

2. Разлейцев Н. Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. — Харьков: «Вища школа», 1980. — 170 с.
3. Экспериментальное исследование скоростей движения жидкой и газообразной фаз в дизельном топливном факеле / Калужин С. А., Романов С. А., Свиридов Ю. Б. // Двигателестроение. — 1980. — № 7. — С. 5—8.
4. Способ определения скорости импульсного аэродисперсного потока / Евстигнеев В. В., Гуляев П. Ю., Еськов А. В. // Патент RU №2147749. БИМП — №11 20.04.2000. — С. 226—227.
5. Исследование повторяемости и определение скорости фронта импульсного дисперсного потока жидкого топлива. / Матиевский Д. Д., Свистула А. Е., Еськов А. В. и др. // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды Международной научно-технической конференции. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — 263 с.

621.313.2.014:621.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ И ПРОЦЕССОВ СУШКИ УВЛАЖНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Д-р техн. наук, проф. Ш. К. ИСМАИЛОВ, д-р техн. наук, доц. В. П. СМИРНОВ,  
д-р техн. наук, проф. А. М. ХУДОНОВ

*Рассмотрена проблема актуальности исследований режимов и процессов сушки увлажненной изоляции обмоток электрических машин подвижного состава. Приведены факторы, оказывающие существенное отрицательное воздействие на электрическую прочность изоляции обмоток и определены основные задачи обеспечения ее надежности. Описаны как физико-химические процессы, происходящие в объеме твердых тел (в обмотках полюсов, якоря, кабелей), так и на их поверхности, непосредственно подвергающиеся воздействию окружающей агрессивной среды.*

*Предложены новые ресурсосберегающие принципы, методы, способы и средства по сушке увлажненной изоляции ТЭД.*

*The problem of the research's urgency of modes and processes of drying the humidified isolation of electric machines of a rolling stock's windings was examined. The factors rendering essential negative influence on the electric durability of winding's isolation, were given and the primary goals of its reliability's maintenance were determined. Both the physical and chemical processes occurring in the firm body's volume (in windings of poles, anchors, cables), and on a surface, directly exposed to influence of environmental excited environment were described. While in service an electric rolling stock isolation of windings of traction and auxiliary electric machines and electric devices is humidified, that results in sharp reduction of electric durability and demands realization of drying. New alternative principles, methods, ways and means on drying the humidified isolation of the traction electric motor, based on use of a longitude-faltering way of electrocalorifious installation control with a descending level of power capacity for each of the subsequent cycles of the moisture's evaporation from isolation of traction electric machine's windings, were offered. Faltering principles of processes control of drying the humidified isolation will allow receiving not only effect from the savings of energy, but also will provide high quality indicators at use of various methods of drying.*

Анализ статистических данных по отказам электрооборудования электровозов постоянного (ВЛ10 и ВЛ10У, ВЛ11, ВЛ15) и переменного (ВЛ80К,Р,Т,С, ВЛ85) тока на Западно-Сибирской, Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах за последние 25 лет показывает, что на долю ТЭД приходится более 20% от всех неисправностей. Наиболее важным и уязвимым узлом тяговых электродвигателей и вспомогательных электрических машин (ТЭД, ВЭМ) и электрических аппаратов является электрическая изоляция обмоток, полюсов, якоря, катушек



и т. д. Анализ отказов ТЭД ТЛ-2К1, НБ-418К6 и других показывает, что выход из строя двигателей, определяющих надежность работы электроподвижного состава (ЭПС), происходит преимущественно (в 50—60 % случаев) в результате нарушения электрической прочности обмоток главного (ГП) и дополнительного (ДП) полюсов, компенсационной обмотки (КО), обмоток якоря и межвитковых замыканий в них. Одной из серьезных причин повреждения ТЭД является возникновение кругового огня, что приводит к высокой частоте срабатывания защиты от кругового огня. При этом трудоемкость текущего, среднего и капитального ремонта обмоток электрических машин (ЭМ) составляет от 30 до 70 % объема работ.

Основные задачи обеспечения надежности электрической прочности изоляции обмоток ТЭД и ВЭМ — установление закономерностей возникновения отказов в виде электрического пробоя изоляции и межвитковых замыканий, изучение влияния внешних и внутренних факторов на надежность, электрическую прочность изоляционного материала, установление количественных характеристик и методов оценки и расчета надежности, разработка методов испытания на надежность, определение методов обеспечения надежности при проектировании и изготовлении, а также сохранения надежности при эксплуатации и ремонте магнитной системы ТЭД, ВЭМ.

