

ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

БАРХАМ ДЖЕРИС АЛЬ-МАДАИН

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО
ИСПОЛНЕНИЯ, ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ПО ТЕПЛОВЫМ ПАРАМЕТРАМ

05.09.01 - электрические машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1993 г.



№ 27. 468

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00814326 (0)

Работа выполнена на кафедре электрических машин Харьков-ского политехнического института.

Ученый руководитель - кандидат технических наук, доцент Остафьевский Н.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Калиниченко С.П.
кандидат технических наук, доцент Черкасов А.К.

Выдающее предприятие - НИИ завода "Электротяжмаш" г. Харьков

Защита состоится " 10 " июня 1993 года в 14³⁰ часов на заседании специализированного совета К 068.39.04 в Харьковском политехническом институте /310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского политехнического института.

Автореферат разослан " 19 " мая 1993 года.

Ученый секретарь специализированного совета

Егоров Б.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Для обеспечения дальнейшей конкурентоспособности приводов постоянного тока металлообрабатывающего оборудования требуется повышение технического уровня ДПТ в направлениях: расширения диапазона регулирования, снижения расходов на обслуживание, повышения эксплуатационных свойств двигателя. В этих условиях при проектировании двигателей для широкорегулируемых приводов прежде всего возникает необходимость существенного повышения эксплуатационной надежности, по которой им оказывают конкуренцию приводы на базе частотнорегулируемых асинхронных двигателей. Решение данной задачи в нашей стране и за рубежом /Германия, Англия, США, Швейцария/ видится, в первую очередь, на пути интенсификации охлаждения и повышения степени защиты вновь проектируемых двигателей постоянного тока (ДПТ).

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - определение путей повышения эксплуатационных параметров ДПТ общепромышленного исполнения на основе совершенствования математических моделей теплового состояния этих двигателей, уточнения инженерной методики их тепловых расчетов, разработки методики и рекомендаций по рациональному выбору параметров систем охлаждения этих двигателей.

НАИБОЛЕЕ СУЩЕСТВЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ, полученные лично автором при достижении поставленной цели:

1. Построены эквивалентные тепловые схемы /ЭТС/ ДПТ продуваемого /способ I С05/ и закрытого исполнения /способы IC 0645, IC 0655/ для стационарных режимов работы.

2. Разработаны алгоритмы и программа теплового расчета ДПТ в установившемся режиме, учитывающая конечную теплопроводность ребра и изменение коэффициента теплоотдачи по высо-

те и длине межреберного канала внешнего контура системы охлаждения.

3. Получены регрессионные модели теплового состояния двигателей, отражающие влияние параметров оребрения внешнего контура на нагрев активных частей этих двигателей.

4. Разработан алгоритм совместного аэродинамического и теплового анализа ДПТ при переменном расходе охлаждающего воздуха внутреннего контура. На базе вычислительного эксперимента получены зависимости нагрева активных частей ДПТ от расхода.

5. Выполнен рациональный выбор параметров систем охлаждения проектируемых двигателей /оптимальный расход охлаждающего воздуха внутреннего контура для способов IC 0645, IC 0655/, параметры оребрения и расход воздуха внешнего контура - для способа IC 0655.

6. Выполнен анализ эффективности систем охлаждения /способы IC 0645, IC 0655/ на базе вычислительного эксперимента. Разработаны рекомендации по совершенствованию систем охлаждения указанных двигателей и произведена оценка эффективности данных рекомендаций.

7. Разработана типовая диаграмма режима нагрузки и ЭТС ДПТ при нестационарных режимах работы. Формирование диаграммы нагрузки выполнено на ЭВМ с помощью метода Монте-Карло.

8. Построена математическая модель теплового состояния ДПТ в динамических режимах работы. Установлено, что двигатели закрытого исполнения /способы охлаждения IC 0645, IC 0655/ при работе по типовой диаграмме имеют запас по нагреву по сравнению с их работой в режиме I.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИИ. При выполнении работы автор использовал методы математического и физического моделирования теп-

ловых процессов, методы цифрового моделирования случайных процессов на ЭВМ; методы регрессионного анализа, методы линейной алгебры, методы численного интегрирования систем дифференциальных уравнений.

Натурные тепловые и вентиляционные исследования опытных образцов двигателей проводились на специальном стенде Харьковского НПО "Электромашина".

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ:

1. Построена математическая модель теплового состояния ДПТ в установившемся режиме, учитывающая конечную величину коэффициента теплопроводности ребра и изменение коэффициента теплоотдачи $k_{ТО}$ по длине и высоте межреберного канала внешнего контура системы охлаждения.

2. Разработан алгоритм совместного аэродинамического и теплового анализа ДПТ при переменном расходе охлаждающего воздуха внутреннего контура системы охлаждения.

3. Получены уравнения регрессии, отражающие влияние параметров обрешетки внешнего контура на нагрев активных частей ДПТ и зависимости, отражающие влияние расхода воздуха внутреннего контура на нагрев этих же двигателей.

