

ВВЕДЕНИЕ

Для безаварийной работы тяговых электродвигателей (ТЭД) и другого электрооборудования электровозов изоляция их должна быть надежной. В процессе эксплуатации происходит старение электрической изоляции, свойства ее ухудшаются, электрическая прочность снижается. В отдельных случаях ухудшение свойств изоляции носит необратимый характер и завершается пробоем. Однако в большинстве случаев последствия старения могут быть устранины путем восстановительного ремонта изоляции. В связи с этим, чтобы избежать внезапных пробоев изоляции и поддерживать необходимую степень надежности работы электрооборудования, состояние изоляции согласно ПТЭ периодически контролируется и ухудшение ее свойств компенсируется системой планово-предупредительных ремонтов (ППР). Организация обслуживания и ремонта тягового подвижного состава Российских железных дорог основана на системе планово-предупредительного ремонта. При этой системе профилактические и ремонтные работы производятся по времени наработки [33,130].

Так, например, согласно «Правилам ремонта электрических машин электроподвижного состава» [85] тяговые электродвигатели (ТЭД) электровозов от начала эксплуатации после пробега каждых 350 тыс. км обязаны пройти определенный вид ремонта. После пробега первых 350 тыс. км двигатели проходят текущий ремонт (ТР-3), после пробега 700 тыс. км — средний ремонт (СР), после пробега 1050 тыс. км вновь текущий ремонт и, наконец, после пробега 1400 тыс. км — капитальный ремонт (КР). Текущий ремонт изоляции включает в себя ее чистку, а иногда пропитку и сушку. Средний ремонт изоляции всегда включает в себя ее чистку, пропитку и сушку, а капитальный ремонт — полную замену изоляции обмоток ТЭД.

Поскольку объем работ при капитальном ремонте значительно больше, чем при среднем ремонте, то и стоимость капитального ремонта практически на порядок выше стоимости среднего ремонта.

Как показала практика, система поддержания надежности изоляции по пробегу не является оптимальной. Условия эксплуатации ТЭД не одинаковые, следовательно неодинаково происходит и старение изоляции, и не всякий электродвигатель с пробегом 1400 тыс. км обязательно нуждается в замене обмотки. Иногда оказывается достаточным более дешевый средний ремонт ТЭД, т. е. чистка, пропитка и сушка изоляции обмотки. Таким образом, если оценивать реальное состояние изоляции, то можно с меньшими затратами продлить ее срок службы без снижения надежности ее работы. Особенно актуальной такая постановка вопроса становится в современных условиях в связи с острым дефицитом меди и изоляционных материалов.

Такое положение сложилось не только на железнодорожном транспорте. Во многих энергосистемах и в других отраслях народного хозяйства значительная часть электрооборудования эксплуатируется за пределами расчетного срока службы. В связи с этим значительные силы и средства затрачиваются на поддержание надежности оборудования на нормальном уровне за счет проведения планово-предупредительных ремонтов на основе ремонтного цикла с назначенным межремонтным ресурсом, который не учитывает реальных условий эксплуатации электрооборудования и реального состояния его изоляции. Поэтому и в этих отраслях также актуальной становится задача перехода от существующей системы ремонта по времени эксплуатации к альтернативной системе ремонта по реальному техническому состоянию.

Для того чтобы перейти от системы обслуживания ТЭД по пробегу к системе обслуживания по реальному техническому состоянию, нужны объективные оценки состояния изоляции. Для этого необходимо разработать новые методы контроля и оценки технического состояния изоляции электрооборудования. Передовые фирмы мира в последние годы активно внедряют в практику новые методы диагностики с минимальной разборкой электрооборудования, получая при этом больше информации, чем при полной разборке.

Эффективность диагностики обеспечивается только комплексным характером результатов контроля с целью выявления наиболее вероятных видов

и причин обнаруженных и прогнозируемых неисправностей электрооборудования.

Внедрение системы диагностирования технического состояния оборудования требует создания обширных баз данных (архивов) для анализа динамики состояния изоляции и составления экспертного прогноза, что является необходимой предпосылкой для перехода от обслуживания по сроку эксплуатации к обслуживанию по техническому состоянию. В дальнейшем необходимо создать сеть диагностических пунктов с компьютерным обеспечением и с единым центром отрасли для обработки, хранения и анализа информации. Очевидно, что совершенствование методов контроля является одним из путей повышения надежности работы электрооборудования.