Воздействие эксплуатационных факторов связано также и с режимом хранения или активной эксплуатацией ЭПС. В локомотивах, подвергающихся длительному хранению перед активной эксплуатацией, постепенное изменение свойств и характеристик МПП может иметь доминирующее значение, особенно для изоляции обмоток, чувствительных к влиянию таких внешних факторов, как влажность, атмосферное давление, облучение, состав и загрязнение атмосферы, окружающая температура. Влияние факторов, действующих при активной эксплуатации, зависит от ее режима — от того, является ли этот режим непрерывным, циклическим, случайным повторно-прерывистым или одноразовым, установившимся или переходным. В результате в процессе эксплуатации ЭПС изоляция обмоток тяговых и вспомогательных электрических машин и электрических аппаратов увлажняется, что приводит к резкому снижению электрической прочности и требует проведения сушки.

Для сушки увлажненной изоляции обмоток ТЭД рекомендуется применять горячий воздух от мобильных и стационарных калориферных установок. Однако существующие инструкции, рекомендации и руководства по выбору режимов сушки увлажненной изоляции ТЭД предлагают в начале сушки применять низкую температуру нагрева, а в конце этого процесса доводить ее до значений, предельно допустимых для данного класса изоляции. Например, в руководстве по эксплуатации электровоза ВЛ85 написано: «Начинайте сушку изоляции при температуре воздуха около 50° С, постепенно увеличивая ее до температуры 90—100° С». Проведенные авторами предварительные исследования показали, что такие режимы не только энергозатратны, но и приводят к интенсивному старению изоляции и значительному сокращению срока службы ТЭД. В результате проведенных исследований разработаны и предлагаются новые ресурсосберегающие принципы, методы, способы и средства по сушке увлажненной изоляции ТЭД, которые необходимо целенаправленно внедрять в практику структурных предприятий железнодорожного транспорта путем применения управляемых электрокалориферных установок. Сущность новых принципов сушки состоит в том, что используется широтно-прерывистый способ управления электрокалориферной установкой с нисходящим уровнем энергетической мощности для каждого из последующих циклов. Этот способ предлагается применять для испарения влаги из изоляции обмоток тяговых электрических машин с повышенным влагосодержанием.

В последние годы работами академика М. Ф. Казанского и его учеников на основании термограмм сушки установлен ряд сингулярных точек, характеризующих различные



формы связи влаги с капиллярно-пористыми коллоидными телами, к которым можно отнести и изоляцию обмоток ТЭД [1]. По схеме М. Ф. Казанского вся влага разделяется на влагу физико-механической и физико-химической связей. Количество энергии для отрыва 1 моля воды с физико-механической связью необходимо в несколько раз меньше, чем количество энергии для отрыва 1 моля воды с физико-химической связью. При физико-механической связи влаги с изоляцией ТЭД основная масса воды является свободной и сохраняет свои свойства. Слой воды, связанный адсорбционно, меняет свои свойства. Можно полагать, что вода в изоляции ТЭД имеет в основном физико-механическую связь и лишь незначительный процент воды — с физико-химической связью. На резкое снижение диэлектрических свойств изоляции обмоток ЭМ будет оказывать значительное влияние влага с физико-механической связью, так как она структурно представляет связь в микро- и макрокапиллярах, которые и будут средой для электрического пробоя изоляции обмоток полюсов, якоря.

Электрический пробой изоляции обмоток ТЭД, ВЭМ представляет собой сложный комплекс разнообразных физических процессов и явлений: электрических, механических, тепловых и т. д. Характерной особенностью электрического пробоя, который в чистом виде возникает в достаточно однородном поле, в отсутствии краевых разрядов, при кратковременном приложении напряжения, является возрастание тока перед пробоем с увеличением напряжения приблизительно по экспоненциальному закону и почти скачкообразное увеличение тока при достижении определенной напряженности поля (при пробое): образующийся большой ток способен расплавить, обуглить или сжечь диэлектрик — изоляцию обмотки и саму обмотку — медную шину, при небольшом токе в месте пробоя остается след в виде прокола или прорыва.

Наиболее вероятным механизмом электрического пробоя изоляции — материалов диэлектриков обмоток ЭМ — является ударная ионизация электронами или ионами. При движении в решетке твердого тела электроны проводимости отдают энергию, полученную от электрического поля, атомам или ионам кристалла, вызывая ионизацию. При некоторой напряженности поля ударная ионизация приводит к резкому увеличению концентрации носителей в зоне проводимости.

В порах, воздушных (газовых) включениях, имеющихся в диэлектрике, при достаточно высоких напряжениях, превышающих напряжение ионизации, возникают электрические разряды, в результате которых также создаются условия для пробоя диэлектрика.

В процессе пробоя материалов диэлектриков можно выделить три стадии [2]: формирование разряда, в конце которого между электродами создается проводящий путь и наблюдается резкое возрастание электропроводимости; завершение разряда, когда напряжение на материале диэлектрика спадает практически до нулевого значения; послепробойная, в которой значение тока определяется, в основном, параметрами разрядного контура. Стадия формирования разряда — электронной лавины представляет собой потерю электрической прочности изоляции обмоток и протекание процессов в последующих стадиях.

Вероятность образования в материале диэлектрика электронной лавины с числом электронов, равным или большим числа пор, необходимых для пробоя, или с числом лавин в секунду, способных вызвать пробой, определяется по формуле [2, 3]

$$P = n_0 \exp\left(-\frac{n_{\text{пр}}}{n}\right), \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  — средний размер электрической лавины,  $\bar{n} = e^{\alpha \lambda_u}$ ;  $\alpha$  — толщина диэлектрика;  $\lambda_u$  — средний свободный пробег электрона между ионизационными столкновениями;  $n_0$  — число начальных свободных электронов, появляющихся в материале диэлектрика



в 1 с. С увеличением напряженности поля или толщины изоляции обмоток величина  $P$  приближается к единице.

Разрушение материала диэлектрика в стадии завершения разряда и послепробойной стадии значительно больше, чем в стадии формирования разряда. В стадии завершения разряда (стадии разрушения) выделяется энергия по крайней мере на три порядка большая, чем в стадии формирования разряда [2].

Согласно представлениям, изложенным в [3], при пробое, происходящем в «слабейшем звене», типичные повреждения представляют собой мелкие каналы (необязательно прямые), проходящие от одного электрода до другого. Обычно такой пробой рассматривается как катастрофическое, быстропротекающее явление. Однако во многих случаях конечному разрушению может предшествовать происходящее в течение длительного времени прогрессирующее развитие одного или многих мелких разветвленных (древовидных) полых каналов; конечный пробой происходит по одному из этих каналов, который представляет собой путь тока. Росту древовидных каналов в изоляции обмоток ЭМ способствует местный высокий градиент поля, который может образоваться из-за пустот внутри изоляции обмотки, проводящих включений и т. п.

Существующие теории электрического пробоя диэлектрика принимают или за основную стадию пробоя, или стадию нарушения электрической прочности, или стадию разрушения изоляции — материала диэлектрика. Однако даже в современных теориях достаточно подробно не рассматривается переход первой стадии во вторую, т. е. процесс развития пробоя.

Как правило, при возникновении электрических разрядов в диэлектриках происходят химические изменения. Так, например, исследования показали [3], что при воздействии разрядов на полиэтилен низкой плотности в атмосфере азота наблюдается образование поперечных связей, повышение степени насыщенности и обусловленное этим выделение водорода.

Общность закономерностей процессов электрического и механического разрушения твердых тел проявляется, в частности, в том, что электрическая прочность материала диэлектрика пропорциональна его механической прочности; для диэлектрика, находящегося в электрическом поле, напряженность которого достигает величины электрической прочности  $E_{np}$ , электрическая прочность и максимальная сила взаимодействия частиц  $F_m$ , соответствующая теоретической прочности при любом виде разрушения (механическом, электрическом, тепловом), связаны зависимостью [2]

$$q_u E_{np} = F_m = (E_m r_0^{-1} \gamma_s)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $E_m$  — модуль упругости;  $r_0$  — равновесное расстояние между ионами (параметр решетки);  $\gamma_s$  — поверхностная энергия (энергия образования свободных поверхностей при разрушении);  $q_u$  — величина заряда иона.

Как видно из (2), электрическая и механическая прочность изоляции обмоток МПТ растет с увеличением поверхностной энергии и, следовательно, энергии кристаллической решетки, а также с увеличением модуля упругости и уменьшается с увеличением параметра решетки.