4. Построена математическая модель динамических тепловых режимов ДПТ, учитывающая случайный характер параметров режима работы двигателей, моделируемых на ЭВМ с помощью метода Монте-Карло.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ состоит в создании уточненной методики теплового расчета ДПТ в стационарном режиме, учитывающей зависимость коэффициентов теплоотдачи от расхода охлаждающего воздуха во внешнем и внутреннем контурах, а также распределение $k_{ТО}$ по длине и высоте межреберного канала

внешнего контура; в разработке методики рационального выбора параметров систем охлаждения проектируемых двигателей на основе использования полученных /в результате вычислительного эксперимента/ регрессионных моделей и зависимостей, отражающих влияние указанных параметров на нагрев активных частей двигателя; в создании методики анализа теплового состояния ДПТ в динамических режимах работы со случайным характером параметров нагружения; в анализе эффективности систем охлаждения ДПТ как в стационарном, так и в динамическом режимах работы; в разработке рекомендаций по совершенствованию систем охлаждения и оценке эффективности этих рекомендаций. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации новых серий ДПТ общепромышленного и специализированного исполнения.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты диссертационной работы переданы Харьковскому НПО "Электромашина".

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической /подотраслевой/ конференции "Проблемы электромашиностроения" /г. Ленинград, 1991 г./ на научно-технических конференциях кафедры электрических машин ХПИ /г. Харьков, 1990-1992 г.г./.

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание исследований, выполненных по теме диссертации, отражено в 2-х печатных работах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 227 страниц, в том числе - 61 страницу основного машинописного текста, рисунков - 36 страниц, таблиц - 21 страницу, приложений - 79 страниц. Список литературы на 7 страницах включает 67 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность работы и сформулирована ее цель.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ произведен анализ состояния рассматриваемой в работе проблемы, сформулированы задачи и выбраны методы исследования.

При проектировании ДПТ общепромышленного исполнения решается задача получения требуемых по техническому заданию эксплуатационных параметров двигателя /мощность, к.п.д., диапазон регулирования и т.п./ в указанном габарите. Характерной особенностью ДПТ закрытого исполнения /степень защиты IP 44 и выше/ является напряженный тепловой режим, поскольку наличие непроницаемой оболочки ведет к замене непосредственного охлаждения активных частей косвенным охлаждением / для способов охлаждения IC 0645, IC 0655/; под параметрами внешнего контура подразумеваются параметры оребрения /толщина, высота ребра, межреберное расстояние/ и расход охлаждающего воздуха. Они в свою очередь определяют более общие /интегральные/ параметры, характеризующие интенсивность охлаждения: коэффициенты теплоотдачи /KTO/ и конвективные составляющие тепловых сопротивлений /тепловых проводимостей/ процесса теплообмена. Под параметрами внутреннего контура подразумевается прежде всего расход охлаждающего воздуха. Геометрические параметры /формы и размеры теплообменных поверхностей/ считаются заданными и существенно изменению не подлежат. Интегральными параметрами являются KTO и конвективные составляющие тепловых сопротивлений, характеризующие интенсивность теплообмена между активными /конструктивными/ частями и охлаждающим воздухом внутреннего и внешнего контуров.

Влияние параметров системы охлаждения на тепловое состояние ДПТ может быть определено путем вычислительного эксперимента, в ходе которого варьируются указанные параметры. Для анализа теплового состояния ДПТ как в стационарных, так и в динамических режимах выбран метод ЭТС. Этот метод в данных условиях является наиболее приемлемым по сложности реализации, точности и степени использования полученной информации.

Для реализации метода ЭТС необходимо построить эквивалентные тепловые схемы замещения ДПТ в стационарных и динамических режимах работы.

Как известно, точность теплового расчета по методу ЭТС определяется точностью задания источников тепловых потерь, точностью определения коэффициентов теплопроводности и коэффициентов теплоотдачи, входящих в расчетные формулы тепловых сопротивлений ЭТС. Поэтому для повышения точности теплового расчета необходимо учесть конечную величину коэффициента теплопроводности материала ребра и изменения КТЮ по длине и высоте межреберного канала внешнего контура системы охлаждения.

Решение задачи теплопроводности ребра позволит не только повысить точность методики теплового расчета за счет уточнения теплового сопротивления внешнего контура, но и, что более важно, разработать методику рационального выбора параметров оребрения этого контура. Для этого необходимо получить на основе планируемого вычислительного эксперимента уравнения регрессии, отражающие влияние параметров оребрения на нагрев активных частей двигателя.

Необходимость исследования влияния расхода охлаждающего воздуха на тепловое состояние ДПТ обусловлена рядом обстоятельств:

- расход оказывает определяющее влияние на КТО, а значит на тепловые сопротивления ЭТС и на нагрев двигателя в целом, и может изменяться путем регулирования частоты вращения встроенного /пристроенного/ блочного мотор-вентилятора /БМВ/ внутреннего и внешнего контуров системы охлаждения;

- оптимальное значение расхода для исследуемых ДПТ не может быть определено заранее по известным греющим потерям /как это делается для электромашин продуваемого исполнения/ ввиду сложной картины процесса теплообмена.

Задача определения расхода охлаждающего воздуха во внутреннем контуре может быть решена методом последовательных приближений совместно с задачей теплового расчета. Для этого должен быть разработан алгоритм совместного аэродинамического и теплового анализа. Вычислительный эксперимент, проведенный на основе аэродинамического и теплового анализа /АТА/, позволит определить зависимости нагрева активных частей ДПТ от расхода и выбрать требуемый /оптимальный/ расход.