Имеющиеся в настоящее время в распоряжении эксплуатационного персонала технические средства диагностики не удовлетворяют полностью перечисленным выше требованиям. На сегодня нет сравнительно просто реализуемых на практике надежных критериев для составления заключения о состоянии изоляции. Пригодность корпусной изоляции обмотки якоря ТЭД к дальнейшей эксплуатации определяется в настоящее время чаще всего с помощью мегаомметра по значению сопротивления изоляции. Однако измерение сопротивления изоляции позволяет выявить лишь грубые дефекты в изоляции. Кроме того, на величину сопротивления изоляции оказывают влияние многие факторы, в том числе увлажнение, загрязнение и т. д. Как показали исследования, проведенные учеными РУТ(МИИТ) и работниками Московского электромеханического ремонтного завода (МЭМРЗ), средние величины одноминутного значения сопротивления изоляции R_{60} якорей тяговых двигателей типа НБ-406, пришедших в ремонт, составили 336 МОм, после среднего ремонта 383 МОм, а после капитального ремонта 260 МОм [112]. Таким образом, приведенные результаты наглядно показывают, что нельзя судить о состоянии изоляции только по значению ее сопротивления.

Измерение частичных разрядов, являющихся основной причиной электрического старения внутренней изоляции, дает более объективную информа-

цию о состоянии изоляции, но такие измерения очень сложны и имеют малую помехозащищенность. Поэтому они в основном применимы лишь в лабораториях и мало пригодны для промышленных условий.

Исследованию физических процессов в изоляции посвятили работы российские и зарубежные ученые: Александров Г. Н., Александров В. В., Бажанов С. А., Бернштейн Л. М., Богородицкий Н. П., Винокуров В. А., Воскресенский В. Ф., Вайда Д., Воробьев А. А., Воробьев Н. А., Воробьев Н. И., Глинка Т., Глушченко М. Д., Гольдберг О. Д., Жерве Г. К., Захарченко Д. Д., Исаев И. П., Иерусалимов М. Е., Казаров С. А., Карташев В. И., Козлов Л. Г., Кулачковский В. Б., Козырев Н. А., Козырев Б. И., Койков С. Н., Курбасов А. С., Курочкина А. Л., Кучинский Г. С., Лоханин А. К., Марцинек Ю., Немухин В. П., Никаноров В. А., Нувион Ф., Осяев А. Т., Пикульский В. А., Преснов Ю. Л., Пучковский В. В., Радченко В. Д., Ротанов Н. А., Сви П. М., Синохара Сигеру, Скворцов А. А., Сонин В. С., Сухопрудский Н. Д., Тареев Б. М., Тиходеев Н. Н., Шур С. С. и многие другие [6, 7, 9, 13, 17, 18, 20, 21, 26, 27–31, 36, 37, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 50, 52, 53, 54–57, 58, 60, 62, 63–66, 70, 71, 72, 76, 77, 81, 83, 84, 87, 88, 117, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 128].

Развитию вопросов технической диагностики электрооборудования посвятили работы Бергер И. Н., Горский А. В., Камата И., Пархоменко П. П., Ротанов Н. А., Рябцев Г. Г., Сакакибара Т., Иньков Ю. М. и др. [11, 32, 34, 51, 78, 86, 90, 91, 92].

Однако, несмотря на имеющуюся обширную литературу и многочисленные ежегодные публикации, до сих пор отсутствует систематическое рассмотрение основных физических явлений и идей, используемых для целей диагностики высоковольтной изоляции. Многие вопросы еще не освещены в литературе или освещены не совсем правильно. Например, несмотря на то, что измерение сопротивления изоляции является основным процессом контроля состояния изоляции и известно очень давно, зависимость сопротивления от времени в учебниках и монографияхдается без перегиба. Более того, в монографии Кулачковского В. Б. [60] прямо указано, что «при правильных замерах кривая зави-

симости сопротивления от времени не должна иметь точки перегиба». Это вводит читателя в заблуждение, так как наши исследования показали, что кривая должна иметь точку перегиба, и в этой точке перегиба значение сопротивления изоляции равно половине установившегося значения.

