \text{ сек. и } I'_{25}(t) = 703t/0.0125, \quad I''_{25}(t) = 92.72 + 610.28 \cdot e^{-12(t-0.0125)}.$$

$$\text{Для } T=-30^{\circ}\text{C} \quad t_{\text{КЗ}-30} = 0.011 \text{ сек. и } I'_{-30}(t) = 303t/0.011, \quad I''_{-30}(t) = 230.2 + 72.8 \cdot e^{-12(t-0.011)}.$$

Из расчетов нестационарного магнитного поля с этими зависимостями $I=f(t, T)$ получены зависимости $\Phi=f(I)$, представленные на рис. 12. До пуска существует поток магнитов Φ_0 . В первые моменты пуска I резко увеличивается, Φ_a и реакция якоря возрастают, Φ будет снижаться. Одновременно динамическое нарастание в начале пуска Φ_a будет наводить в массивных частях магнитной системы вихревые токи,

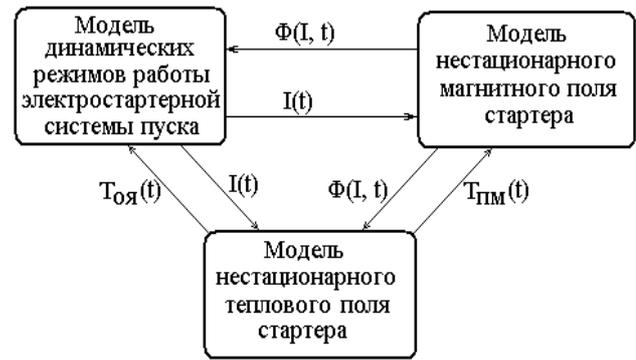


Рис. 10. Взаимодействие систем моделирования динамических режимов ЭСП и нестационарных физических полей

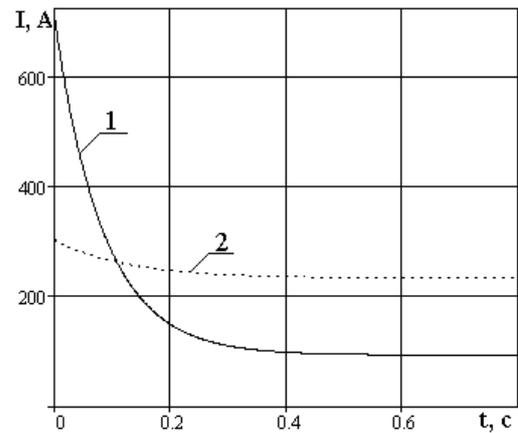


Рис. 11. Изменение I на первой итерации расчетов: 1 - $T=+25^{\circ}\text{C}$; 2 - $T=-30^{\circ}\text{C}$

пропорциональные $d\Phi_a/dt$ или dI/dt , которые будут демпфировать в некоторой степени нарастание Φ_a и снижать действие реакции якоря. В начале пуска dI/dt наибольшее, наведенные вихревые токи велики, демпфирование изменения Φ_a вихревыми токами максимальное, Φ снижается до величины $\Phi_{КЗ}$. По мере разгона ДВС dI/dt и, соответственно, демпфирование Φ_a вихревыми токами снижаются, но так как I еще значителен, то размагничивающее действие реакции якоря максимальное и Φ снижается далее - до $\Phi_{МИН}$. По мере дальнейшего разгона I в ЭСП и реакция якоря будут далее снижаться, Φ возрастать, в пределе до значения Φ_0 . Полученные изменения Φ разделены на три участка: первый участок $\Phi_0 - \Phi_{КЗ}$, где $dI/dt > 0$ и $d\Phi/dt < 0$; второй - $\Phi_{КЗ} - \Phi_{МИН}$, где $dI/dt < 0$ и $d\Phi/dt < 0$; третий - $\Phi_{МИН} - \Phi_0$, где $dI/dt < 0$ и $d\Phi/dt > 0$. Каждому участку подобран свой полином. Для $T = +25^\circ\text{C}$:

$$\Phi'_{25}(I) = 8.569 \cdot 10^{-14} I^3 - 2.621 \cdot 10^{-10} I^2 - 1.813 \cdot 10^{-7} I + 7.164 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб},$$

$$\Phi''_{25}(I) = 1.36 \cdot 10^{-8} I^2 - 1.671 \cdot 10^{-5} I + 5.589 \cdot 10^{-3}, \text{ Вб},$$

$$\Phi'''_{25}(I) = 5.282 \cdot 10^{-13} I^3 - 4.764 \cdot 10^{-10} I^2 - 3.389 \cdot 10^{-7} I + 7.164 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}.$$

