

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ УВЛАЖНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.П.Смирнов, А.М Худонов

Длительная и безаварийная работа электрооборудования ЭПС во многом определяет эффективность железнодорожного транспорта. Большую роль при этом играют тяговые электрические машины и аппараты. Это объясняется тем, что выход из строя тяговых электрических машин и аппаратов приводит к нарушению взаимосвязанных технологических циклов на железнодорожном транспорте.

Наиболее важным и уязвимым звеном тяговых электрических машин и аппаратов являются их обмотки. От 90 до 95% всех отказов электрооборудования на ЭПС приходится на неисправности обмоток. Трудоемкость текущего, среднего и капитального ремонта обмоток составляет от 30 до 70% общего объема работ. В свою очередь, в обмотках наиболее ненадежным элементом является их изоляция. В процессе эксплуатации ЭПС изоляция тяговых электрических машин и аппаратов увлажняется, что приводит к резкому снижению ее электрической прочности и требует проведения сушки. Статистические данные по надежности электрооборудования электровозов ВСЖД за последние пять лет показывают, что на долю тяговых электродвигателей (ТЭД) приходится более 20% от всех неисправностей.

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 тяговых электродвигателей предлагают в начале процесса сушки применять низкие температуры нагрева, а в конце процесса сушки температуру нагрева доводить до значений предельно допустимых для данного класса изоляции. Например, в руководстве по эксплуатации ВЛ85 написано: "Начинайте сушку изоляции при температуре воздуха около 50 °С, постепенно увеличивая до температуры 90-100° С". Проведенные нами предварительные исследования указали, что такие режимы не только энергозатратны, но и приводят к интенсивному старению изоляции и сокращению срока службы ТЭД. Нами разработаны новые ресурсосберегающие принципы, методы, способы и средства по сушке

увлажненной изоляции ТЭД, которые необходимо внедрять в практику железнодорожного транспорта путем применения управляемых электрокалориферных установок. Сущность новых принципов сушки состоит в том, что используется широко-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 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 капиллярнопористыми коллоидными телами, к которым можно отнести и изоляцию (1). По схеме М.Ф. Казанского вся влага разделяется на влагу физико-механической и физико-химической связи. Количество энергии для отрыва 1 моля воды с физико-механической связью в несколько раз меньше количества 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 будет оказывать значительное влияние влаги с физико-механической связью, так как она структурно представляет связь в микро- и макрокапиллярах, которые и будут являться средой для пробоя изоляции. Электрический пробой происходит обычно при весьма высоких напряженностях электрического поля порядка 10^6 В/см, когда в диэлектрике появляется добавочная электронная электропроводность. Механизм электрического пробоя увязывают с электронными процессами, возникающими с предпробивным состоянием. Сам пробой происходит в две стадии - первая стадия собственно нарушение электрической прочности, связанное с нарастанием электрической проводимости, и вторая стадия-разрушение диэлектрика как вторичное явление. Вторая стадия уже связана с тепло-

выми 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 самого пробоя, а его следствием.

Анализ термограммы и кривой 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 уровень подводимой энергии необходимо снижать и поддерживать оптимальную температуру для данного класса изоляции с позиций устранения явлений, связанных со старением ее от воздействия высоких температур.

Время работы нагревателя калорифера в первом цикле определяется из выражения (1):

$$\tau_{01} = T_n \ln \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} - T_n \cdot V_{\text{преддоп}}}, \quad (1)$$

где T_n – постоянная времени нагрева ТЭД;

$t_{\max}$ – предельно допустимая температура для данного класса изоляции;

$V_{\text{преддоп}}$ – предельно допустимая скорость нагрева для данного класса изоляции.

Выражение (1) получено из анализа дифференциального уравнения нагрева ТЭД.

Большой объем научно-исследовательских работ по выбору методов и режимов сушки увлажненной изоляции тяговых электрических двигателей был выполнен сотрудниками Уральского отделения ВНИИЖТа (2). На основании исследований были сформулированы классические положения по энергосберегающим методам и режимам сушки увлажненной изоляции тяговых электрических машин и аппаратов. Было установлено, что сушка изоляции воздухом нагретым до 50-70 °С требует примерно в 1,5 раза больше времени, чем при температуре 90-100 °С. Чтобы ускорить процесс электрокалориферной сушки, было предложено через каждые 3-4 часа отключать питание электронагревателей, не выключая вентилятора установки. К сожалению, эти рекомендации не полностью были реализованы в производственной практике и большая часть инструкций и руководств по эксплуатации ЭПС рекомендуют начинать сушку увлажненной изоляции при низких температурах теплоносителя.

