

**ДОНЕЦКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Мохамед Ибрагим Мохамед Дауд

**ПРЕВЕНТИВНЫЙ НАГРЕВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗОЛЯЦИИ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ МОРСКИХ ПОРТОВ РЕСПУБЛИКИ СУДАН)**

Специальности: 05.09.03 — «Электротехнические комплексы
и системы, включая их управление и регулирование»;
05.09.01 — «Электрические машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1993

11/В 20.360
Работа выполнена в Донецком государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Дудник М.З.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, ст.н.с.

Ковалёв Е.Б.

кандидат технических наук, доцент

Жемчугов Н.И.

Ведущее предприятие

ПЭО "Донбасс-
энерго"

Защита состоится 23 декабря 1993г в 14³⁰ час. в ауд. I.201 главного корпуса на заседании Специализированного Совета К 068.20.01 Донецкого государственного технического университета (340000, г.Донецк-00, ул.Артема, 58).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого государственного технического университета.

Автореферат разослан 23 ноября 1993 г.

Отзыв на автореферат

просим направлять по адресу: 340000, г.Донецк-00, ул.Артема, 58, учёному секретарю совета.

Ученый секретарь
специализированного совета
докт. техн. наук, профессор

Макаров М.И.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Надежность и долговечность электрооборудования и, в частности, электрических машин в значительной степени определяется стойкостью их обмоток, которая в свою очередь, зависит от состояния их изоляции. Последняя работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению их свойств. Основной характеристикой изоляции, определяющей надежность работы электрических машин, является электрическая прочность. Однако это важнейшее свойство изоляции может сохранить в процессе эксплуатации лишь при наличии многих других качеств, одним из которых является влагостойкость.

После длительного пребывания электрооборудования в атмосфере с относительной влажностью 100% или после длительных технологических пауз, необходимо считаться с возможностью снижения поверхностного сопротивления до уровня порядка $10^7 - 10^8 \text{ Ом}$, а при загрязнении изоляции до ещё более низкого уровня.

Снижение электрических характеристик изоляции по причине их увлажнения может привести, с одной стороны, к её пробоям при достаточно высоком рабочем напряжении, с другой стороны, к образованию токопроводящих дорожек между оголенными элементами обмотки, сопровождающихся прогоранием изоляции. В машинах высокого напряжения при достаточно низком поверхностном сопротивлении изоляции лобовых частей и деталей крепления возможно нарушение работы противокоронных покрытий, приводящих к её полному разрушению. Наряду с выбором соответствующих изоляционных материалов и содержанием обмоток в чистом виде для поддержания в рабочем состоянии электрооборудования, постоянно находящегося во влажной атмосфере или во время длительной стоянки, необходим превентивный подогрев обмоток электрооборудования, чтобы обеспечить превышение их температуры относительно температуры окружающей среды на $8 - 10^\circ \text{C}$.

Указанный подогрев можно осуществить двумя путями:

1. Путём встраивания электронагревателя внутрь машины.
2. Пропуская электрический ток непосредственно в рабочей обмотке.

В республике Судан и, в частности, на восточной части, где

расположен главный порт страны на побережье Красного моря, сочетание высокой температуры с высокой относительной влажностью воздуха часто приводит к увлажнению изоляции электрических аппаратов и обмоток электродвигателей, предназначенных для привода подъёмно-транспортных и других механизмов. Статистика, проведенная в указанном порту, показывает, что 70% случаев нарушения бесперебойности работы порта происходит по причине отказа электродвигателей из-за увлажнения их изоляции.

В настоящей работе рассматривается непосредственный способ нагрева, при котором электрический ток протекает по проводникам обмотки, т.к. этот способ обеспечивает равномерный нагрев, а подключение к источнику электроэнергии электрооборудования посредством регулирующего устройства приводит к более экономному расходованию электроэнергии.

Цель работы - Повышение эффективности защиты изоляции электрооборудования от влияния влаги путём превентивного нагрева.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи:

- проведены теоретические и экспериментальные исследования теплового состояния электрооборудования для определения необходимого превышения температуры защищаемого объекта над температурой окружающей среды, при котором исключается увлажнение его изоляции;

- разработана тепловая схема замещения и соответствующая ей математическая модель для исследования превышения температуры узлов асинхронного двигателя и для обеспечения достоверности расчёта по упрощённой методике;

- разработана инженерная методика определения величины греющей мощности и других параметров превентивного нагрева для обеспечения надёжной защиты изоляции от увлажнения;

- проведен анализ схем нагрева электрооборудования разных типов и мощностей, предложены рациональные схемы включения обмоток для их превентивного нагрева;

- выполнен анализ существующих и предлагаемых видов автоматического управления системами нагрева электрооборудования;

- выполнены расчёты элементов схемы превентивного подогрева.

Научная задача: Определение параметров превентивного нагрева электрооборудования для защиты изоляции от увлажнения и поиск способов и средств введения мощности нагрева в защищаемый объект.

Основная идея работы: Надёжную защиту от увлажнения изоляции электрооборудования можно обеспечить введением определенной мощности посредством специальной системы превентивного нагрева.

Защищаемые научные положения и результаты.