Из (1) для частоты лавин, которые могут вызвать пробой, можно определить среднее время статистического запаздывания пробоя [3]:

$$t_{ст} = \frac{1}{n_0} \exp\left(\frac{n_{np}}{n}\right). \quad (3)$$



Экспериментальные данные показывают [3], что в достаточно однородном поле для обычных образцов твердых диэлектриков среднее время статистического запаздывания пробоя не превышает  $10^{-7}$  с.

Зависимость пробивного напряжения материала диэлектрика от времени воздействия напряжения определяется вольт-секундной характеристикой. При незначительном времени воздействия напряжения пробивное напряжение с уменьшением этого времени обычно возрастает.

Макроскопическая неоднородность структуры, свойственная большинству технических диэлектриков (наличие пор, воздушных и других включений), как отмечалось выше, оказывает существенное влияние на развитие электрического пробоя и значение пробивной напряженности (или пробивного напряжения). Для неоднородных диэлектриков увеличение их толщины или площади электронов сопровождается уменьшением пробивного напряжения на единицу толщины в связи с увеличением вероятности неблагоприятного распределения слабых мест (вероятности того, что слабые места диэлектрика окажутся между электродами) [3]. Нарушение электрической прочности конденсаторной бумаги обусловлено пробоем электрически более слабых воздушных включений, вслед за которым происходит пробой клетчатки и образца в целом. Установлено, что вследствие электрических разрядов в воздушных включениях все известные пористые диэлектрики обладают пониженным пробивным напряжением по сравнению с однородными диэлектриками (иногда на порядок и более).

Процессы, приводящие к пробое изоляции обмоток ТЭД, ВЭМ, различны для разных типов пористых неорганических и органических диэлектриков и зависят от их физико-химических свойств. В органических диэлектриках электрические разряды вызывают эрозию диэлектрика, образование углубленных пор, которые при достаточной длительности действия напряжения все более удлиняются, что, в конце концов, приводит к пробое изоляции — материала диэлектрика обмоток электрических машин.

Электрический пробой изоляционного материала происходит обычно при весьма высоких значениях напряженности электрического поля — порядка  $10^6$  В/см, когда в диэлектрике появляется добавочная электронная электропроводность.

Механизм электрического пробоя изоляции увязывают с электронными процессами, возникающими с предпробивным состоянием. Сам электрический пробой происходит в две стадии: первая — собственно нарушение электрической прочности материала диэлектрика, связанное с нарастанием электрической проводимости, и вторая — разрушение материала диэлектрика как вторичное явление. Вторая стадия уже связана с тепловыми процессами, по-видимому, с нагреванием влаги в узком канале, в котором развивалась первая стадия. В отличие от электротеплового пробоя тепловое разрушение при электрическом пробое является не причиной, а его следствием.

Анализ многочисленных термограмм и кривых кинетики процесса сушки изоляции с физико-механической связью влаги показывает, что для удаления свободной влаги в начальный момент процесса сушки целесообразно подводить большое количество энергии до достижения предельно допустимой температуры для данного класса изоляции с целью интенсификации процесса влагоудаления и сокращения времени на процесс сушки по мере удаления влаги из изоляции обмоток ЭМ. Уровень подводимой энергии необходимо снижать и поддерживать оптимальную температуру для данного класса изоляции обмоток полюсов, якоря ТЭД с позиций устранения явлений, связанных с ее старением от воздействия высокой температуры.

В связи с этим время работы электронагревателя калорифера в первом цикле можно определить по следующему выражению [1]:



$$\tau_{01} = T_n \ln \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - T_n V_{\text{пред доп}}}, \quad (4)$$

где  $T_n$  — постоянная величина времени нагрева ТЭД;  $t_{\max}$  — предельно допустимая температура для данного класса изоляции;  $V_{\text{пред доп}}$  — предельно допустимая скорость нагрева для данного класса изоляции. Выражение (4) получено из анализа дифференциального уравнения нагрева ТЭД.

Значительный объем научно-исследовательских работ по выбору методов и режимов сушки увлажненной изоляции тяговых электрических машин выполнен сотрудниками Уральского отделения ВНИИЖТа [4]. На основании исследований ими были сформулированы классические положения по энергосберегающим методам и режимам сушки увлажненной изоляции ТЭД и электрических аппаратов. Было установлено, что сушка изоляции воздухом, нагретым до 50—70° С, требует примерно в 1,5 раза большего времени, чем при температуре 90—100° С. Чтобы ускорить процесс электрокалориферной сушки, было предложено через каждые три — четыре часа отключать питание электронагревателей, не выключая вентиляторов установки. К сожалению, эти рекомендации не полностью были реализованы в производственных условиях, а большая часть инструкций и руководств по эксплуатации ЭПС рекомендует начинать сушку увлажненной изоляции при низкой температуре теплоносителя.

Разработанная к настоящему времени модель старения изоляции электрооборудования от воздействия температуры в процессе эксплуатации ЭПС позволяет использовать ее и при анализе процессов сушки увлажненной изоляции. Первые работы по определению срока службы изоляции относились, в основном, к изоляции класса А (индекс нагревостойкости 105° С). Нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях перегрева повышенной температуры. В результате исследований было сформулировано так называемое «правило восьми градусов», согласно которому превышение температуры на каждые восемь градусов сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое. Однако это правило было сформулировано на основе уравнения, полученного эмпирическим путем, и данными положениями можно пользоваться только при ориентировочных расчетах и в тех случаях, когда процесс сушки изоляции обмоток ТЭД идет при неизменной температуре. В большинстве практических случаев режимы сушки таковы, что температура изоляции в процессе сушки не остается постоянной. При анализе влияния переменной температуры на старение изоляции целесообразно применять методы эквивалентирования и идентификации тепловых режимов с введением производной от температуры.

Одна из задач настоящих исследований состояла в обосновании ресурсосберегающих режимов электрокалориферной сушки увлажненной изоляции обмоток ТЭД. В связи с этим рассмотрим и проанализируем различные варианты сушки увлажненной изоляции при помощи электрокалориферных установок. Как известно, этот метод является основным для сушки изоляции обмоток ТЭД.

Технологический процесс сушки увлажненной изоляции ТЭД с помощью электрокалориферной установки можно организовать с позиций энергоподвода и выбора соответствующего режима — постоянного или прерывистого энергоподвода.

При постоянном энергоподводе нагревательные элементы и вентилятор электрокалорифера остаются включенными в течение всего процесса сушки. При прерывистом энергоподводе происходит чередование периодов включения и отключения нагреватель-



ных элементов при постоянно включенном вентиляторе. С позиций ресурсосбережения наибольший интерес для исследований и практики представляет прерывистый энергоподвод. График работы электронагревателя калорифера в прерывистом режиме приведен на рис. 1.

Принцип работы аппарата управления электронагревателя калорифера следующий: при помощи специального устройства, работающего как ключ, периодически присоединяют к источнику питания электронагреватель калорифера, а затем отключают его. Замыкание и размыкание ключа происходит с периодом повторения  $\tau_{\text{ц}}$ . В течение промежутка  $\tau_{\text{р}}$  ключ замкнут, а в промежутке времени  $\tau_{\text{н}}$  ключ разомкнут и электронагреватель выключен. Среднее значение мощности электронагревателя зависит от соотношения величин  $\tau_{\text{р}}$  и  $\tau_{\text{н}}$ . Отношение  $\tau_{\text{р}}$  к  $\tau_{\text{ц}}$  назовем коэффициентом относительно продолжительного включения электронагревателя калорифера и обозначим этот параметр через  $E$ . Таким образом, коэффициент относительной продолжительности включения электронагревателя можно определить по следующему выражению:

$$E = \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{р}} + \tau_{\text{н}}} \quad (5)$$