Разработанные к настоящему времени модели старения изоляции электрооборудования от воздействия температур в процессах эксплуатации позволяют использовать их 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 повышенных температур. 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 этими 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.

Целью наших исследований является обоснование ресурсосберегающих режимов электрокалориферной сушки увлажненной изоляции обмоток ТЭД.

Рассмотрим и проанализируем различные варианты сушки увлажненной изоляции при помощи электрокалориферных установок. Известно, что этот метод применяется для сушки изоляции ТЭД.

Технологический процесс сушки увлажненной изоляции ТЭД с помощью электрокалориферной установки можно с позиций энергоподвода и выбора режима организовать по следующим схемам:

- постоянный энергоподвод;
- прерывистый энергоподвод.

При постоянном энергоподводе нагревательные элементы и вентилятор электрокалорифера остаются включенными в течение всего процесса сушки изоляции. При прерывистом энергоподводе происходит чередование периодов включения и отключения нагревательных элементов при постоянно включенном вентиляторе. С позиций ресурсосбережения наибольший интерес для исследования представляет прерывистый энергоподвод. График работы электронагревателя калорифера в прерывистом режиме приведен на рис.1.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ УВЛАЖНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

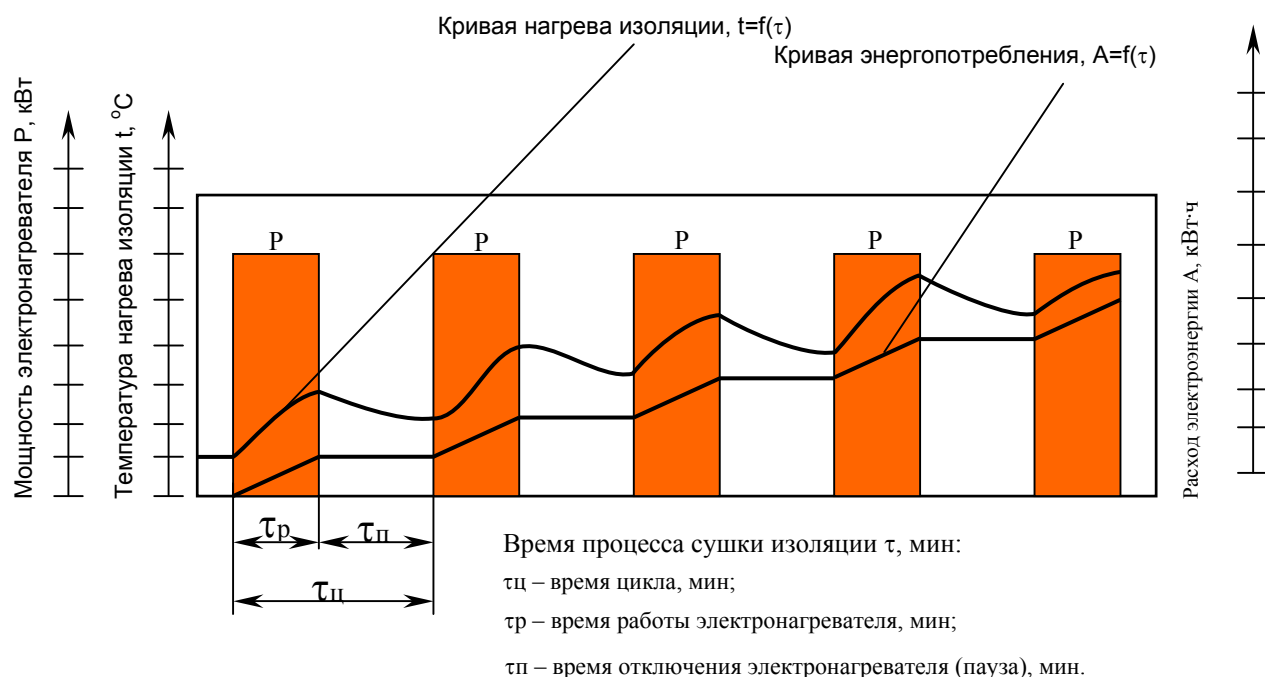


Рис. 1

Поясним, как должен работать аппарат управления электронагревателем. При помощи специального устройства, работающего как ключ, периодически присоединяют к источнику питания электронагреватель калорифера и затем отключают его. Замыкание и размыкание ключа происходит с периодом повторения $\tau_{\text{ц}}$. В течение промежутка времени $\tau_{\text{р}}$ ключ замкнут, а в течение промежутка времени $\tau_{\text{п}}$ ключ разомкнут. Среднее значение мощности электронагревателя зависит от соотношения величин $\tau_{\text{р}}$ и $\tau_{\text{ц}}$. Отношение $\tau_{\text{р}}$ к $\tau_{\text{ц}}$ назовем коэффициентом относительной продолжительности включения электронагревателя и обозначим этот параметр индексом ε . Коэффициент относительной продолжительности включения электронагревателя можно определить по следующему выражению

$$\varepsilon = \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{р}} + \tau_{\text{п}}} \quad (2)$$