Их новизна

1. Разработан способ автоматического управления превентивным нагревом электрооборудования, отличающийся тем, что регулирование процесса нагрева ведется путём контроля превышения температуры с помощью резистивно-ёмкостного аналога теплового состояния машины.

2. На основе установленных закономерностей состояния изоляции электрической машины в зависимости от влажности и температуры разработана новая инженерная методика определения параметров и потребляемой мощности установки превентивного нагрева электрических машин, что позволяет исключить проведение длительных экспериментов и выполнение громоздких вычислений.

3. На основе расчётно-экспериментальных исследований установлена величина необходимого превышения температуры изоляции электрических машин и электрооборудования, при котором исключается её увлажнение и которое составляет $8-10^{\circ}\text{C}$.

Достоверность научных положений обусловлена сходимостью результатов вычисления мощности превентивного подогрева образцов электрооборудования с помощью разработанной методики с результатами экспериментов, проведенных в лаборатории электрических машин Донецкого государственного технического университета и на Московском электромашиностроительном заводе "Динамо" с погрешностью не более 10%.

Научное значение работы состоит в развитии теории старения изоляции под влиянием влаги.

Практическая ценность работы заключается в возможности увеличения срока службы электрооборудования в условиях районов с морским и влажным тропическим климатом, поскольку метод непосредственного ввода греющей мощности как средств защиты изоляции от увлажнения на подстанциях порта республики Судан – место работы автора настоящей диссертации, является новым и избавляет от необходимости использования встроенных электронагревателей, применяемых в настоящее время.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Результаты данной работы могут быть реализованы в следующих направлениях:

1. Для защиты от увлажнения электродвигателей, предназначенных для привода судовых палубных, подъёмно-транспортных и других

механизмов.

2. Для применения в портах и на подстанциях в местах, расположенных на побережьях морей.

3. В странах с влажным и влажным тропическим климатом в качестве защиты от увлажнения электрооборудования.

4. Разработанная инженерная методика определения параметров превентивного нагрева может быть использована в справочниках для определения величины потребляемой мощности и расчёта элементов системы питания при нагреве.

Апробация раб. у. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-техническом семинаре в г. Севастополе (1992 г), проводимым Республиканским Домом экономической и научно-технической пропаганды совместно с Институтом электродинамики АН Украины, на семинаре "Электромагнитные процессы в электромеханических преобразователях энергии и электрических аппаратах" (Донецк-1993г) из цикла "Научные основы электроэнергетики" (АН Украины), на расширенном заседании кафедры электрических машин Донецкого политехнического института.

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 3 научные работы.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Содержание работы изложено на 136 страницах машинописного текста, включая 29 рисунка, 8 таблиц, список использованной литературы из 96 наименований и 3 приложений на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается выбор темы, кратко излагается цель и задачи работы.

В первой главе дан аналитический обзор публикации, посвящённой защите изоляции электрооборудования от увлажнения, а также созданию различных систем для осуществления указанной выше цели. Приведены схемы для нагрева электрооборудования с целью предотвращения увлажнения изоляции как с применением метода непосредственного нагрева электрическим током, так и с помощью встраиваемых внутрь машины электронагревательных элементов.

На основе изложенного в данной главе освещено состояние вопроса и сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке новой методики определения мощности превентивного подогрева. В качестве объекта исследования

использовалась асинхронная машина закрытого исполнения с обдуваемым ребристым корпусом.

Для исследования тепловых процессов при нагреве данной машины разработана эквивалентная тепловая схема ЭТС. Источником тепловой энергии являются потери в меди статора и ротора и потери в стали.

Потери в обмотке и пакете статора частично передаются ребренному корпусу путём теплопроводности и частично снимаются внутренним воздухом. Часть тепла с ротора передаётся через воздушный зазор в статор и часть через вал и подшипники к корпусу двигателя.

С учётом указанного выше при составлении тепловой схемы замещения выделены следующие узлы машины:

- пазовые и лобовые части обмотки статора;
- пакет статора;
- пазовые и лобовые части обмотки ротора;
- пакет ротора;
- корпус;
- внутренний воздух.

Источниками тепловой энергии в ЭТС представлены: лобовые и пазовые части обмоток статора и ротора, пакет статора и пакет ротора. На рис. I представлена ЭТС электродвигателя, состоящая из восьми узлов, соединённых сопротивлениями, и шести источников, подключённых к активным узлам тепловой цепи.