Для магнитов NdFeB при $T = -30^\circ\text{C}$:

$$\Phi'_{-30}(I) = 1.68 \cdot 10^{-13} I^3 - 2.419 \cdot 10^{-10} I^2 - 7.815 \cdot 10^{-8} I + 8.291 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб},$$

$$\Phi''_{-30}(I) = 5.843 \cdot 10^{-8} I^2 - 3.211 \cdot 10^{-5} I + 5.167 \cdot 10^{-3}, \text{ Вб},$$

$$\Phi'''_{-30}(I) = -8.651 \cdot 10^{-10} I^2 - 4.147 \cdot 10^{-8} I + 8.291 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}.$$

Уточненные зависимости $\Phi = f(I, dI/dt, T)$ вновь задавались в модель динамических режимов ЭСП и вновь проводился ее расчет.

Зависимости $\Phi = f(t)$ при $T = 25^\circ\text{C}$ представлены на рис. 13, при $T = -30^\circ\text{C}$ для двух типов магнитов - на рис. 14. До пуска Φ определяется т. «А». В процессе быстрого нарастания I , Φ снижается до т. «В» - $\Phi_{КЗ}$. Далее демпфирование Φ_a снижается, Φ_a и реакция якоря возрастают, Φ снижается до т. «С» - $\Phi_{МИН}$. По мере дальнейшего разгона ДВС Φ переходит в номинальный режим в т. «D».

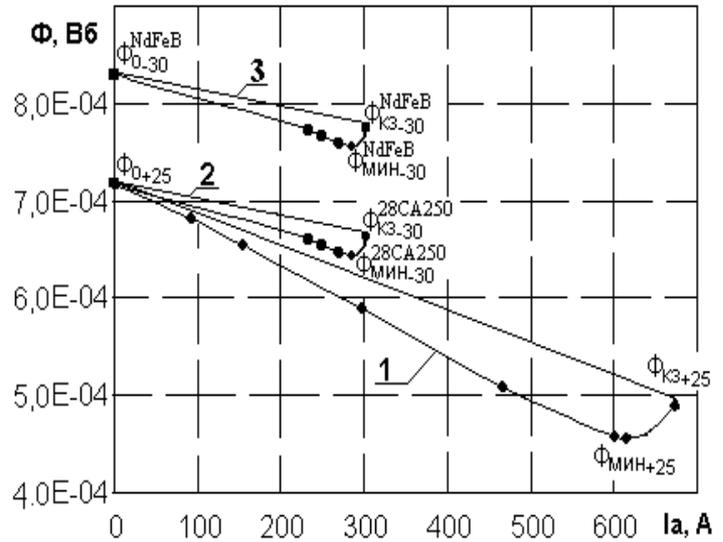


Рис. 12. Изменение Φ при пуске: 1 - $T = +25^\circ\text{C}$; 2 - $T = -30^\circ\text{C}$ для магнитов 28CA250; 3 - $T = -30^\circ\text{C}$ для магнитов NdFeB

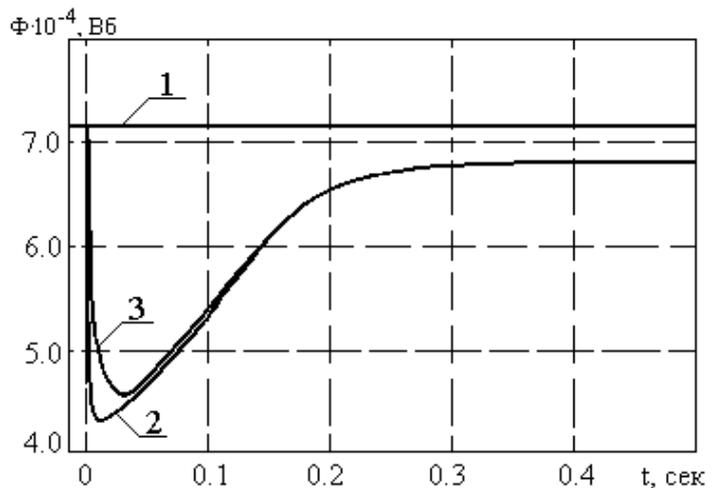


Рис. 13. Изменения Φ при пуске для $T = 25^\circ\text{C}$ (одинаковые для магнитов 28CA250 и NdFeB):