Следовательно, изменяя значения $\tau_{\text{р}}$ и $\tau_{\text{ц}}$, можно регулировать среднее значение мощности нагревателя электрокалорифера и управлять процессом сушки увлажненной изоляции. Кривая нагрева изоляции будет иметь пилообразный вид, отражающий процесс сушки при прерывистом нагреве. Через определенное время температурный режим при прерывистом энергоподводе практически установится и общий подъем кривой нагрева изоляции прекратиться.

Электропотребление на процесс сушки увлажненной изоляции определить 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:

- широтно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера;
- частотно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера.

Принцип регулирования энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции путем широтно-прерывистого метода управления электронагревателем калорифера базируется на том, что сохраняется неизменным период цикла $\tau_{\text{ц}}$, в течение которого происходит включение и отключение электронагревателя калорифера, изменяется интервал $\tau_{\text{р}}$, в течение которого происходит включение электронагревателя. Оставляя постоянным интервал $\tau_{\text{р}}$ и изменяя период цикла $\tau_{\text{ц}}$, получим частотно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера.

Наиболее подробно исследован широтно-прерывистый метод управления электронагревателем калорифера. Были исследованы три режима широтно-прерывис-

того энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции:

- с постоянным уровнем энергетической мощности в каждом цикле;

- с повышением уровня энергетической мощности в каждом цикле;

- с понижением уровня энергетической мощности в каждом цикле.