Поскольку режим работы исследуемых ДПТ носит случайный характер, то принятый в техническом задании в качестве номинального режим **SI** обеспечивает высокую надежность двигателей в эксплуатации. Однако, при этом снижается экономичность работы оборудования из-за недоиспользования установленных мощностей и завьшактся капитальные затраты на изготовление оборудования. Кроме того, затрудняется выбор мощности ДПТ при проектировании нового оборудования, если реальный режим работы двигателей отличен от режима **SI**.

Для удовлетворения противоречивых требований надежности и экономичности при проектировании ДПТ необходимо определять его мощность /нагрев/ в условиях, близких к реальным условиям

эксплуатации. При этом появляется возможность оценить запас двигателя по мощности /нагреву/. Для этого в первой главе обоснован выбор метода определения мощности ДПТ при нестационарных режимах работы, намечены задачи, решение которых позволит разработать методику анализа теплового состояния ДПТ в динамических режимах работы. К ним относятся:

- разработка ЭТС двигателя при нестационарной нагрузке;
- построение типовой диаграммы режима нагрузки на ЭВМ с применением метода Монте-Карло;
- построение математической модели теплового состояния ДПТ в динамических режимах и выполнение вычислительного эксперимента .

Кроме указанных выше, в работе решаются следующие задачи: экспериментальная проверка точности разработанной методики теплового расчета ДПТ; сравнительный анализ эффективности двух систем охлаждения исследуемых ДПТ /способ охлаждения IC 0645, IC 0655/; разработка рекомендаций по совершенствованию данных систем охлаждения.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ построена математическая модель, разработаны алгоритм и программа расчета теплового состояния ДПТ в стационарном режиме на базе расчета предложенной ЭТС и решение задачи теплопроводности для ребра. При этом заданием граничных условий учтены конечная теплопроводность ребра и распределение КТО в межреберном канале внешнего контура.

Для повышения точности математической модели и снижения затрат машинного времени применен конечно-разностный метод расчета температурного поля ребра. С целью построения экономичной разностной схемы для уравнения теплопроводности ребра, использован итерационный метод, который можно трактовать как "ме-

тод установления" для нестационарного уравнения:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{2\alpha(x, z)}{\delta} (T - T_B);$$

с граничными:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = g(z) \Big|_{x=0}; \quad /1/$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = \alpha(z)(T - T_B) \Big|_{x=h};$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0$$

и начальным

условиями.

$$T(0, x, z) = T_0(x, z)$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности; C - параметр сходимости итерационного процесса; T , T_B - температура ребра и температура охлаждающего воздуха вдоль ребра; X , Z - коэффициенты высоты и длины ребра /рис.1/; $\alpha(x, z)$ - коэффициент теплоотдачи с поверхности ребра; $g(z)$ - тепловой поток у основания ребра, изменяющийся по длине ребра; δ , l , h - толщина, длина и высота ребра.

Для области определения задачи /1/ строим сетку $\Omega t, x, z$ с шагами τ , h_x , h_z по времени и с координатами x , z соответственно. При решении задачи /1/ используем метод расщепления по направлениям, который сводит ее к двум одномерным задачам. Для одномерных задач используем четырехточечные неявные разностные схемы, аппроксимирующие эти задачи в системы линейных алгебраических уравнений, которые решались методом прогонки.

Расчет оребрения выполняется по следующему алгоритму /рис. 2/. В качестве исходных данных используются геометрические раз-

меры ДПТ, данные электромагнитного расчета. После вентиляционного расчета выполняется расчет матрицы КТО $\alpha(x, z)$ по известным уравнениям, а затем - расчет тепловых сопротивлений внешнего контура /сопротивлений передачи тепла с поверхности оребрения по трем участкам разбиения, принятого в ЭТС, и соответственно расчет проводимостей $G_1 - G_3$ /. При этом еще не учитывается сопротивление теплопроводности /кондуктивное сопротивление/ ребра. Выполняется первичный расчет ЭТС. В числе других температур получаем средние температуры участков разбиения оребрения по длине / $T_{19} - T_{21}$ /. Для учета сопротивления теплопроводности ребра надо решить задачу /1/. Чтобы задать граничные условия $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = g(z) \Big|_{x=0}$, по трем полученным из расчета ЭТС значениям температуры / $T_{19} - T_{21}$ / ребра и охлаждающего воздуха / $T_{22} - T_{24}$ / производим интерполяцию и находим распределение температуры ребра $T_{r, k}$, и воздуха $T_{в, k}$ по длине межреберного канала. После этого рассчитываем распределение теплового потока у основания ребра /по закону Фурье $q_{r, k} = G_k (T_{r, k} - T_{в, k})$ и решаем задачу теплопроводности ребра /1/. Результаты решения используем для уточнения проводимостей оребрения $G'_1 - G'_3$ и выполняем вторичный расчет ЭТС. Анализ показывает, что только учет кондуктивного сопротивления ребра позволяет на 3+5% повысить точность теплового расчета.