Таким образом, отсутствие надежных технических средств и их теоретического обеспечения подтверждают актуальность исследований в направлении решения этой задачи. Основной целью предлагаемого учебного пособия является теоретическое исследование процессов в неоднородной изоляции, связанных с явлением абсорбции, экспериментальное измерение абсорбционных параметров и оценка возможности их применения для целей диагностики, а также создание устройств для определения состояния изоляции по результатам комплексного измерения ее параметров.

В пособии подробно описано цифровое моделирование процессов в неоднородной изоляции в интегрированном пакете Mathcad и в пакете моделирования Simulink системы MATLAB. Рассмотрены принципы построения S-моделей.

В эпоху революционных технических преобразований и бурного развития цифровых технологий во всех сферах техники, и особенно в электроэнергетике и электротехнике, нахождение правильных и рациональных путей развития технологий управления и эксплуатации электрооборудования является главной целеполагающей задачей специалистов, которая определит не только тактические, но и стратегические направления развития техники будущего и направления подготовки соответствующих специалистов.

Стратегическое направление развития цифровых технологий сегодня — это применение совершенных математических моделей или, как их называют, цифровых двойников (ЦД). Цифровой двойник — это цифровая модель объекта, обновляемая в реальном масштабе времени и учитывающая изменения состояний, свойств и характеристик в процессе его функционирования.

Цифровой двойник позволяет полноценно моделировать поведение реального физического объекта при его работе. Эволюционный тренд развития

технологий управления сегодня — это слияние реального физического мира и мира ЦД.

Проведенная автором теоретическая и экспериментальная работа показывает, что предложенные в учебном пособии критерии являются надежными для оценки состояния изоляции, и приборы, позволяющие производить такую оценку, целесообразно внедрить на электроремонтных заводах и в локомотивных депо сети железных дорог.

Материалы исследований неоднократно рассматривались на научно-технических конференциях и легли в основу написанных автором ранее учебных пособий.

Глава 1.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

В результате изучения данной главы студент должен

знать:

- основные понятия и определения технической диагностики;
- основные процессы старения электрической изоляции;
- основные диагностические параметры систем изоляции;

уметь:

- организовать систему планово-предупредительного ремонта электрооборудования по реальному техническому состоянию;
- выбрать необходимую аппаратуру для диагностики изоляции;
- провести необходимые измерения параметров;

владеть:

- терминологическим аппаратом, необходимым для диагностики изоляции, тяговых электродвигателей подвижного состава.

1.1. Общие замечания

Тяговые электродвигатели (ТЭД) являются одним из важнейших элементов тягового подвижного состава (ТПС). Они, как и все другие электрические установки, аппараты и машины могут нормально работать лишь с исправной изоляцией. В процессе эксплуатации из-за увлажнения, перегрева, динамических нагрузок и перенапряжений происходит общее старение изоляции, т. е. ухудшение ее физико-химических характеристик [13, 17, 107, 122]. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты, которые в конечном итоге приводят к пробою изоляции, и тяговые двигатели выходят из строя. Поскольку процесс старения составляет довольно длительное время, то

при расчете изоляционных систем невозможно точно учесть все указанные воздействия, по которым можно было бы расчетным путем определить степень изношенности изоляции в зависимости от времени эксплуатации и проверить надежность работы изоляции в реальных условиях.

Ресурс изоляции, как правило, определяет ресурс тяговых электродвигателей. Многочисленные исследования показали, что в подавляющем числе случаев (до 70%) причиной отказов ТЭД является нарушение работы его изоляционной системы. При этом более 25% отказов приходится на долю главной изоляции двигателей. Отсюда следует, что для безаварийной работы тяговых электродвигателей изоляция их должна быть надежной.

Надежность изоляции зависит не только от конструкции и применяемых материалов, но и от факторов, действующих на нее при изготовлении и эксплуатации. К таким факторам относятся технология изготовления и ремонта, эффективность применяемых технологий и устройств для контроля качества изготовления ТЭД и их ремонта, а также эффективность систем охлаждения и устройств защиты.

К причинам неисправностей тяговых электродвигателей и силовых цепей локомотивов при эксплуатации в первую очередь относятся: температурные воздействия на изоляцию обмоток при выходе их из предельно допустимых зон работы ТЭД, электрические перенапряжения, возникающие в силовых цепях при переходных режимах, и постепенное старение изоляции в результате воздействия перечисленных факторов.