- 1 - без учета реакции якоря и вихревых токов;
- 2 - с учетом реакции якоря, без учета вихревых токов;
- 3 - с учетом реакции якоря и вихревых токов

Определено, что переходный процесс составляет 0,4-0,5 сек. Φ_{25} в первый момент пуска снижается с $7.2 \cdot 10^{-4}$ Вб при ХХ до $4.25 \cdot 10^{-4}$ Вб при $I_{П+25}$ – на 41 %. Φ_{30} снижается для ферритовых магнитов с $7.2 \cdot 10^{-4}$ Вб при ХХ до $6.38 \cdot 10^{-4}$ Вб при $I_{П-30}$ – на 11.3 %, для магнитов NdFeB Φ_{30} снижается с $8.3 \cdot 10^{-4}$ Вб при ХХ до $7.4 \cdot 10^{-4}$ Вб при $I_{П-30}$ – на 10.8 %. При $T = -30$ °С в первый момент пуска магниты NdFeB обеспечивают Φ на 15.6 % больший, чем ферритовые магниты. Показано, что наводимые изменяющимся в процессе пуска Φ_a

вихревые токи до 15 % демпфируют его действие. Для стартера с ферритовыми магнитами $\Phi_{УСТ+25} > \Phi_{УСТ-30}$ 28СА250. Для магнитов NdFeB наоборот - $\Phi_{УСТ+25} < \Phi_{УСТ-30}$ NdFeB. Так как $M_{ДВС+25} < M_{ДВС-30}$, то по окончании пуска $I_{УСТ+25} < I_{УСТ-30}$.

Формирование полиномиальных зависимостей $\Phi = f(I)$ для других T , требует выполнения новых трудоемких расчетов нестационарных магнитных полей, итерационных процедур уточнения модели ЭСП. Для исследования ЭСП при T , отличных от +25 или -30 °С, разработана модель $\Phi = f(I, T)$ на основе линейной интерполяции уже имеющихся результатов расчетов зависимостей $\Phi = f(I)$ для $T = +25$ °С и $T = -30$ °С.

В четвертой главе исследованы динамические режимы усовершенствованной ЭСП при разных T , проведен анализ изменения теплового состояния стартеров при пуске ДВС, осуществлена опытная проверка свойств усовершенствованной ЭСП.

Изменения I в процессе пуска ДВС для $T = +25$ и -30 °С представлены на рис. 15, а и 16, а. Неучет реакции якоря и вихревых токов дает ускоренное снижение I и быстрое окончание переходного процесса. Снижение I для ЭСП с магнитами NdFeB при $T = -30$ °С происходит интенсивнее и приводит к $I_{УСТ-30} 28СА250 > I_{УСТ-30} NdFeB$, что является положительным явлением. Изменения при пуске $M_{ЭМ}$ представлены на рис. 15, б и 16, б. Увеличение L в цепи ЭСП снижает $I_{МАХ}$ и $M_{МАХ}$. Неучет реакции якоря и вихревых токов завышает $M_{МАХ}$ до 36 %, дает ускоренное снижение $M_{ЭМ}$ и меньшие значения $M_{УСТ}$. С понижением T снижается $M_{МАХ}$ и возрастает $M_{УСТ}$. Для магнитов NdFeB при $T = -30$ °С, по сравнению с магнитами 28СА250, $M_{МАХ-30}$ возрастает на 14.7 %, а и пусковой момент $M_{П-30}$ (в режиме КЗ) - на 15.3 %. Изменения n в процессе пуска представлены на рис. 15, в и 16, в. При неучете реакции якоря и вихревых токов скорость нарастания n наибольшая, ДВС быстрее достигает $n_{УСТ}$, но сама $n_{УСТ}$ наименьшая. С понижением T скорость нарастания n и $n_{УСТ}$ снижаются. При $T = -30$ °С $n_{УСТ-30}$ в ЭСП с магнитами NdFeB, по сравнению с магнитами 28СА250, на 34 % больше (550 и 410 об/мин, соответственно $n_{ДВС} = 30$ и 40 об/мин), что обеспечивает более надежный запуск ДВС усовершенствованной ЭСП. Достигается снижение минимальной температуры пуска. ЭСП с магнитами 28СА250 осуществляет разгон до 410 об/мин за ~ 0.4 сек, а с магнитами NdFeB до той же скорости за ~ 0.13 сек., т.е с более высокими динамическими показателями. Изменения $n_{УСТ}$ и $M_{П}$ с изменением T представлены на рис. 17, а, б.