Этот алгоритм использовался при выполнении вычислительного планируемого эксперимента. В качестве названных факторов выбраны толщина ребра δ /X1/, высота ребра h /X2/ и расстояние между ребрами δ /X3/. Диапазон изменения факторов, с учетом технологичности изготовления оребрения, в натуральном масштабе имеет вид: $\delta = /4,708 \dots 11,292/ \cdot 10^{-3}$ м; $h = /23,539 \dots 56,461/ \cdot 10^{-3}$ м; $\delta = /23,539 \dots 56,461/ \cdot 10^{-3}$ м.

Система координат для расчета температуры в прямоугольном ребре

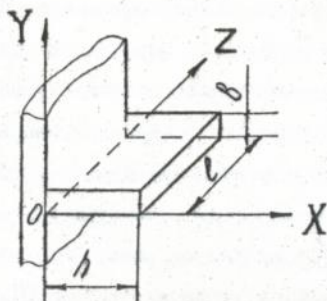


Рис. I

Блок-схема алгоритма теплового расчета ДПТ

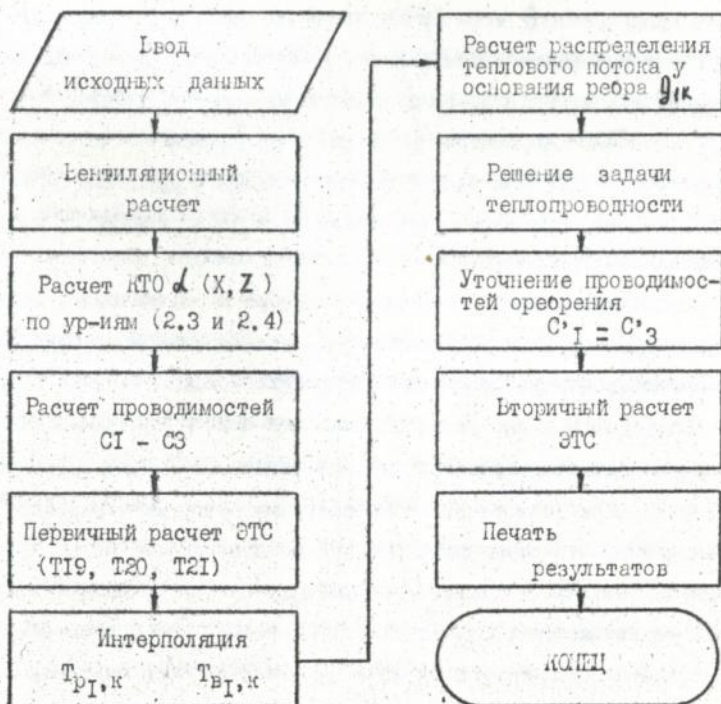


Рис. 2

Ввиду очевидной нелинейной зависимости целевой функции /нагрева активных частей/ от перечисленных факторов, использован ортогональный центрально-композиционный план второго порядка. Получены уравнения регрессии, отражающие влияние параметров оребрения на нагрев активных частей ДПТ /табл. I/. Для учета влияния расхода охлаждающего воздуха на нагрев двигателя, планируемый эксперимент был выполнен для четырех значений частоты вращения вентилятора внешнего контура / $N_B = 660, 1120, 1680, 2240$ об/мин/. Соответственно, получены по четыре уравнения регрессии для каждой из активных частей ДПТ. Анализ полученных зависимостей позволил выбрать оптимальный расход охлаждающего воздуха $Q_B = 0,065 \text{ м}^3/\text{с}$ и рациональный выбор параметров оребрения: $b = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h = 53 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\delta = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, при которых достигаются близкие к минимальным перегревы активных частей двигателя. Ввиду пологости целевой функции /см. табл. I/, изменение параметра δ в два раза приводит к отклонению перегревов активных частей от минимальных в пределах 5% ($\delta_{\text{min}} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). При этом почти вдвое /1,6 раза/ снижается материалоемкость оребрения.

Получены температурное поле ребра и охлаждающего воздуха в межреберном канале, а также поле коэффициентов теплоотдачи на поверхности ребра. Введены показатели эффективности ребра в отдельности и оребрения в целом для случая изменения КТО по длине и высоте ребра. Установлены зависимости между эффективностью ребра /оребрения/ и параметрами оребрения /рис. 3/. Установлено, что среднеинтегральное по поверхности ребра значение КТО не зависит /рис. 4/ от шага оребрения /в пределах диапазона варьирования фактора ХЗ/. Показано, что с изменением расхода охлаждающего воздуха в пределах области определения

критерия Рейнольдса /для данного критериального уравнения теплообмена/ коэффициент "эффективности" ребра /оробрения/ практически не изменяется /рис.5/.