К внешним факторам воздействия на изоляцию относятся: температурные и механические воздействия, увлажнение изоляции, запыленность. Принято считать, что в отдельных случаях последствия старения могут быть устранены при восстановительных ремонтах изоляции. Однако, как правило, изменения свойств изоляционных материалов носят необратимый характер и чаще всего завершаются пробоем изоляционной конструкции [9, 10, 13, 17].

Процессы старения внутренней изоляции ограничивают срок службы изоляционных конструкций. Поэтому при разработке, изготовлении и в процес-

се эксплуатации электрооборудования высокого напряжения должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции до такого уровня, при котором обеспечивается требуемый срок службы изоляционных конструкций (обычно 25–30 лет и более).

Изменение свойств внутренней изоляции в процессе эксплуатации происходит за счет передачи электрической изоляции различных видов энергии. В соответствии с этим различают электрическое, тепловое и механическое старение изоляции. Кроме того, старение внутренней изоляции может быть обусловлено проникновением в нее из окружающей среды загрязнений и частиц влаги. В большинстве случаев при старении изоляции увеличиваются диэлектрические потери в ней, что может привести к развитию теплового пробоя.

На процесс старения изоляции также оказывают влияние многие непостоянные и неконтролируемые условия. Поэтому процесс старения во многом носит случайный характер. Однако, как установлено практикой, зависимость среднего срока службы изоляционных конструкций разного типа от среднего напряжения (или средней напряженности электрического поля) имеют практически одинаковый характер. Следовательно, практически во всех случаях имеет место примерно один и тот же механизм электрического старения изоляции. Именно с электрического старения изоляции мы и начнем рассмотрение процесса ее старения.

Электрическое старение может происходить при напряженности электрического поля в 5–20 раз меньших тех, которые наблюдаются при напряжениях, близких к пробивным. Экспериментально установлено, что зависимость срока службы τ от значения воздействующего напряжения U в диапазоне значений τ от 0 до 10^4 часов имеет вид

$$\tau = \frac{A}{U^n}, \quad (1.1)$$

где A — постоянная, зависящая от свойств внутренней изоляции; n — показатель степени, зависящий от конструктивных особенностей изоляции и рода

воздействующего напряжения ($n = 4\text{--}8$ при напряжении промышленной частоты и $n = 9\text{--}12$ при постоянном напряжении).

Для области больших сроков службы используют другую формулу:

$$\tau = \frac{A}{(U - U_{qp})^n}, \quad (1.2)$$

где U_{qp} — напряжение появления в изоляции частичных разрядов (ЧР), являющихся основной причиной электрического старения внутренней изоляции.

Типичным значением постоянной A для твердой изоляции при нормальных условиях эксплуатации является значение $A = 6 \cdot 10^9$ год·(кВ) n . Показатель степени n обычно выбирают равным 6. Таким образом, формула (1.2) записывается так:

$$\tau = \frac{6 \cdot 10^9}{(U - U_{qp})^6}. \quad (1.3)$$

Частичные разряды представляют собой локальные пробои ослабленных участков изоляции, которыми являются газовые полости. Зависимости $\tau = f(U)$ получили название «кривых жизни» изоляции. Формулой (1.3) пользуются только для случая, когда $U > U_{qp}$. При $U < U_{qp}$ электрического старения изоляции не происходит и срок ее службы по этому параметру неограниченно возрастает.

Электрическое старение изоляционных конструкций происходит неравномерно. В начальный момент их эксплуатации процесс старения идет медленно. По мере старения изоляции она расслаивается, разрыхляется, в ней образуются поры, трещины, газовые включения, воздушные прослойки. В них обра- зуются ЧР, и процесс старения происходит более интенсивно.

В работах [13, 17] отмечено, что из внешних факторов, воздействующих на изоляцию, температура является доминирующим. Скорость старения изоляционных материалов определяется их нагревостойкостью. В процессе исследований термостойкости изоляции класса A (наибольшая рабочая температура 105°C) было сформулировано для изоляции электрических машин «правило

восьми градусов» (правило Монтзингера), согласно которому превышение температуры на каждые восемь градусов сверх предельно допустимой температуры сокращает срок службы изоляции вдвое. Аналитически это правило записывается в следующем виде:

$$\tau = \tau_0 \cdot 2^{-\frac{t-t_0}{\Delta}} = \tau_0 \cdot 2^{-\frac{t-t_0}{8}} = \tau_0 \cdot e^{-0,0866(t-t_0)}, \quad (1.4)$$

где τ — срок службы изоляции при температуре нагрева изоляции t ($^{\circ}\text{C}$); τ_0 — условный срок службы изоляции при номинальной температуре t_0 ; Δt — превышение температуры изоляции, вызывающее сокращение срока ее службы в два раза.