Система уравнений, описывающих стационарные тепловые процессы в асинхронном двигателе, составленная на основе изображённой ЭТС имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \theta_1 (\Lambda_{13} + \Lambda_{15}) - \theta_3 \Lambda_{13} - \theta_5 \Lambda_{15} &= P_1 (1 + \beta \theta_1) ; \\
 \theta_2 (\Lambda_{24} + \Lambda_{26}) - \theta_4 \Lambda_{24} - \theta_6 \Lambda_{26} &= P_2 (1 + \beta \theta_2) ; \\
 \theta_3 (\Lambda_{13} + \Lambda_{34} + \Lambda_{38}) - \theta_1 \Lambda_{13} - \theta_4 \Lambda_{34} - \theta_8 \Lambda_{38} &= P_3 ; \\
 \theta_4 (\Lambda_{24} + \Lambda_{34} + \Lambda_{48}) - \theta_2 \Lambda_{24} - \theta_3 \Lambda_{34} - \theta_8 \Lambda_{48} &= P_4 ; \\
 \theta_5 (\Lambda_{15} + \Lambda_{57}) - \theta_1 \Lambda_{15} - \theta_7 \Lambda_{57} &= P_5 (1 + \beta \theta_5) ; \\
 \theta_6 (\Lambda_{26} + \Lambda_{67}) - \theta_2 \Lambda_{26} - \theta_7 \Lambda_{67} &= P_6 (1 + \beta \theta_6) ; \\
 \theta_7 (\Lambda_{57} + \Lambda_{67} + \Lambda_{78}) - \theta_5 \Lambda_{57} - \theta_6 \Lambda_{67} - \theta_8 \Lambda_{78} &= 0 ; \\
 \theta_8 (\Lambda_{38} + \Lambda_{48} + \Lambda_{78} + \Lambda_{80}) - \theta_3 \Lambda_{38} - \theta_4 \Lambda_{48} - \theta_7 \Lambda_{78} &= 0 ;
 \end{aligned} \quad (I)$$

где: θ_1 ; θ_2 ; θ_3 ; θ_4 ; θ_5 ; θ_6 ; θ_7 ; θ_8 - соответственно превышение температуры пазовых частей обмоток статора и ротора, пакета статора и ротора, лобовых частей обмоток статора и ротора, внутреннего воздуха и корпуса;

$\Lambda_{13}, \Lambda_{15}, \Lambda_{24}, \Lambda_{26}, \Lambda_{34}, \Lambda_{38}, \Lambda_{48}, \Lambda_{57}, \Lambda_{80}$ - тепловые проводимости между узлами машины;

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$, - соответственно потери в отдельных узлах машины при температуре охлаждающей среды;

β - температурный коэффициент сопротивления, он отражает влияние изменения температуры при нагреве на величину переменных потерь;

$$\beta = 0,004 \text{ Ом/град (для меди).}$$

С помощью рассмотренной математической модели (I) может быть выполнен расчёт установившихся температур узлов тепловой цепи машины.

При выполнении расчётов по полученному математическому описанию необходимо иметь значения коэффициентов, входящих в уравнения, для определения которых необходимо рассчитать тепловые проводимости, связывающие узлы ЭТС и потери энергии, выделяющиеся в активных частях. Исходными данными для расчёта параметров тепловой цепи являются: коэффициенты теплопроводности материалов, коэффициенты теплоотдачи, паспортные данные, геометрические размеры обмоток статора и ротора и др. Потери в машине определяет расход энергии, от их распределения зависит нагрев различных частей двигателя. Для расчёта превышения температуры узлов машины над температурой окружающей среды, разработана программа на ЭВМ на алгоритмическом языке Паскаль. Расчёт выполняется для различных токов в диапазоне от 0,5 до 5 А.

Анализ полученных результатов расчёта превышений температур показывает, что при одном и том же токе подогрева значение температуры узлов обмотки ротора превышает температуру тех же узлов обмотки статора. Это объясняется тем, что выделяемое тепло в обмотке статора легко передается наружному воздуху через машинный корпус, а обмотка ротора имеет больше возможности сохранить тепло, которое нагревает внутренний воздух.

Для достижения превышения температуры нагреваемой обмотки над температурой окружающей среды на $8-10^{\circ}\text{C}$ значение тока нагрева отличается для различного по мощности электрооборудования в зависимости от многих факторов, например, от номинальной мощности, площади охлаждаемой поверхности, степени защиты и др.

Например, для двигателя постоянного тока мощностью 4,5 кВт со скоростью вращения 1000 об/мин экспериментально определенная величина переменного тока, необходимого для достижения заданной

установившейся температуры, составляет 5А, что обеспечивает перегрев до 10°С.

Подобные эксперименты проводились также на некоторых производственных предприятиях. Их результаты позволяют определить величину мощности и других параметров подогрева ограниченного количества электрических машин, поэтому возникла необходимость найти обобщенный подход к решению этой проблемы, т.е. определить параметры превентивного подогрева электрооборудования любой мощности и любого габарита. Рассмотрим основные этапы выполнения теплового расчёта обмотки статора асинхронного двигателя по известной упрощенной методике.

Потери в обмотке статора при расчётной температуре определяются по формуле:

$$P_{M1} = m_1 I_1^2 m_T R_1, \quad (2)$$

где m_T - температурный коэффициент для приведения сопротивления к расчётной температуре;

R_1 - активное сопротивление обмотки статора;

S_{MASH} - условная поверхность охлаждения машины.

$$S_{MASH} = \pi D_H (l_1 + 2l_{B1}), \quad (3)$$

где l_1 - длина сердечника статора;

l_{B1} - длина вылета лобовой части обмотки;

D_H - наружный диаметр статора.

Потери, передаваемые воздуху внутри машины:

$$P_{\Sigma}' = K (P_{M1} 2l_1 / l_{cp1} + P_{C\Sigma}) + P_{M1} 2l_1 / l_{cp1}, \quad (4)$$

где K - часть потерь передаваемая воздуху внутри двигателя;

l_{cp1} - средняя длина витка обмотки статора.