Полученные результаты могут быть использованы для рационального проектирования внешнего оребрения как ДПТ, так и других электрических машин.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена исследованию внутреннего контура системы охлаждения ДПТ, так как влияние параметров этого контура на тепловое состояние исследуемых двигателей является определяющим. Из рассматриваемых двух конструктивных исполнений ДПТ /способы IC 0645, IC 0655/, первый является традиционным для оребрения АД с внешним обдувом. Отличие только в том, что во внутреннем и внешнем контурах установлены независимые БвФ. Практический интерес представляет определение предельных возможностей такой системы охлаждения /в рамках технического задания на разработку ДПТ/, выбор оптимального /рационального/ значения расхода, выяснения возможности разработки ДПТ со способом охлаждения IC 0645. Этот интерес обусловлен большей технологичностью и меньшей трудоемкостью изготовления ДПТ со способом охлаждения IC 0645. Для обеспечения возможности выполнения сравнительного анализа эффективности исследуемых систем выбраны критерии оценки эффективности охлаждения, разработан алгоритм аэродинамического и теплового анализа /АТА/ двигателей. Кроме известных, предложен новый критерий - коэффициент запаса по нагреву $K_{\text{он}}$, показывающий, какой запас по снижению нагрева электрической машины имеет система при возможности изменения расхода охлаждающего воздуха. Сущность АТА заключается в том, что расход охлаждающего воздуха определяется методом последовательных приближений при совместном выполнении

Таблица I

Полиномы аппроксимирующие функцию нагрева активных частей
двигателя / $n_b = 1120$ об/мин/

| № п/п | Название элемента | Аппроксимирующий полином | Минимум целевой функции, °С |
|-------|-----------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Коллектор | $Y_1 = 1,152653 + 0,006349 X_1 - 0,071161 X_2 + 0,049344 X_3 +$ $+ 0,0004 X_1 X_2 + 0,00225 X_1 X_3 - 0,0176 X_2 X_3 -$ $- 0,003271 / X_1^2 - 0,73 / + 0,032776 / X_2^2 - 0,73 / -$ $- 0,002593 / X_3^2 - 0,73 /$ | 104,4 |
| 2 | Обмотка якоря | $Y_2 = 1,241370 + 0,00632 X_1 - 0,070534 X_2 + 0,049194 X_3 +$ $+ 0,0004 X_1 X_2 + 0,002275 X_1 X_3 - 0,0175 X_2 X_3 -$ $- 0,003215 / X_1^2 - 0,73 / + 0,03263 / X_2^2 - 0,73 / -$ $- 0,0025 / X_3^2 - 0,73 /$ | 113,35 |
| 3 | Обмотка добавочного полюса. | $Y_3 = 0,94772 + 0,006769 X_1 - 0,07516 X_2 + 0,053652 X_3 +$ $+ 0,00045 X_1 X_2 + 0,00245 X_1 X_3 -$ $- 0,01665 X_2 X_3 - 0,003699 / X_1^2 - 0,73 / + 0,034664$ $/ X_2^2 - 0,73 / - 0,003069 / X_3^2 - 0,73 /$ | 63,11 |
| 4 | Обмотка главного полюса | $Y_4 = 0,746479 + 0,006709 X_1 - 0,074207 X_2 + 0,052791 X_3 +$ $+ 0,000425 X_1 X_2 + 0,002425 X_1 X_3 - 0,018575 X_2 X_3 -$ $- 0,003704 / X_1^2 - 0,73 / + 0,03407 / X_2^2 - 0,73 / -$ $- 0,003126 / X_3^2 - 0,73 /$ | 63,15 |

ЗАВИСИМОСТИ $G_p, G_{op}, \eta_p, \eta_{op}, \Delta c_p, \Delta c_x, S_{op}$

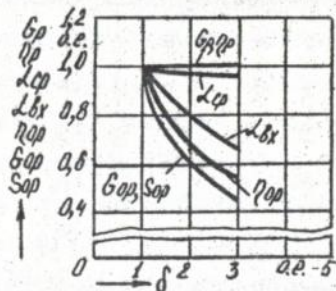
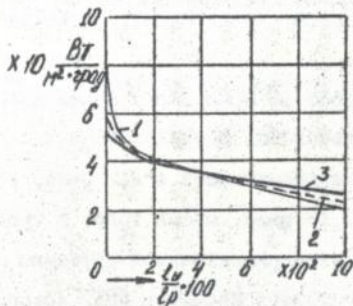


Рис. 3

Распределение ИТО по длине ребра



l_p — длина ребра, $= 100$ мм, — шаг разбиения, $= 70$ мм
 1- $\Delta c = f(l_w/l_p)$ при $n = 1120$ об/мин, $\delta = 20$ мм
 2- $\Delta c = f(l_w/l_p)$ при $n = 1120$ об/мин, $\delta = 40$ мм
 3- $\Delta c = f(l_w/l_p)$ при $n = 1120$ об/мин, $\delta = 60$ мм

Рис. 4

Зависимости проводимости и эффективности ребра (оребрения) от Q_0 расхода воздуха

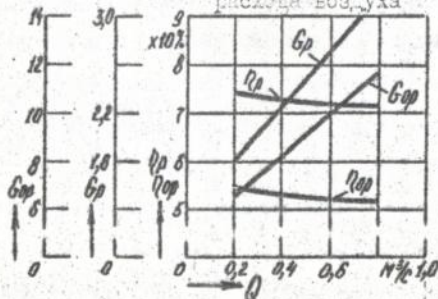
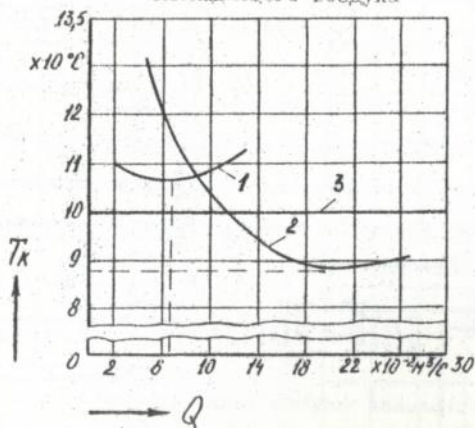