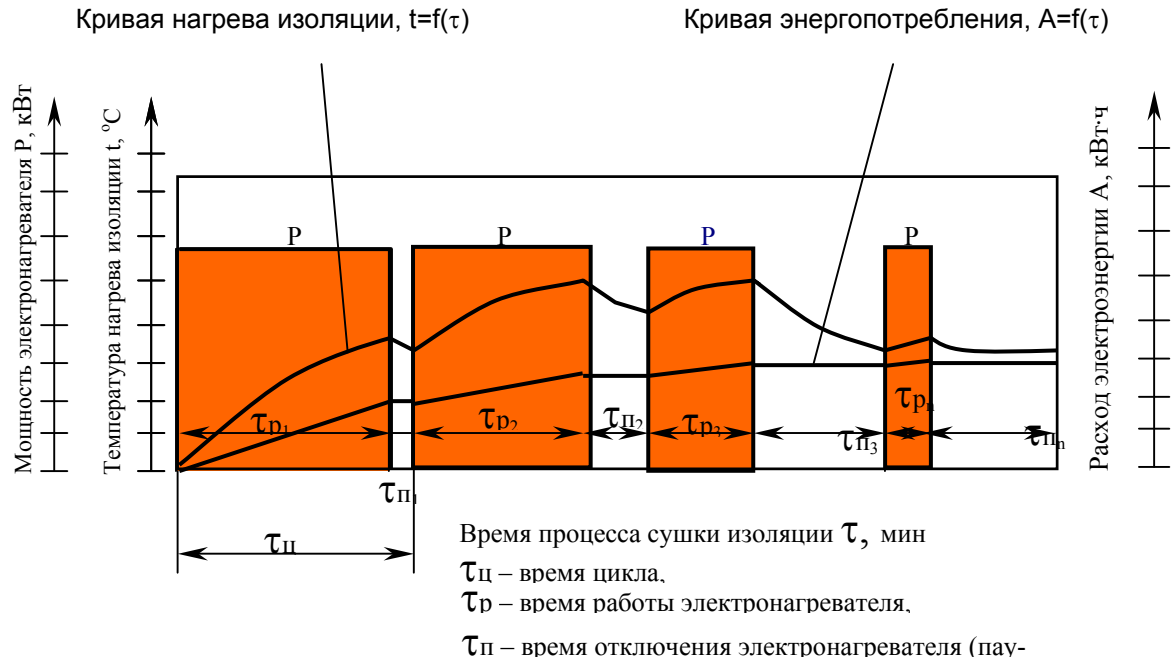


Рис. 2

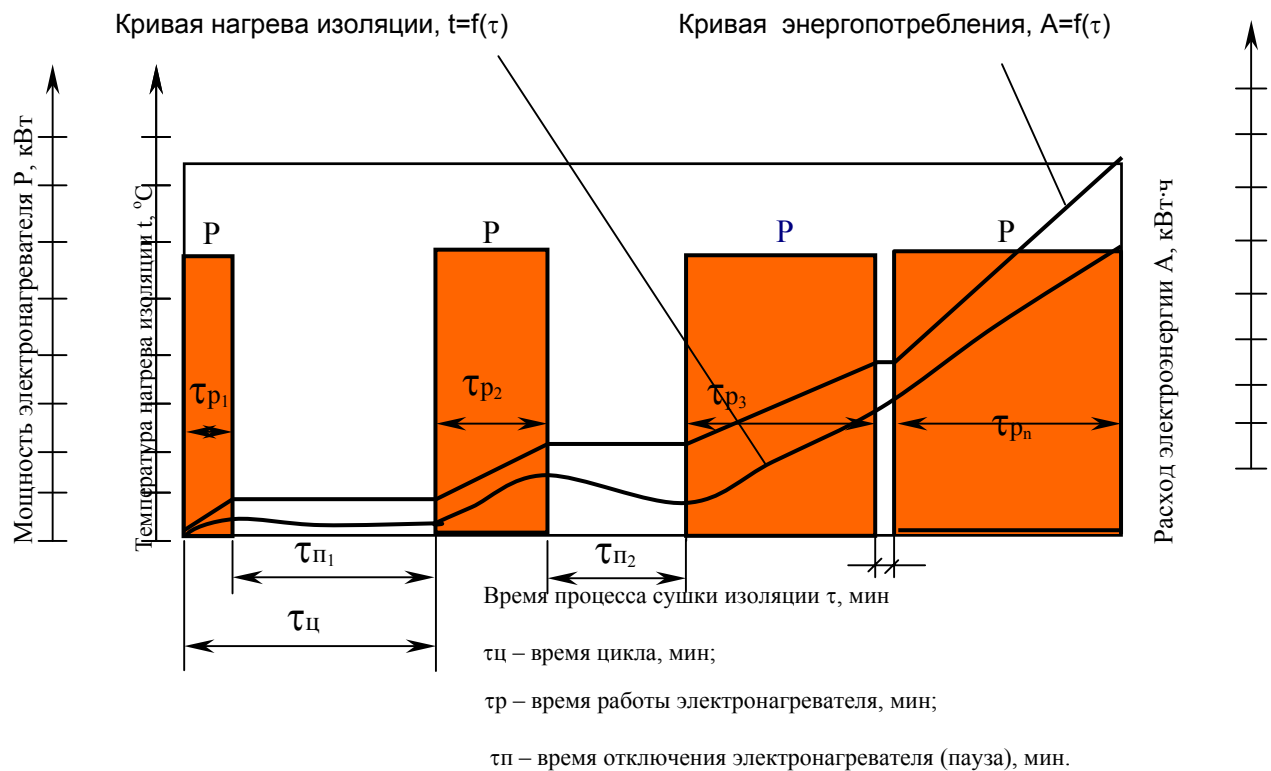


Рис. 3

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ УВЛАЖНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При исследовании режимов широтно-прерывистого энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции была учтена инструкция МПС ЦТ/814/3/. Для ускорения процесса удаления влаги из внутренних слоев изоляции и охлаждения коллекторных пластин под щетками инструкцией рекомендуется через 4-5 ч 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. Так как влага находится в основном в поверхностных слоях изоляции обмотки, то в период интенсивного нагрева большая часть ее будет удалена в первых циклах процесс сушки. Чередование периодов интенсивного нагрева изоляции с интенсивной вентиляцией позволяет использовать эффект внутреннего термовлагопереноса и завершить процесс сушки с минимальными затратами энергии и на сравнительно низком температурном режиме. А это, в свою очередь, позволит не только значительно сократить расход энергии на процесс сушки, 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 энергетической мощно-

сти 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 исследований были установлены закономерности управления широтно-прерывистым и частотно-прерывистым методами сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей и аппаратов. 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 постоянную времени нагрева. Прерывистые принципы управления процессами сушки увлажненной изоляции позволяют получать не только эффект от сбережения энергии, но и высокие качественные показатели при использовании различных методов сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория сушки.- М.: Энергия, 1968. - 472 с.
2. Соболев В.М., Левитский В.М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей. Электрическая и тепловозная тяга, 1975, №1, - С. 23-24.
3. 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.