Среднее превышение температуры внутри машины над температурой наружного воздуха:

$$\theta_B = P_{\Sigma}' / S_{MASH} \cdot \alpha_B \quad (5)$$

где α_B - коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного воздуха:

$$\theta_1 = \theta_1' + \theta_B \quad (6)$$

где θ_1' - среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины.

Для того, чтобы определить мощность подогрева, необходимо было бы решить обратную задачу, т.е. по известному превышению температуры θ_1 , вычислить мощность P_{M1} и $P_{C\Gamma}$. Однако такой подход не позволяет достичь желаемого результата. Суть предлагаемой методики заключается в следующем: проведя тепловые расчеты машин и выполнив эксперименты, устанавливаем значение токов подогрева для достижения требуемого превышения температуры обмотки над температурой наружного воздуха θ_1 , и превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждения воздуха.

Затем определяем отношение между ними в виде коэффициента $K_p = \theta_2 / \theta_1$, который может быть использован в выражении, подобном (5) для определения мощности подогрева $P_{\text{пд}}$ обмотки любой электрической машины. Это выражение в результате принимает вид:

$$P_{\text{пд}} = K_p \theta_1 S_{\text{маши}} \alpha_{\text{в}}. \quad (7)$$

Для используемых машин установлено, что коэффициент K_p равен 0,285.

Теперь, задавшись значением превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды и зная паспортные и геометрические данные электрической машины, можно определить величину мощности, необходимой для нагрева обмоток с целью предотвращения увлажнения их изоляции.

Проблемой превентивного нагрева электрических машин для защиты их изоляции от увлажнения занимались также производственные предприятия, одним из которых является Московский электромашиностроительный завод "Динамо", на котором проводились испытания электродвигателей серии МАП I2I-72I с целью определения значения вводимой мощности подогрева $P_{\text{пд}}$. Результаты указанных испытаний приведены в табл. I, где также приведены расчетные значения $P_{\text{пд}}$, рассчитанные с помощью разработанной методики при $K_p = 0,285$.

Таблица I

Экспериментальные и расчетные значения мощности подогрева $P_{\text{пд}}$ для электродвигателей серии МАП

В режиме работы 60 мин	Исполнение двигателя						
	МАП-12I	МАП-22I	МАП-42I	МАП-52I	МАП-522	МАП-72I	
I	2	3	4	5	6	7	
P_n , кВт	2,2	3,0	12	15	30	50	

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7
Рцд. эксп., Вт	40	50	80	120	160	220
Рцд. расч., Вт	40	50,8	77,3	134	187	244

На рис. 2 построены графики зависимости мощности подогрева от номинальной мощности машины.

Характер изображенных графиков показывает, что с увеличением P_n расхождение между экспериментальными и расчётными величинами увеличивается. Это объясняется затруднением выбора мощности подогрева для машин больших мощностей в экспериментальных условиях.

Установлено, что расхождение не превышает 10%.

В третьей главе рассматриваются способы и средства введения мощности подогрева в защищаемые объекты, а также рассматривается расчёт для определения тока и напряжения превентивного нагрева с помощью известного значения греющей мощности.

Возможны два варианта включения электрической машины для нагрева через осветительную сеть. Первый вариант осуществляется прямым включением обмотки к осветительной сети посредством регулирующего устройства, в качестве которого служит тиристорный регулятор напряжения ТРН, с условием того, что сила тока для подогрева не превышает 10-12А. Второй вариант отличается от первого наличием согласующего трансформатора между защищаемым объектом и ТРН. Его входное сопротивление $R_{вх}$ должно быть таким, чтобы ток через ТРН не превышал 10А. Пользуясь известными формулами, определяем значение тока и напряжения подогрева для двигателей мощностью от 11 до 132 кВт при напряжении 220/380 В.

Анализ полученных результатов показал, что при мощности двигателей до 20 кВт. можно использовать схему включения обмоток двигателя через ТРН без согласующего трансформатора. При большей мощности двигателя, требуется согласующий трансформатор. Применение осветительной сети переменного тока для нагрева обмоток является наиболее удобным способом ввиду его доступности. Но эксперимент позволил установить, что в некоторых случаях применение переменного тока для указанной цели нецелесообразно для достижения желаемого результата. Например, для нагрева синхронных машин существует два варианта ввода мощности подогрева:

- через обмотку якоря;
- через обмотку возбуждения.

Во втором случае необходим постоянный ток также как для обмоток возбуждения машин постоянного тока.

Затем рассматриваются системы управления нагревом с целью защиты от увлажнения изоляции обмоток электрических машин. Показано, что во время длительных технологических пауз не требуется постоянный нагрев машины, поскольку можно досушить изоляцию обмоток перед включением машины в работу. В этом случае можно производить превентивный нагрев обмоток, как показали исследования, за 6 часов до включения машины в работу.

Система защиты изоляции электрических машин от увлажнения может быть выполнена с обратной связью как по сопротивлению изоляции обмотки, так и по ее тепловому состоянию (рис.3). В этом случае блок диагностирования З получает информацию о сопротивлении изоляции обмотки или тепловом ее состоянии и формирует сигнал на включение ТРН 2 для обеспечения нагрева защищаемой обмотки в случае ее увлажнения. В диссертации показано, что управление системами превентивного подогрева с обратной связью по температуре является более практичным и экономичным. Для получения информации о температуре обмотки не обязательно иметь непосредственный датчик температуры D_1 , встроенный в машину. Для цепей превентивного нагрева вполне достаточно иметь тепловую модель, ее тепловой аналог, который с достаточной точностью отражает реальные кривые нагревания и охлаждения машины. Тепловой аналог машины получают, исходя из условия, что реальную кривую нагрева можно представить в виде суммы двух экспонент.

При разложении кривых теплового процесса машины на две экспоненты с заданными постоянными времени T_1 и T_2 использована методика определения коэффициентов аппроксимирующих экспонент a_1 , a_2 , в основу которой положен метод наименьших квадратов. Аппроксимация кривых теплового процесса проведена с помощью функции

$$\theta = \theta_{уст} (1 - a_1 e^{-t/T_1} - a_2 e^{-t/T_2}),$$

где $\theta_{уст}$ — установившееся значение температуры;
 T_1, T_2 — соответственно большая и малая постоянные времени;
 a_1, a_2 — коэффициенты экспоненты с малой и большой постоянными времени.

Соответственно, моделирующее температуру напряжения при нагреве описывается выражением:

$$U_{CH}(t) = E_1 (1 - a_{1H} e^{-t/T_{1H}} - a_{2H} e^{-t/T_{2H}})$$

а при охлаждении имеем: $U_{COX}(t) = E_1 (a_{1OX} e^{-t/T_{1OX}} - a_{2OX} e^{-t/T_{2OX}})$;

предотвращения увлажнения изоляции обмоток путем превентивного нагрева заключается в следующем:

Напряжение с вторичной обмотки трансформатора тока, включенного в силовую цепь (рис.5) и моделирующее температуру обмотки при нагреве, подается на вход квадратора, в нем формируется сигнал, прямо пропорциональный греющим потерям. Этот сигнал подается на вход теплового аналога. Параметры аналога подбираются таким образом, чтобы изменение напряжения на обкладках его конденсаторов было прямо пропорционально температуре обмотки. Когда напряжение на зажимах указанного конденсатора достигает значения соответствующего температуре 10°C , блок управления БУ подает сигнал на выключение цепи нагрева, после чего температура обмотки начинает снижаться (рис.6). Соответственно, напряжение на выходе теплового аналога будет также снижаться. При некотором его значении схема снова будет включена в работу. Очевидно, что колебание температуры будет зависеть от настройки управляющей схемы.

Схему для защиты изоляции обмоток электрических машин от увлажнения с применением теплового аналога можно также использовать после отключения нагрузки. В этом случае моделируется не процесс нагрева, а процесс охлаждения. Тогда схема работает следующим образом. В момент отключения машины, точка $t_{огк}$ (рис.4) соответствует началу процесса ее остывания. Этот процесс будет продолжаться до момента времени t_2 , соответствующий превышению температуры контролируемой обмотки на 10°C . При этом напряжение на выходе теплового аналога также снижается до некоторого значения, соответствующего указанной температуре. Тем самым образуется сигнал на включение схемы превентивного подогрева. Следовательно, при использовании теплового аналога, моделирующего тепловое состояние машины, подключение системы подогрева осуществляется лишь после снижения температуры обмотки, что способствует экономии электроэнергии.

Четвертая глава посвящена анализу проведенных экспериментальных исследований. В ней описываются методика и результаты экспериментов, которые подтвердили техническую возможность восстановления сопротивления электроизоляции путем непосредственного подогрева предварительно увлажненной обмотки. Также установлено экспериментом, что нагрев до температуры, превышающей окружающую на 10°C , является оптимальным для исключения возможности образования конденсата влаги.

При нагреве увлажненной изоляции электрооборудования по расчетным параметрам превентивного подогрева превышение температуры защищаемого объекта достигает установившегося значения 10°C , а при измерении сопротивления изоляции электрооборудования во время

нагрева наблюдалось улучшение состояния изоляционного материала, как это показано на рис. 7 для машины постоянного тока, принимая во внимание, что в увлажненном состоянии замер сопротивления изоляции обмоток якоря и возбуждения дал следующие результаты: $R_{из.я} = 150 \text{ кОм}$; $R_{из.воз.} = 350 \text{ кОм}$.

Результаты нагрева представлены на рис. 7, из которого следует, что нагрев до 10°C способствует восстановлению сопротивления изоляции до значения, превышающего минимально допустимое. Установлено экспериментом, что для полного восстановления сопротивления изоляции нагрев следует производить в течении 6 часов.

В заключении на основе проведенных исследований с целью повышения надёжности эксплуатации электрооборудования в условиях влажного тропического климата путём защиты изоляции от увлажнения получены следующие научные и практические результаты:

1. Показано, что непосредственный нагрев электрооборудования электрическим током до температуры, превышающей температуру окружающей среды на 10°C , является достаточным для предотвращения увлажнения изоляции обмоток и поддержания её электрического сопротивления выше минимально допустимого значения.

2. Разработана методика определения параметров превентивного подогрева электрооборудования, позволяющая на основе упрощенных методов теплового расчёта определить их значения без выполнения экспериментов или трудоёмких расчётов на ЭВМ.

3. С целью проверки достоверности расчётов превентивного нагрева упрощенными методами выполнен расчёт теплового состояния электродвигателей с помощью разработанной тепловой схемы замещения и соответствующей ей математической модели на ЭВМ. Расхождение результатов не превышает 10%.

4. Представлены возможные схемы подключения электрооборудования к питающей сети для осуществления превентивного нагрева.

4.1. Нагрев обмотки статора асинхронного двигателя или обмотки якоря синхронной машины, а также катушек электрических аппаратов рекомендуется производить путём подключения к осветительной сети переменного тока посредством регулирующего устройства, если номинальная мощность электрооборудования не превышает 20 кВт; в случае, если P_n превышает 20 кВт, то требуется согласующий трансформатор.

4.2. Нагрев обмотки якоря машины постоянного тока можно производить переменным током по схемам, аналогичным тем, которые применяются для нагрева асинхронных машин и электрических аппаратов.

4.3. В случае использования обмоток возбуждения их необходимо питать постоянным током с применением регулируемого выпрямителя.

5. Рассмотрены варианты управления превентивным нагревом электрооборудования как в ручном, так и в автоматическом режимах. Рекомендовано два варианта автоматического способа управления: с обратной связью и без обратной связи путём программирования времени включения.

6. Предложена схема автоматического управления нагревом с обратной связью по сопротивлению изоляции, а также разработана схема защиты от увлажнения с обратной связью по тепловому состоянию оборудования, отличающаяся тем, что вместо известных методов встраивания датчиков температуры, при которых требуется вскрытие машины, применяется датчик температуры аналогового типа.

7. Выполнен анализ экономической эффективности применения разработанной защиты от увлажнения изоляции электрооборудования, установлено, что с увеличением мощности оборудования экономическая эффективность защиты при прочих равных условиях возрастает.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Дудник М.З., Мохамед Ибрагим М.Д. Обзор способов и средств защиты обмоток электрических машин от увлажнения/Донецкий политехнический институт. - 1992. - 18с. - Деп.:УкрИНТЭИ, №179-УК 92.
2. Дудник М.З., Мохамед Ибрагим М.Д. Определение величины мощности подогрева обмоток электрических машин с целью предотвращения увлажнения их изоляции во время стоянки/Донецкий политехн. ин-т.- 1993. - 9с. - Деп.:ГНТБ Украины 17.06.93, № 1166.
3. Дудник М.З., Васильев Л.А. Мохамед Ибрагим М.Д. Выбор схем подогревания обмоток электрических машин для предотвращения увлажнения изоляции/Донецкий политехн.ин-т. - 1993. - II с.- Деп.: ГНТБ Украины 17.06.93, № 1165.

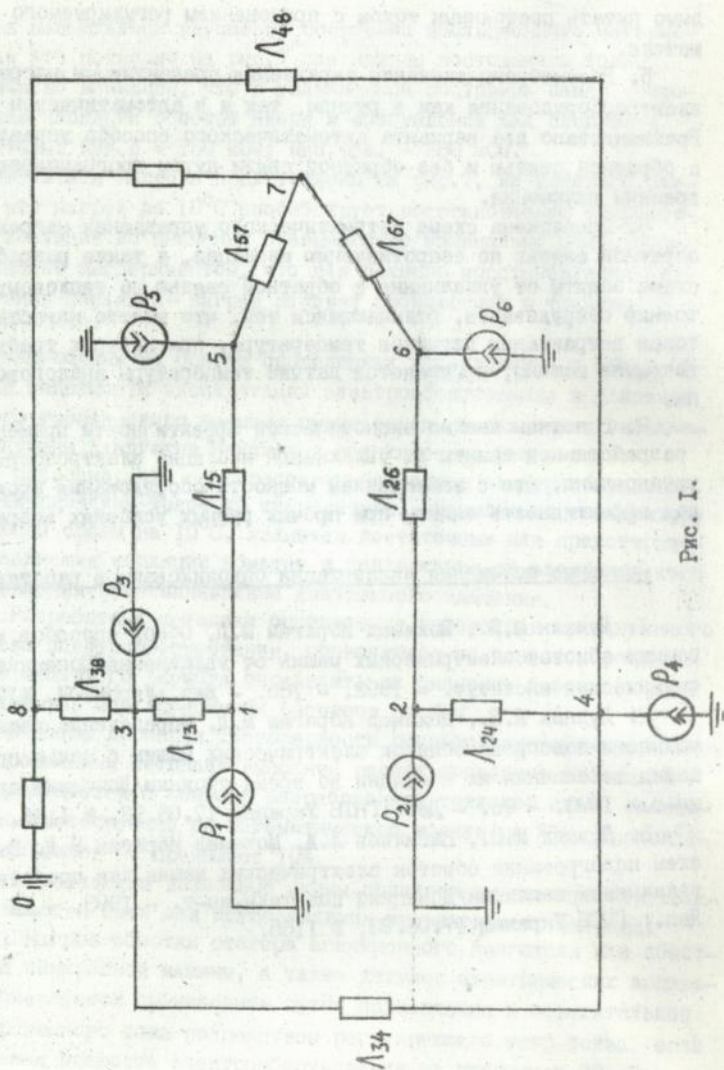


Рис. I.

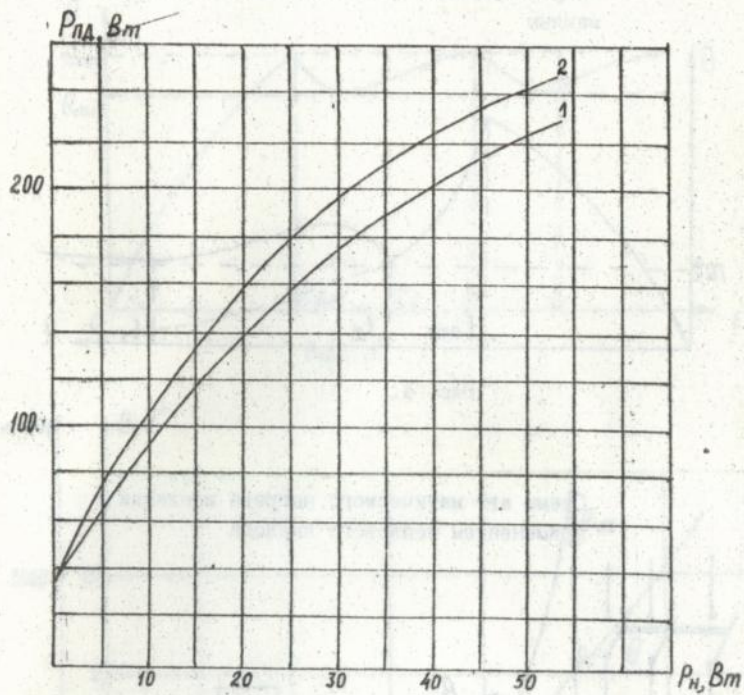


Рис. 2.

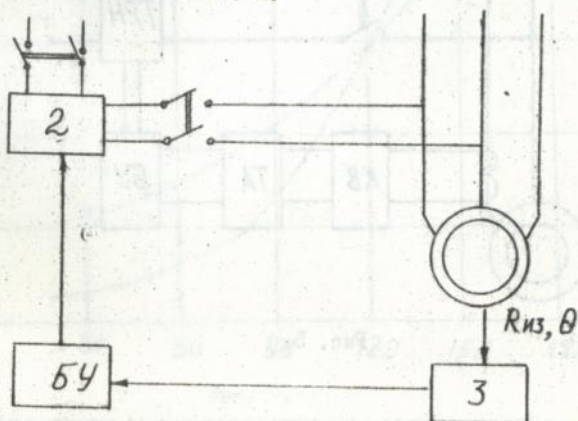


Рис. 3.

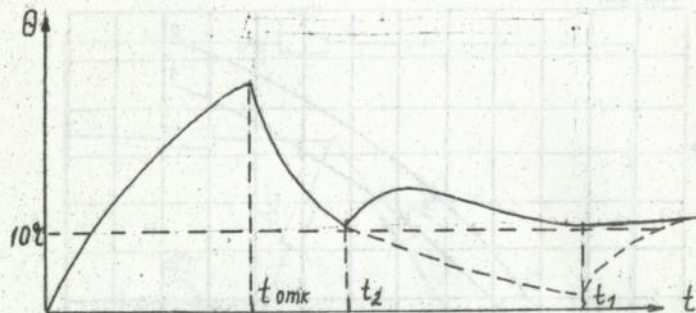


Рис. 4.

Схема автоматического нагрева изоляции с
применением теплового аналога

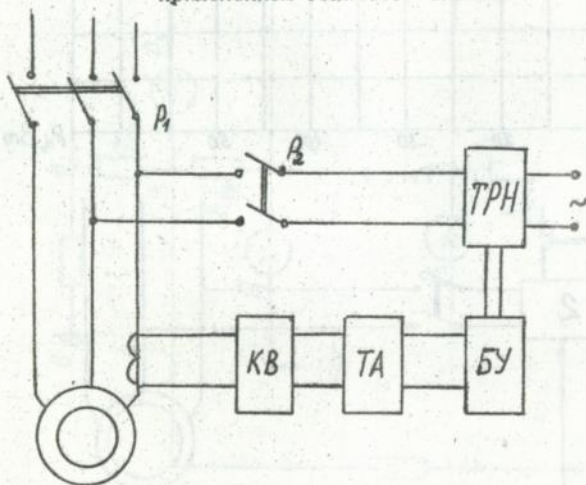


Рис. 5.

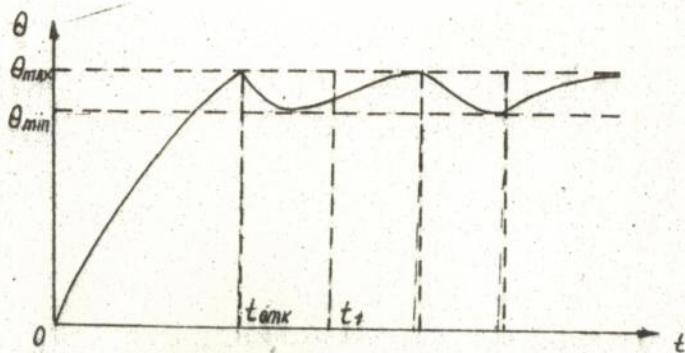


Рис. 6.

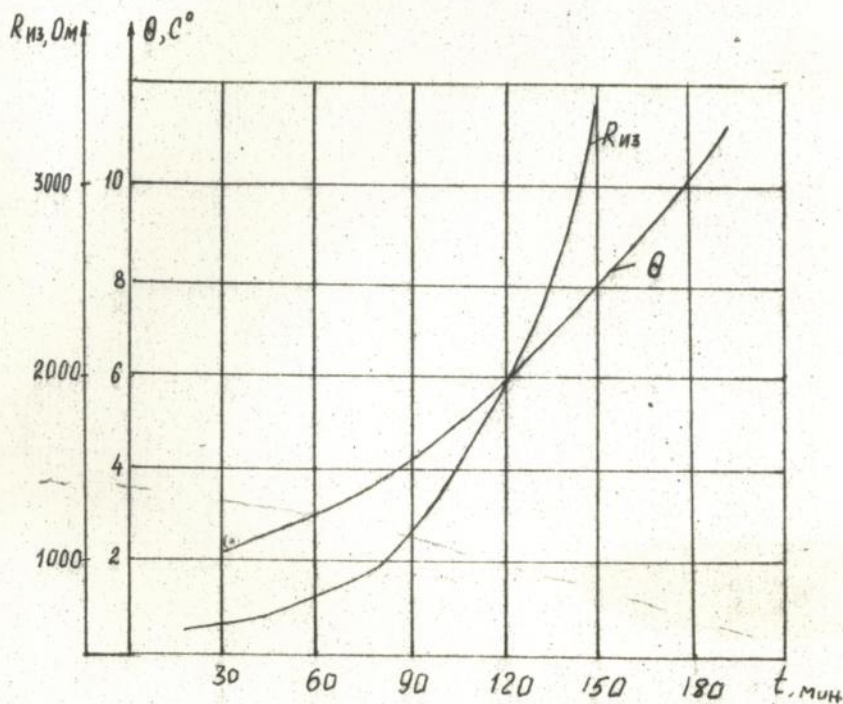


Рис. 7.

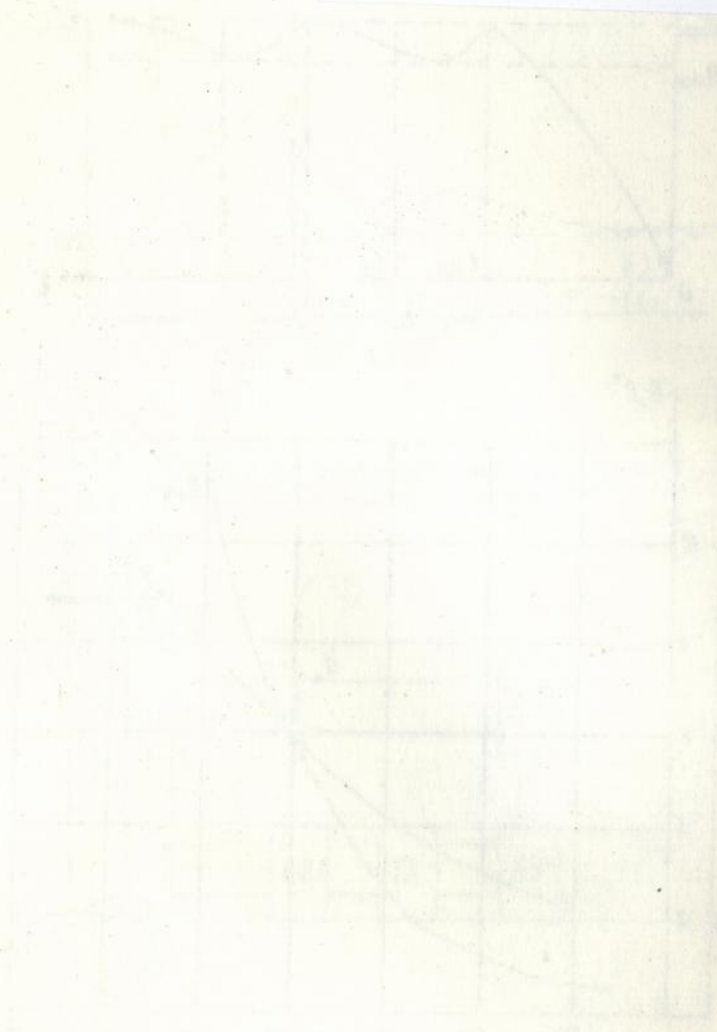
Подп. в печать 11.11.93. Формат $60 \times 84 \frac{1}{4}$. Бумага типогр. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 4-216.

ДГТУ, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМАПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

AB 28.560

AB 28.560



UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE
BUREAU OF PLANT INDUSTRY
WASHINGTON, D. C.