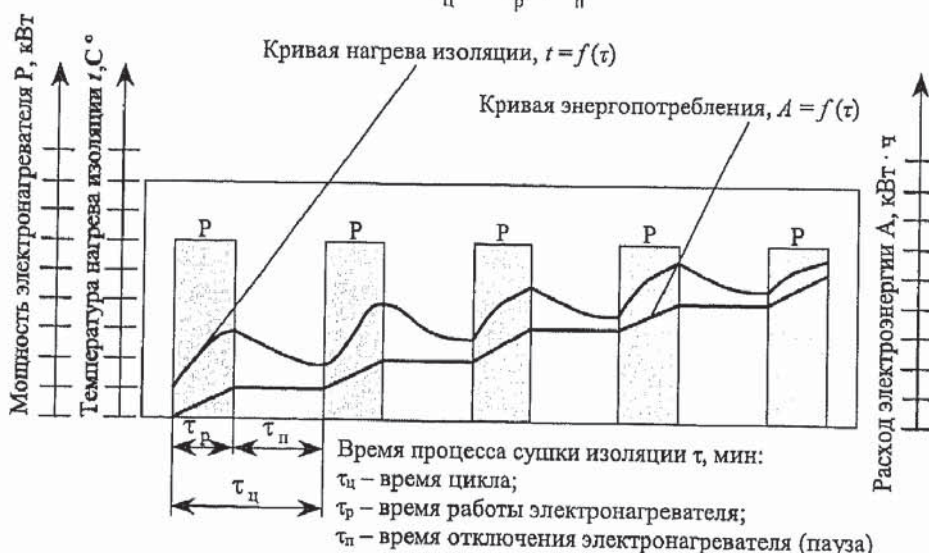


Рис. 1. График работы электронагревателя калорифера в прерывистом режиме сушки изоляции обмоток ТЭД

В результате, изменяя значения  $\tau_{\text{р}}$  и  $\tau_{\text{н}}$ , можно регулировать среднее значение мощности нагревателя электрокалорифера и управлять процессом сушки увлажненной изоляции. При этом кривая нагрева изоляции обмоток ТЭД будет иметь пилообразный вид, отражающий процесс сушки при прерывистом нагреве. Через определенное время температурный режим при прерывистом энергоподводе практически установится (стабилизируется) и общий подъем кривой нагрева изоляции обмоток ТЭД прекратится. Электропотребление на процесс сушки определится положением крайней правой точки кривой энергопотребления с учетом масштаба шкалы расхода электроэнергии.

Включение и отключение электронагревателей калорифера при прерывистом энергоподводе можно осуществлять двумя принципиально различными методами управления электронагревателем: широтно-прерывистым или частотно-прерывистым.

Принцип регулирования энергоподводом в процессе сушки увлажненной изоляции путем широтно-прерывистого метода управления электронагревателем, базируется на том, что сохраняется неизменный период цикла  $\tau_{\text{ц}}$ , в течение которого происходят включение



и отключение электронагревателя, а изменяется лишь интервал времени работы  $\tau_p$ , в течение которого происходит его включение. Оставляя постоянным интервал  $\tau_p$  и изменяя период цикла  $\tau_{\text{ц}}$ , получим частотно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера.

Наиболее подробно авторами исследован широтно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера — три его режима: с постоянным уровнем энергетической мощности в каждом цикле, с повышением и с понижением этого уровня.

При исследовании режимов широтно-прерывистого энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции была учтена инструкция МПС ЦТ/814 [1]. Для ускорения процесса удаления влаги из внутренних слоев изоляции и охлаждения коллекторных пластин под щетками данной инструкцией рекомендуется через четыре—пять часов снизить температуру воздуха до 50—60° С. Выполнить эту рекомендацию можно при организации процесса сушки увлажненной изоляции методом широтно-прерывистого энергоподвода с понижением уровня энергетической мощности в каждом цикле, т. е. так, как это показано на рис. 2.

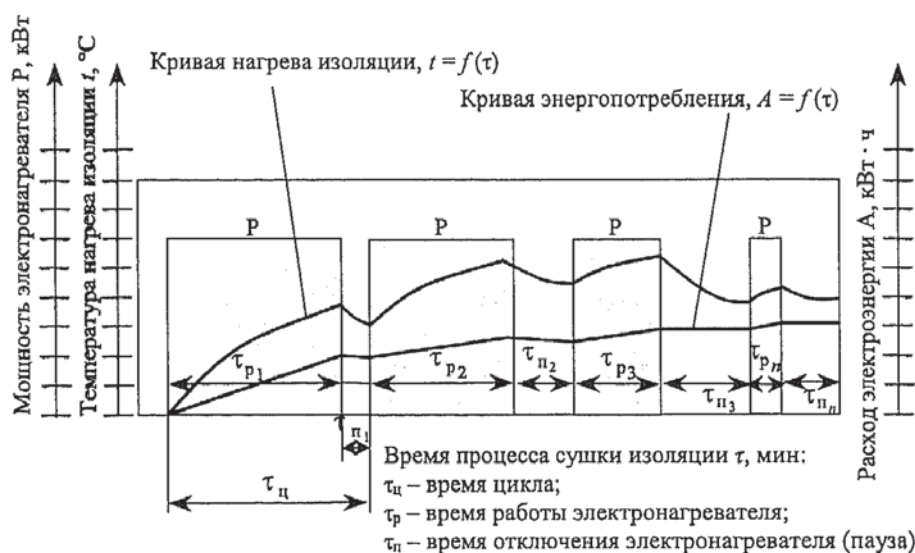


Рис. 2. График работы электронагревателя калорифера по методу широтно-прерывистого энергоподвода с понижением уровня энергетической мощности в каждом цикле