Результаты исследований, приведенные в работе [17, 20], показали, что чем выше класс изоляции, тем медленнее происходит ее старение при данной температуре, при этом для изоляции класса В (наибольшая рабочая температура 130°C) правило «восьми градусов» трансформируется в «правило 10°C », а для изоляции класса Н (наибольшая рабочая температура 180°C) — в «правило 12°C ».

Для масляных трансформаторов пользуются «правилом шести градусов».

Пример 1.1. Изоляция класса Y рассчитана на работу при номинальной температуре $t_H = 90^{\circ}\text{C}$ в течение $\tau_H = 25$ лет. Сколько проработает изоляция, если ее рабочая температура будет равна $t = 114^{\circ}\text{C}$?

Решение. По правилу Монтзингера при повышении температуры на каждые 8°C срок службы изоляции уменьшается в два раза (правило восьми градусов). Поэтому срок службы τ изоляции при температуре $t = 114^{\circ}\text{C}$ будет равен

$$\tau = \tau_H \cdot 2^{-\frac{(t-t_H)}{\Delta}} = 25 \cdot 2^{-\frac{114-90}{8}} = 25 \cdot 2^{-3} = \frac{25}{2^3} = \frac{25}{8} = 3,125 \text{ г.}$$

Механические нагрузки на изоляцию тяговых электродвигателей являются следствием электродинамических сил, возникающих в электрических машинах, неуравновешенности вращающихся частей, центробежных усилий, ударов

и толчков со стороны привода. Эти усилия обычно имеют знакопеременный циклический характер.

Чтобы избежать внезапных пробоев изоляции и поддерживать необходимую степень надежности работы электрооборудования, состояние изоляции периодически контролируется, и ухудшение ее свойств компенсируется системой планово-предупредительных ремонтов на основе ремонтного цикла с назначенным межремонтным ресурсом, который не учитывает реальных условий эксплуатации. При этой системе профилактические и ремонтные работы производятся по времени наработки, т. е. по назначенному пробегу электровоза. Такая система не является оптимальной.

Приведем некоторые цифры. Более 60% отказов и порт тяговых электродвигателей произошло на локомотивах, пробег которых после капитального ремонта не превысил 300 тыс. км. Специалистами проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства (ПКБ ЦТ) ОАО «РЖД» установлено, что уровень повреждаемости тяговых электродвигателей составляет от 2,18 до 3,51 случаев на 1 млн. км пробега электровозов.

Из диаграммы, приведенной на рисунке 1.1, видно, что при эксплуатации тягового двигателя ТЛ2К1 наиболее характерны следующие неисправности: пробой изоляции и межвитковое замыкание обмоток якоря и катушек полюсов, пробой изоляции компенсационной обмотки, низкое сопротивление изоляции обмоток якоря и катушек полюсов, повреждение соединений между полюсами.

Наибольшее количество отказов (48% двигателей типа НБ418К6 и 65% двигателей типа ТЛ2К1) приходится на пробои и межвитковые замыкания. Несогласованность норм межремонтных пробегов локомотивов и установленных на них ТЭД приводит к тому, что в ряде случаев при постановке электровоза на ТР-3 тяговым двигателям фактически необходимо делать КР в условиях завода. В результате возникают дополнительные проблемы для работников депо, которые эксплуатируют локомотивы. Электродвигатели, несмотря на наличие паспортов, часто обезличены — периодичность и последовательность ремонтов,

как правило, не соблюдаются. Это приводит к преждевременному старению изоляции и сверхнормативной работе моторно-якорных подшипников [21, 22].