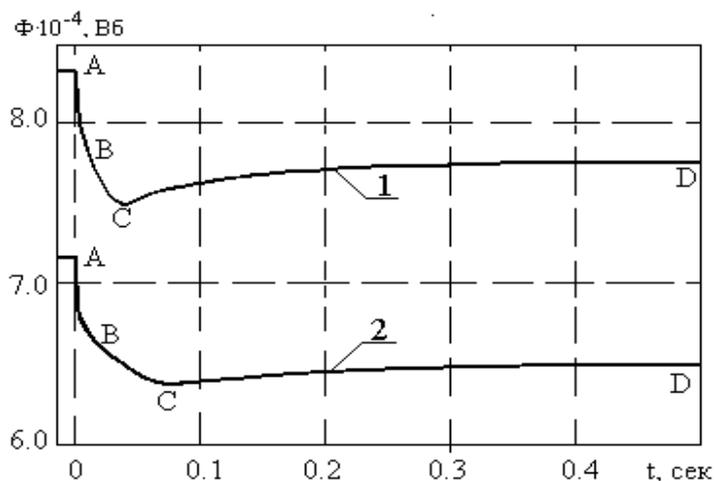
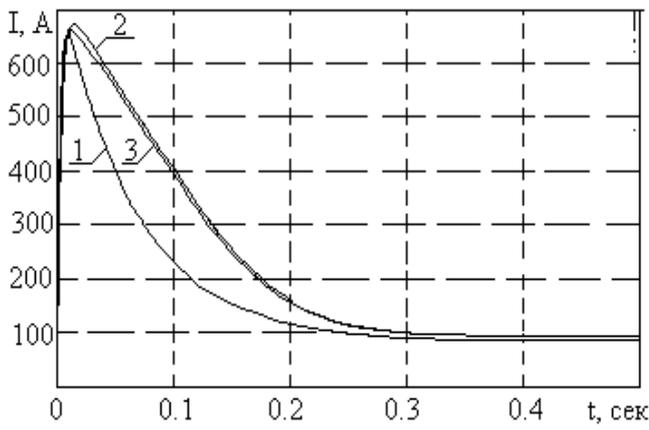
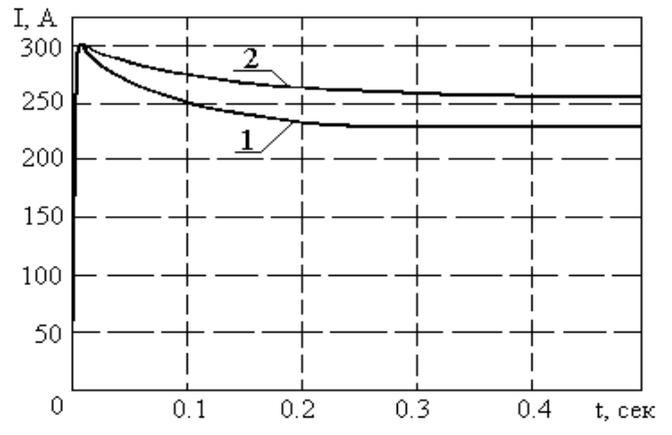


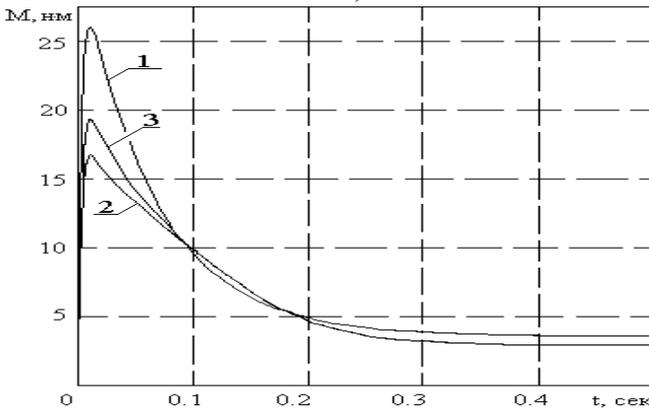
Рис. 14. Изменение Φ при пуске ДВС с учетом реакции якоря и вихревых токов для $T = -30$ °С:
1 - с магнитами NdFeB; 2 - с магнитами 28СА250



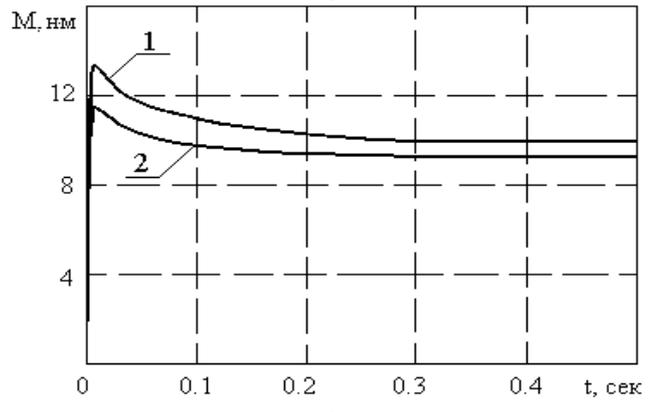
а)



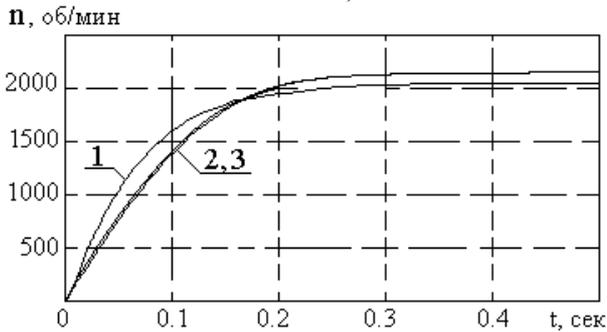
а)



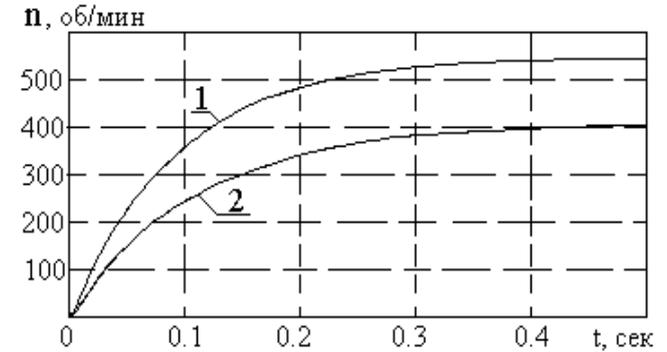
б)



б)



в)

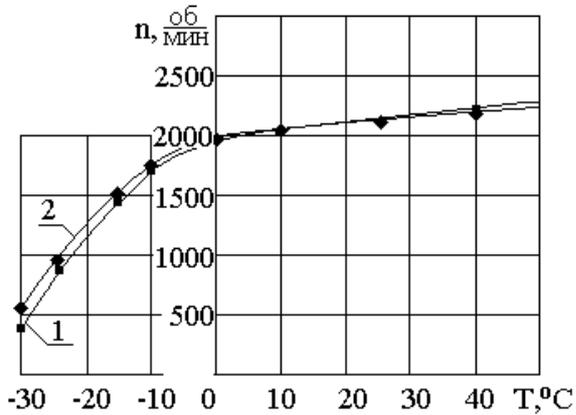


в)

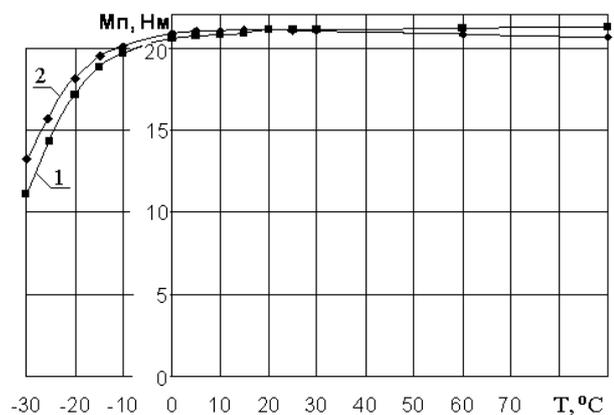
Рис. 15. Изменения I (а), $M_{ЭМ}$ (б), n (в) для $T=25^{\circ}\text{C}$ (одинаковые для магнитов 28СА250 и NdFeB):

- 1-без учета реакции якоря и вихревых токов;
- 2-с учетом реакции якоря, без учета вихревых токов;
- 3-с учетом реакции якоря и вихревых токов

Рис. 16. Изменения I (а), $M_{ЭМ}$ (б), n (в) с учетом реакции якоря и вихревых токов для $T=-30^{\circ}\text{C}$: 1-с магнитами NdFeB; 2-с магнитами 28СА250



а)



б)

Рис.17. Изменение $n_{пуст}$ (а) и $M_{П}$ (б) с изменением T : 1 - с магнитами 28СА250; 2 - с магнитами NdFeB

Выполнены исследования нагрева стартера в старт-стоповом режиме при пуске ДВС. Временные изменения объемных тепловыделений в стали и обмотке стартера, вызываемые изменениями в процессе пуска I , n и Φ (рис. 12-15), аппроксимировались полиномиальными и экспоненциальными зависимостями и задавались в качестве исходных данных в систему расчетов нестационарных тепловых полей. Результаты расчетов в виде изменения T в стартере за три попытки пуска ДВС с $\tau_{II}=15$ сек. и интервалом между ними 1 мин. представлены на рис. 18. Перегрев обмотки якоря в конце третьей попытки пуска составляет менее 70°C , корпуса - 3°C , магнитов NdFeB - 4°C , что незначительно для учета изменения их магнитных свойств магнитов NdFeB в процессе пуска.

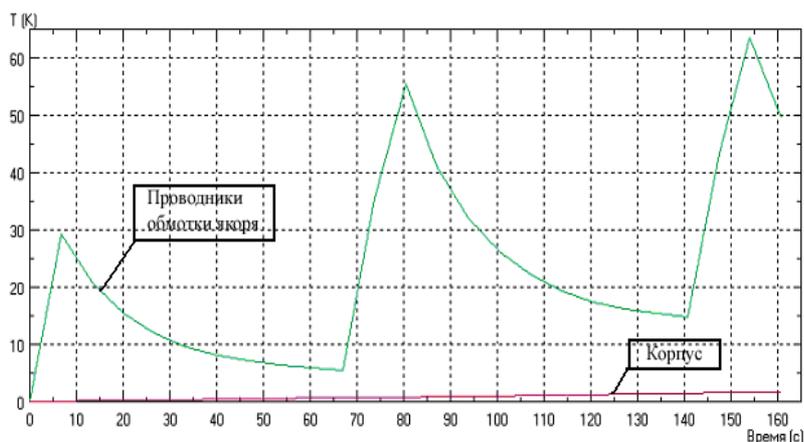


Рис. 18. Изменения превышения температур в стартере в старт-стоповом режиме за 3 попытки пуска

Оценено тепловое состояние стартера в аварийных режимах. Определено, что за время заторможенной попытки пуска – в режиме КЗ в течение 15 сек., T обмотки якоря достигнет 151°C , магнита – 5.2°C , сердечника якоря – 33°C . Исследовано тепловое состояние стартера при работе в недопустимых - продолжительных режимах с разными нагрузками и температурами пуска. Выявлено, что более всех элементов перегревается и прежде всего выйдет из строя обмотка якоря, но при этом T магнитов NdFeB не превзойдет 115°C . Коэффициент теплопроводности магнитов NdFeB выше, а толщина меньше, чем у ферритовых магнитов, поэтому тепловой режим стартеров с магнитами NdFeB менее напряженный. Т.о. магниты NdFeB даже при работе ЭСП в аварийных и недопустимых режимах не потеряют своих магнитных свойств и останутся в работоспособном состоянии.

Усовершенствованная ЭСП с применением в стартерах магнитов NdFeB была изготовлена и испытана. Испытания ЭСП в динамических режимах проводились с использованием компьютеризированного диагностического комплекса «Мотор-Тестер МТ10К» и блока автомобильной диагностики АМД-4А. На рис. 19 представлены в сравнении осциллограмма и расчетная зависимость $I=f(t)$ усовершенствованной ЭСП при пуске ДВС автомобиля LADA «Prioga» для $T=-15^\circ\text{C}$. Наблюдается удовлетворительное совпадение результатов.

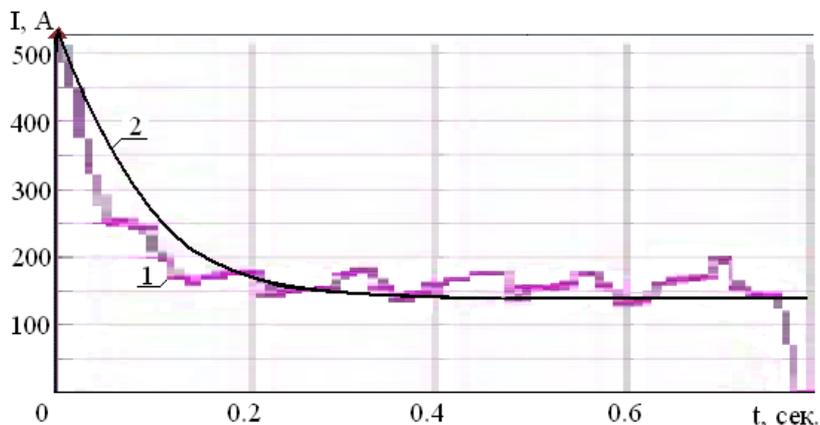


Рис. 19. Изменение тока в ЭСП при пуске ДВС: 1 - опыт; 2 - расчет

Экспериментальные температурные исследования M_{II} ЭСП проведены на стенде Э242. Графики изменения M_{II} с разными магнитами, в

сравнении с расчетным значениями для магнитов NdFeB, приведены на рис. 20. Результаты опытных данных подтверждают повышение M_{Π} усовершенствованной ЭСП при $I=702$ А на 28.78 % при понижении T на 103 °С, что соответствует расчетам. Максимальное расхождение данных опытов и расчетов M_{Π} ЭСП с магнитами NdFeB не превышает 10 %. В то же время опытная зависимость M_{Π} ЭСП с ферритовыми магнитами от температуры составляет всего 0.3 %/°С и укладывается в погрешность экспериментов.

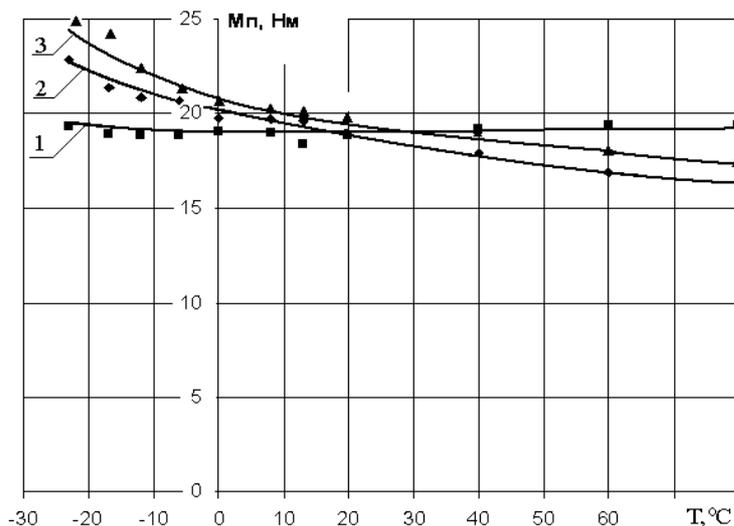


Рис. 20. Зависимость M_{Π} от T для $I=702$ А: 1 - с ферритовыми магнитами; 2 - с магнитами NdFeB (опыт); 3 - с магнитами NdFeB (расчет)

В заключении приводятся результаты и выводы по работе в целом.

В приложениях приводятся акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснована возможность улучшения динамических электромеханических характеристик электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания путем применения в стартерах магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами. При понижении температуры пуска, сопровождающемся понижением пускового тока и возрастанием момента сопротивления двигателя внутреннего сгорания, пусковая частота вращения может быть повышена за счет возрастающего магнитного потока.

2. Разработана усовершенствованная электростартерная система пуска двигателей внутреннего сгорания на основе применения в стартерах высокоэнергетических магнитов с зависимыми от температуры магнитными свойствами, обеспечивающая при температуре пуска -30 °С возрастание пусковой частоты вращения на 34 %, по сравнению с выпускаемой системой, что гарантирует надежный запуск двигателя внутреннего сгорания при низких температурах. Достигнуто уменьшение времени разгона двигателя внутреннего сгорания, снижение минимальной температуры пуска.

3. Разработаны математические модели и структурно-функциональные схемы имитационного моделирования динамических режимов работы усовершенствованной электростартерной системы с использованием функциональных зависимостей изменения параметров системы в процессе пуска при разных температурах.

4. Разработана итерационная методика взаимодействия системы моделирования переходных электро-механических процессов в электростартерной системе и системы моделирования нестационарных магнитных и тепловых полей в стартерах, возникающих при пуске.

5. Исследованы электро-механические характеристики усовершенствованной электростартерной системы в динамических режимах работы при разных условиях

пуска с учетом изменения параметров системы в процессе пуска, что позволило повысить точность определения параметров и характеристик системы на 15 %.

6. Исследован процесс нагрева стартеров в процессе пуска двигателей внутреннего сгорания в разных режимах с учетом изменения тепловыделений в процессе пуска. Установлено, что за время трех попыток пуска двигателя внутреннего сгорания и при работе в предельных режимах температура высокоэнергетических магнитов не превышает максимально допустимых значений, что позволяет гарантировать работоспособность усовершенствованной электростартерной системы в разных условиях работы. Температурный режим стартеров с высокоэнергетическими магнитами менее напряженный, чем стартеров с применяемыми в настоящее время ферритовыми магнитами.

7. Разработана и испытана опытная усовершенствованная электростартерная система пуска двигателей внутреннего сгорания. Результаты экспериментов подтверждают результаты расчетов и улучшение динамических электромеханических характеристик электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания при низких температурах.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК:

1. Лазарев А.А. Моделирование усовершенствованной электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания / Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Баранов М.Е. // Вестник ИГЭУ. – 2009. - № 3. – С. 8-11.

2. Лазарев А.А. Применение магнитов NdFeB в стартерах для повышения их пусковых свойств при низких температурах / Казаков Ю.Б., Гнутов С.К., Лазарев А.А., Лазарев А.Г. // Перспективные материалы. - 2008. № 3. - С. 292-296.

3. Лазарев А.А. Магнитоэлектрический стартерный электродвигатель с повышенными пусковыми свойствами при низких температурах / Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Гнутов С.К. // Вестник ИГЭУ. – 2008. - № 3. – С. 39-41.

4. Лазарев А.А. Характеристики стартерных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов / Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Гнутов С.К. // Вестник ИГЭУ. – 2006. - № 4. – С. 72-74.

Публикации в других изданиях:

5. Лазарев А.А. Анализ свойств усовершенствованной электростартерной системы пуска двигателя внутреннего сгорания / Казаков Ю.Б., Лазарев А.А. // "Состояние и перспективы развития электротехнологии": Материалы междунар. н.-т. конф. - Иваново, ИГЭУ, 2009, II том, с.50.

6. Лазарев А.А. Работа магнитоэлектрических стартерных электродвигателей в системе пуска при разных температурных условиях / Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Баранов М.Е. // «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы»: Труды III Междунар. научн.-техн. конференции. - Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007. – С. 48-52.

7. Лазарев А.А. Особенности применения высокоэнергетических магнитов NdFeB в стартерных электродвигателях / Лазарев А.А., Казаков Ю.Б. // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тез. докл. 12 Междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. - Москва, МЭИ, 2006. - Т. 2. - С. 15-16.

8. Лазарев А.А. Магнитоэлектрический стартерный электродвигатель / Трухачев А.А., Казаков Ю.Б., Лазарев А.А. // «Электромеханика»: Тезисы докл. научн.-техн. конф. студ. и аспирантов. – Иваново, ИГЭУ, 2006. – С.18-19.

9. А.А. Лазарев. Анализ тепловых режимов магнитоэлектрических стартерных электродвигателей / А.В. Пирогов, Ю.Б. Казаков, А.А. Лазарев. // «ЭНЕРГИЯ 2008»: Материалы региональной научн.-техн. конф. студ. и аспирантов. – Иваново, ИГЭУ, 2008. – Т. 2. – с.36-37.

10. Лазарев А.А. Сравнительный анализ стартерных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов / Ю.Б. Казаков, А.А. Лазарев, С.К. Гнутов // "Состояние и перспективы развития электротехнологии": Материалы междунар. н.-т. конф. - Иваново, ИГЭУ, 2006. - С. 210-212.

11. Лазарев А.А. Модернизация магнитоэлектрической системы возбуждения стартерных электродвигателей / Ю.Б. Казаков, С.К. Гнутов, А.А. Лазарев // Труды II Всеросс. научн.-техн. конф. с междунар. участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии». – Тольятти, ТГУ, 2007. – Т. 2. – С. 23-27.

12. Лазарев А.А. Опытная реконструкция индуктора магнитоэлектрического стартерного электродвигателя / Ю.Б. Казаков, А.А. Лазарев, С.К. Гнутов // "Состояние и перспективы развития электротехнологии": Материалы междунар. н.-т. конф. - Иваново, ИГЭУ, 2007. – Т. 2. - С. 76-77.

Личный вклад автора. В работах [1, 5, 6] автору принадлежит практическая реализация моделирования системы электростартерного пуска и исследование ее свойств при разных температурных условиях; в [2, 7, 8, 11] – идея модернизации электростартерной системы и применения высокоэнергетических магнитов; в [3, 4, 10] - сравнительный анализ электростартерных систем пуска и расчет их характеристик; в [9] - анализ тепловых режимов магнитоэлектрических стартеров при пуске; в [12] - обработка результатов испытаний.

ЛАЗАРЕВ Александр Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 12.10.2009. Формат 60x84 1/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16

Тираж 100 экз. Заказ №

ГОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.