Так как влага находится, в основном, в поверхностных слоях изоляции обмотки, то в период интенсивного нагрева большая часть ее будет удалена в первых циклах процесса сушки. Чередование периодов интенсивного нагрева изоляции с интенсивной вентиляцией позволяет использовать эффект внутреннего термовлагопереноса и завершить процесс с повышением уровня энергетической мощности в каждом цикле сушки с минимальными затратами энергии и на сравнительно низком температурном режиме. А это, в свою очередь, позволит не только значительно сократить расход энергии, но и в значительной степени обеспечить более высокую надежность изоляции после сушки и уменьшить показатели ее старения. Принципиально другая картина будет при организации процесса сушки увлажненной изоляции методом широтно-прерывистого энергоподвода с повышением уровня электрической мощности в каждом цикле, т. е. так, как это показано на рис. 3. Увеличение температуры к концу процесса сушки приведет не только к повышенным затратам энергии, но и к необратимым процессам в изоляции тяговых двигателей и к сокращению срока их службы.

На основании многочисленных исследований были установлены закономерности управления широтно-прерывистым и частотно-прерывистым методами сушки увлажненной



изоляции ТЭД и электрических аппаратов. Математическое описание этих закономерностей совпадает с разложением показательной функции в степенной ряд Маклорена. Закон регулирования можно представить в виде этого ряда с показателем степени, учитывающим уровень увлажнения ТЭД и постоянное время нагрева. Прерывистые принципы управления процессами сушки увлажненной изоляции позволят получить не только эффект от

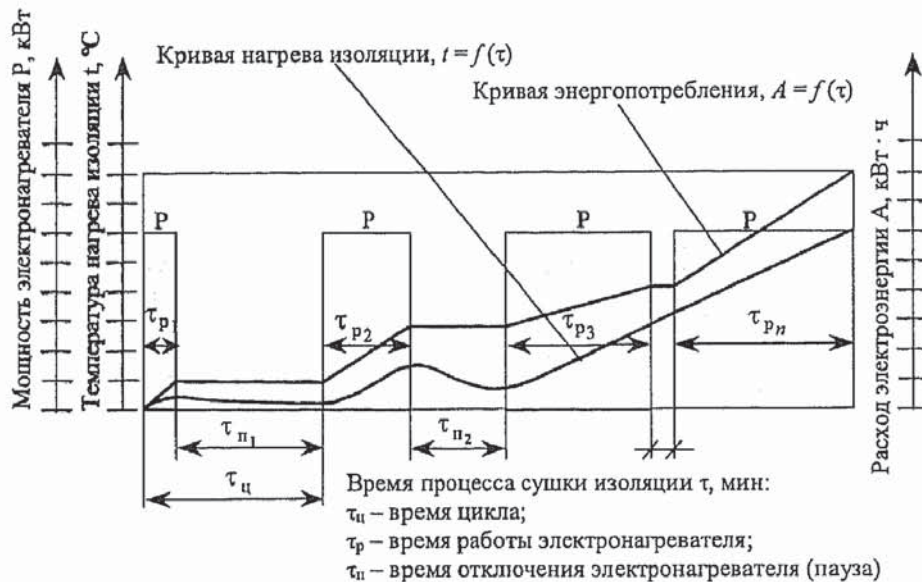


Рис. 3. График работы электронагревателя калорифера по методу широтно-прерывистого энергоподвода

сбережения энергии, но и высокие качественные показатели при использовании различных методов сушки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.
2. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. — М.: Высшая школа, 1966. — 224 с.
3. Сканиави Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). — М.: Физматгиздат, 1958. — 195 с.
4. Соболев В. М., Левитский В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Электрическая и тепловозная тяга. — 1975. — № 1. — С. 23, 24.
5. ЦТ/814 от 10.04.01, Инструкция по подготовке к работе и техническому обслуживанию электровозов в зимних и летних условиях. — М.: Транспорт, 2001. — 72 с.