Рис. 5

вентиляционного и теплового расчета. При этом учитывается зависимость конвективных составляющих тепловых сопротивлений ЭТС от расхода, учитывается изменение потерь на вентиляцию с изменением расхода, а также зависимость мощности источников ЭТС от их температуры. Предлагаемый алгоритм базируется на допущении, что частота вращения вентилятора /и, соответственно, расход/ могут изменяться. По предложенному алгоритму был проведен вычислительный эксперимент, в результате которого получены зависимости нагрева активных частей и потерь /рис.6, 7/ от расхода. Установлено, что система охлаждения /способ IC 064b/ работает в режиме, близком к оптимальному, и не имеет, практически, запаса по нагреву. По всем выбранным критериям, кроме коэффициента удельного расхода, способ IC 065b имеет более высокие показатели: коэффициент использования поверхности в 2,3 раза; энергетический коэффициент экономичности в 2,2 раза; коэффициент запаса по нагреву в 1,13 раза. Кроме того, в третьей главе приведены результаты экспериментальной проверки точности разработанной методики тепловых расчетов ДПТ. Установлено, что расчетные значения температуры активных частей превышают экспериментальные значения не более чем на 15%.

ЧЕТЫРЬТАЯ ГЛАВА посвящена анализу теплового состояния ДПТ в динамических режимах работы. Анализ условий эксплуатации показал, что исследуемые ДПТ общепромышленного исполнения, в том числе двигатели привода главного движения металлорежущих станков, работают в случайном режиме с детерминированным характером чередования состояний двигателя. Реализуемый на ЭБМ по разработанной программе с применением метода монте-карло режим нагружения ДПТ можно представить в виде временных диаграмм /графиков/ функций тока якоря $I = f(t)$ и частоты вра-

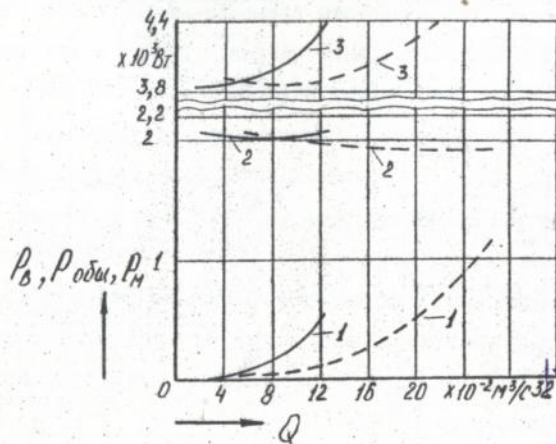
Зависимость превышения температуры коллектора от расхода охлаждающего воздуха



1-й способ IC 0645; 2-й способ IC 0655; 3 - T доп.

Рис. 6

Зависимость потерь от расхода воздуха внутреннего контура



1-потери на вентиляцию P_v ; 2-потери в меди P_n ; 3-общие потери $P_{общ.}$; ---- для способа IC 0645; - - - - для способа IC 0655

Рис. 7

щения $\eta = \varphi(t)$ /рис.6, 9/.

Для составления математических моделей нестационарного нагрева ДПТ предложены "нестационарные" ЭТС двигателей со способами охлаждения: 1С 06, 1С 0645, 1С 0655.

Описания нестационарного нагрева исследуемых ДПТ, составленные на основе "нестационарных" ЭТС, представляются в виде систем уравнений теплового баланса, имеющих в векторно-матричной форме следующий вид:

$$C \frac{d\vec{\theta}}{dt} + G(t)\vec{\theta} = \vec{P}(t) \quad /2/$$

где C - диагональная матрица теплоемкостей элементов, на которые условно разбивается двигатель при составлении ЭТС;

$G(t)$ - квадратная матрица тепловых проводимостей;

$\vec{\theta}$ - вектор превышений температур;

$\vec{P}(t)$ - вектор тепловых потерь.

Диаграмма нагрузки состоит из отдельных временных интервалов состояний двигателя, каждый из которых характеризуется средними значениями тока и частоты вращения якоря. В этом случае решение задачи нестационарного нагрева /2/ ДПТ можно свести к множеству, в котором каждому интервалу состояния соответствует своя система уравнений с постоянными коэффициентами и правой частью. При этом, на границах интервалов решения должны "стыковаться", т.е. соответствовать условиям непрерывности. Для каждого интервала система линейных дифференциальных уравнений интегрировалась численно методом Рунге-Кутты-Мерсона четвертого порядка. График изменения температуры нагретой части двигателя приведен на рис.10. Здесь же представлен график той же функции при стационарном режиме.

Диаграмма нагрузки по току якоря

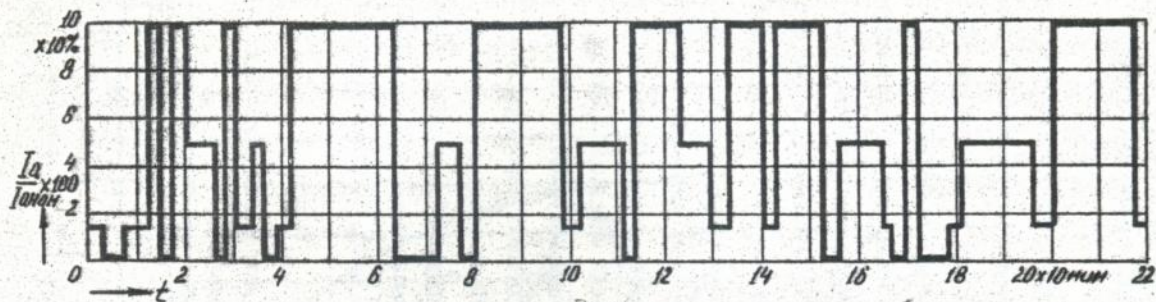


Рис. 8

Диаграмма нагрузки ДПТ по частоте вращения

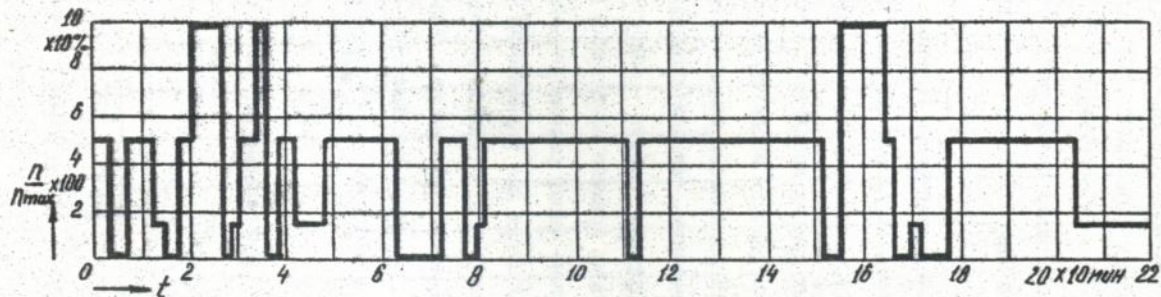


Рис. 9

Сравнительный анализ теплового состояния ДИТ трех конструктивных исполнений в стационарном, и динамическом режимах работы показал следующее.

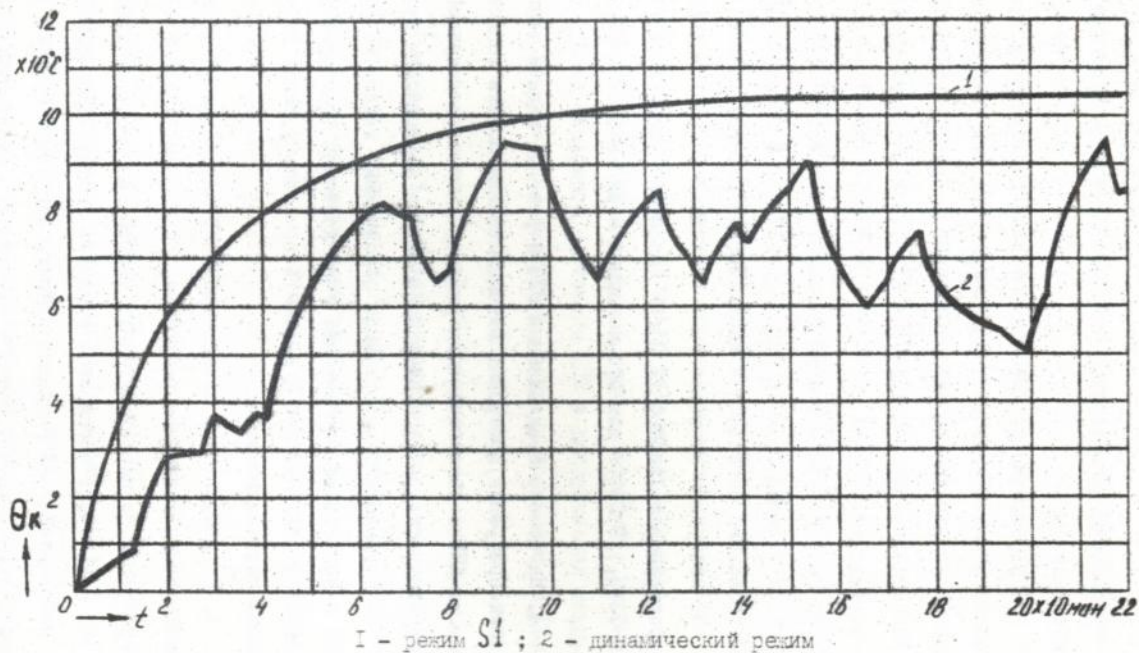
Двигатели продуваемого исполнения /способ охлаждения IC 06/ за время отдельных элементарных циклов нагружения "работа - холостой ход /отключение/" успевают достичь превышений температур установившегося нагрева. Поэтому для таких двигателей рассматривать нагрев при реальных графиках нагружения практически нецелесообразно. Достаточно ограничиться режимом **SI**. Для двух других исполнений двигателей /IC 0645 и IC 0655/ процессы нагревания после выделения из случайных процессов участка нестационарности можно считать стационарными эргодическими процессами, так как средняя длительность элементарного цикла нагружения "работа - холостой ход /отключение/" меньше постоянных времени нагревания двигателей /рис.10/. Поэтому достаточно одной рассмотренной реализации случайного нагружения двигателя для определения статистических характеристик нагревания его элементов /математического ожидания и среднеквадратичного отклонения/. Используя правило "трех сигм", были найдены максимальные значения превышений температур активных частей двигателей двух исполнений /IC 0645, IC 0655/ /табл.2/.

Таблица 2

Сравнительные данные о нагреве двигателей различных способов охлаждения

| Способ охлаждения | Тип величины | | | | | | | Запас по нагреву, % | |
|-------------------|--------------|-----|-----|-----|----|----|-----|---------------------|-----|
| | 89 | 101 | 82 | 86 | 79 | 86 | 100 | 16 | 6,8 |
| IC 0655 | 89 | 101 | 82 | 86 | 79 | 86 | 100 | 16 | 6,8 |
| IC 0645 | 107 | 114 | 104 | 107 | 65 | 66 | 100 | - | 2,6 |

Тепловое состояние ДИТ в динамическом режиме и в режиме $S1$



1 - режим $S1$; 2 - динамический режим

Рис.10

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены основные научные и практические результаты работы:

1. Разработана уточненная методика теплового расчета ДПТ закрытого исполнения в установившемся режиме, учитывающая конечную теплопроводность ребра и изменение коэффициента теплоотдачи по высоте и длине межреберного канала внешнего контура системы охлаждения.

2. Разработаны методика рационального выбора параметров системы охлаждения проектируемых двигателей и методика анализа их теплового состояния в динамических режимах работы.

3. Построены эквивалентные тепловые схемы замещения /ЭТС/ ДПТ продуваемого /способ IC 06/ и закрытого исполнения /способы IC 0645, IC 0655/ для стационарных и динамических режимов работы.

4. На основе предложенных ЭТС и решения задачи теплопроводности оребрения построена математическая модель теплового состояния ДПТ в установившемся режиме, учитывающая конечную теплопроводность ребра и изменение КТО по поверхности ребра.

5. Разработано программное обеспечение теплового расчета ДПТ в установившемся режиме. Учет конечной теплопроводности ребра позволил на 3+5 % повысить точность расчета нагрева активных частей двигателя.

6. По результатам вычислительного планируемого эксперимента получены уравнения регрессии, отражающие влияние параметров оребрения на нагрев активных частей двигателя. Установлено, что наибольшей весомостью обладает фактор X2 /высота ребра/, наименьшей - X1 /толщина ребра/. Экстремум функций отклика расположен у нижней границы фактора X3 /расстояние между ребрами/. Выбраны параметры оребрения, обеспечивающие близкий

к минимальному нагрев /отклонение в пределах 5%/ при минимальной материалоемкости обрешетки.

7. Разработан алгоритм совместного аэродинамического и теплового анализа ДПТ при переменном расходе охлаждающего воздуха внутреннего контура. На основе вычислительного эксперимента получены зависимости нагрева активных частей двигателя от расхода, определено оптимальное значение расхода.

8. Выполнен сравнительный анализ эффективности способов охлаждения IC 0645 и IC 0655. Установлено, что способ IC 0655 имеет более высокие показатели: коэффициент использования поверхности в 2,3 раза; энергетический коэффициент экономичности в 2,2 раза; коэффициент запаса по нагреву в 1,13 раза.

9. Разработаны типовая модель режима нагрузки и математическая модель теплового состояния ДПТ в динамических режимах работы. Формирование диаграммы нагрузки выполнено на ЭВМ с применением метода Монте-Карло. Установлено, что двигатели продуваемого исполнения /способ IC 06/ достаточно исследовать в режиме *SI* из-за малой тепловой инерционности. Показано, что двигатели закрытого исполнения /способы IC 0645, IC 0655/ имеют некоторый запас по нагреву по сравнению с их работой в соответствующем режиме *SI*. Поэтому данные двигатели могут работать в более тяжелых условиях чем те, которые указаны в технических условиях их эксплуатации.

10. Разработаны рекомендации по совершенствованию систем охлаждения ДПТ закрытого исполнения /способы IC 0645, IC 0655/.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Осташевский Н.А., Цукин И.С., Мадаин Бархам. Пути повышения мощности двигателей постоянного тока унифицированной блочно-модульной конструкции //Тез. докл. н-т./подотраслевой/

конференции/ Проблемы электромашиностроения /15-17 октября 1991 г./ -Ленинград, 1991. -с. 158-159.

2. Осташевский Н.А., Кузьменко Л.В., Лукин И.С., владимир Бархам. Эквивалентная тепловая схема двигателя постоянного тока с двухконтурной системой воздушного охлаждения //Вестн. Харьк. политехн. ин-та/ Электромашиностроение и автоматизация пром. предприятий. -Харьков, Вища школа, 1992 г. -Вып. 17. № 5, -с. 29.

Лев

Подп. к печ. 15.05.93. Формат 60×84^{1/16}. Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.
Уч.-изд. л. 60 Тираж 60 экз. Зак. № 1550. Бесплатно.

Харьковское межвузовское арендное полиграфическое предприятие.
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115.

465669

AB 27.466