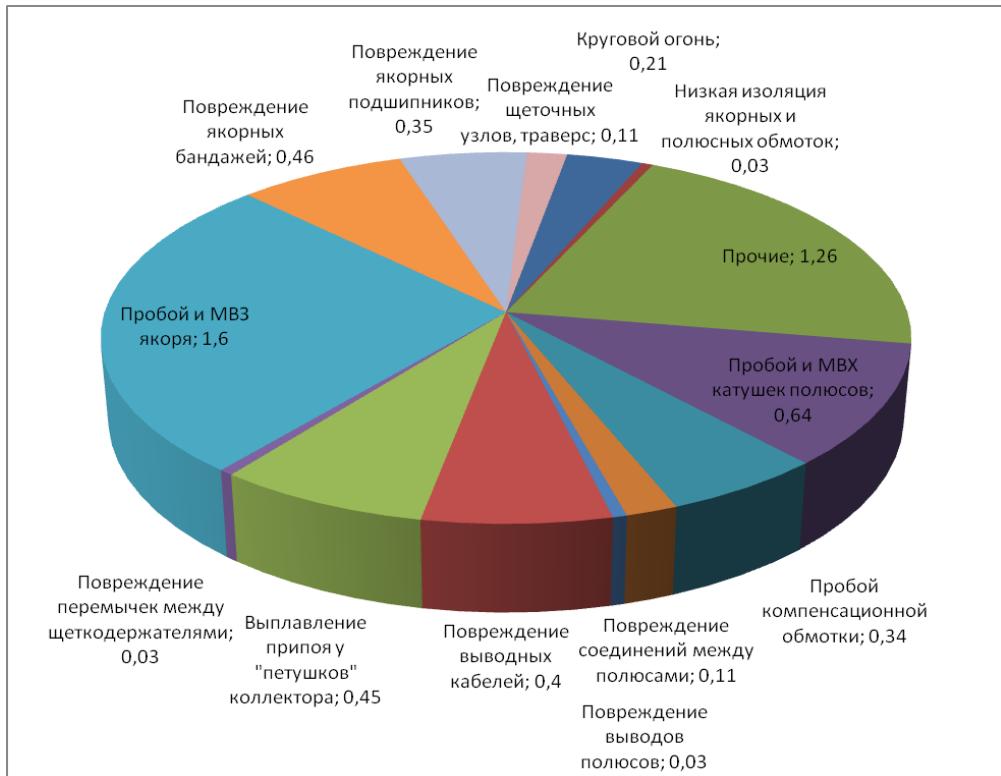


Рис. 1.1

Диаграмма повреждаемости по видам отказов на 1 млн км пробега
для тягового двигателя ТЛ2К1

Как показала практика, система поддержания надежности изоляции по пробегу не является оптимальной. Условия эксплуатации ТЭД не одинаковые, следовательно, неодинаково происходит и старение изоляции. Если оценивать реальное состояние изоляции, то можно с меньшими затратами продлить ее срок службы без снижения надежности ее работы. Особенно актуальной такая постановка вопроса становится в современных условиях в связи с острым дефицитом меди и изоляционных материалов.

Использование современных цифровых технологий позволит создать цифровых двойников (ЦД) тяговых электродвигателей. Эти цифровые двойни-

ки будут точно отражать состояние реальных тяговых электродвигателей и предсказывать сроки постановки их на ремонт в зависимости от их состояния, а также определять и вид ремонта.

Для того чтобы перейти от системы обслуживания по пробегу к альтернативной системе обслуживания по реальному техническому состоянию, нужны новые объективные оценки состояния изоляции. Чтобы предложить и проанализировать такие оценки, необходимо рассмотреть системы изоляции тяговых электродвигателей и происходящие в них процессы.

1.2. Системы изоляции вращающихся машин

Изоляция электротехнических установок, согласно ГОСТ 1516.2-97, подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внутренняя изоляция — это части изоляционной конструкции, в которых изолирующей средой являются жидкые, твердые или газообразные диэлектрики или их комбинация, не соприкасающиеся с атмосферным воздухом и не подверженные влиянию атмосферных и других внешних факторов. Внешней изоляцией являются воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе, которые подвержены влиянию атмосферных и других внешних факторов.

В эксплуатации на внутреннюю изоляцию электрооборудования, как уже указывалось, воздействуют электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. Они вызывают в изоляции сложные процессы, следствием которых является постепенное ухудшение свойств изоляции, именуемое старением. Как правило, изменения свойств изоляции носят необратимый характер и завершаются пробоем.

Стоимость изоляции в электрических машинах составляет 50–80% стоимости всех других ее материалов. Поэтому к изоляции вращающихся машин предъявляются очень высокие требования в отношении надежности и сроков службы. Активные материалы, т. е. медь обмотки и сталь статора или якоря, работают в электрических машинах при больших удельных нагрузках (плотностях токов и индукциях). Соответственно, потери мощности в единице объема

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru