

Введение

Эффективное функционирование железнодорожного транспорта во многом зависит от надежности электроснабжения во всех его отраслях (хозяйства). Система электроснабжения железной дороги тесно связана с электроэнергетикой регионов, страны. Устройства электроснабжения рассчитываются на длительный срок службы, например срок службы высоковольтного силового трансформатора установлен 25 лет. В реальных условиях эксплуатации подобные объекты служат значительно дольше.

Для обеспечения надежной, безопасной и рациональной эксплуатации многочисленных электроустановок (ЭУ) необходим системный подход. Система технической эксплуатации железнодорожного транспорта включает в себя систему технического обслуживания (ТО) и ремонта электроустановок. Согласно ГОСТ 28.00 – 83 целью системы ТО и ремонта является управление техническим состоянием объектами в течение их всего срока службы или ресурса, вплоть до списания, обеспечения: заданный уровень готовности объектов к использованию по назначению и их работоспособность в процессе эксплуатации, минимальные затраты времени, труда, и средств на выполнение обслуживания и ремонта.

Электроэнергетическое хозяйство любого крупного промышленного предприятия, тем более железной дороги, обладает всеми признаками системы, которая должна удовлетворить в первую очередь требованиям надежности, безопасности и экономической эффективности. В хозяйстве силового высоковольтного электроснабжения одной из основных является проблема совершенствования ТО и ремонта электроустановок. Для большинства объектов системы электроснабжения заданы, как правило, паспортные характеристики надежности: срок службы, ресурс, интенсивность или параметр потока отказов, среднее время восстановления и др. С учетом этих характеристик при организации ТО и ремонта разрабатываются управляющие воздействия на объекты с целью обеспечения требуемых уровней надежности.

За длительное время в процессе эксплуатации объекты электроустановок подвергаются воздействию множества случайных причин, по-разному влияющих на их техническое состояние. Многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на объекты ЭУ приводит к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации даже однотипные объекты имеют различные технические состояния. В связи с этим наработка или календарный срок службы не могут характеризовать однозначно техническое состояние объектов в процессе эксплуатации. Таким образом, чтобы обеспечить принцип соответствия процесса технической эксплуатации объекта его

техническому состоянию, необходимы систематические проверки – диагностирование.

Результатом технического диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием, при необходимости, места, вида и причины дефекта (неисправности). Следовательно, диагностирование должно быть согласовано с задачей и объемом системы ТО и ремонта определенной электроустановки или объекта. Эксплуатация электроустановок с учетом отмеченных требований позволит поддерживать надежность объектов на уровне установленных показателей при существенном снижении затрат.

В литературе производственного назначения излагаются четко сформулированные указания (правила, инструкции) обязательные к исполнению. Вместе с тем только по инструкции зачастую трудно обеспечить работоспособное состояние ЭУ. Будущий специалист (инженер электроэнергетик) должен быть достаточно ознакомлен с современными технологиями ТО, которые, не отвергая утвержденных инструкций, исключают отказ.

Учебное пособие, разработано с целью, дать студентам определенный объем знаний в области эксплуатации электроэнергетического оборудования с применением диагностирования и обработки результатов измерения на основе использования теории вероятностей и математической статистики. Материал пособия рассчитан на читателя, знающего основы теории надежности и показатели, по которым оцениваются свойства надежности электроустановок. Раздел функциональной надежности и мониторинга рассмотрен применительно к тяговому электроснабжению переменного тока.

Термины и определения

№ п/п	Термины	Определения
1	Надежность	Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах в условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.
2	Периодичность технического обслуживания (ремонта)	Интервал времени или наработки между данным видом технического обслуживания (ремонта) и последующим таким же видом или другим большей сложности.
3	Потребитель электрической энергии	Предприятие, организация, учреждение, территориально обособленный цех, строительная площадка, квартира, у которых приемники электрической энергии присоединены к электрической сети и используют электрическую энергию.

№ п/п	Термины	Определения
4	Ремонт	Комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и ресурсов изделий или их составных частей.
4'	Текущий ремонт	Ремонт, выполняемый для обеспечения и (или) восстановления работоспособности изделия и состоящий в замене и (или) в восстановлении отдельных его частей.
5	Ремонт по техническому состоянию	Плановый ремонт, при котором контроль технического состояния выполняется с периодичностью и объемом, установленным нормативно-технической документацией, а объем и момент начала ремонта определяется техническим состоянием изделия.
6	Капитальный ремонт	Ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близкого к полному ресурса изделий с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые.
7	Система эксплуатации	Совокупность необходимых и достаточных для выполнения задач эксплуатации изделий, средств эксплуатации, исполнителей и документации, устанавливающей правила их воздействия.
8	Снятие с эксплуатации	Событие, фиксирующее невозможность или нецелесообразность дальнейшего использования по назначению и ремонта изделия и документально оформленное в установленном порядке.
9	Срок службы	Календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.
10	Техническое обслуживание (ТО)	Комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожиданию, хранению и транспортированию.
11	Технический ресурс	Наработка изделия от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.
12	Назначенный ресурс	Суммарная наработка изделия, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.
13	Техническая эксплуатация	Часть эксплуатации, включающая транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт объекта.
14	Эксплуатация	Стадия жизненного цикла изделия (объекта), на которой реализуется, поддерживается или восстанавливается его качество.
15	Эксплуатационные документы	Документы, необходимые при использовании изделия по назначению, его обслуживании и ремонте, ожидании и транспортировании.

№ п/п	Термины	Определения
16	Электроустановка	Комплекс взаимосвязанного оборудования или сооружений, предназначенный для производства или преобразования, передачи распределения или потребления электрической энергии.

1. Структура эксплуатации

1.1. Техническое обслуживание в системе эксплуатации электроустановок

В соответствии с принятым в [1, 20] определением эксплуатация охватывает все состояния жизненного цикла объектов (электроустановок): использование по назначению (непосредственно работа ЭУ); техническое обслуживание (ТО); ремонт; ожидание (резерв); транспортирование и хранение. Цели и задачи эксплуатации заключается в том, чтобы обеспечить исправное или работоспособное состояние техники на всех этапах жизненного цикла – от приобретения до списания.

Техническое обслуживание, как составляющая эксплуатации, реализуется посредством комплекса работ по поддержанию исправного или работоспособного состояния объекта при использовании по назначению, при ожидании, транспортировании или хранении. Объем технического обслуживания зависит от состояния, в котором пребывает объект. Обычно предусмотрены: осмотры; испытания (проверки); опробования; мелкий ремонт (устранение выявленных при проверке недостатков) не требующий специальных управляющих воздействии.

При осмотре визуально, при необходимости с обходами и объездами, определяют состояние объекта (оборудования), выявляют дефекты его эксплуатации, нарушения техники безопасности, уточняют объем и состав работ, подлежащих выполнению при очередном ремонте. Результаты осмотра с обнаруженными неисправностями (дефектами) оборудования и замечаниями записывают в книгу осмотров и неисправностей.

Испытания (проверки) преследуют цель выявления скрытых дефектов оборудования и контроль за эксплуатационной надежностью и безопасностью обслуживания оборудования между двумя очередными ремонтами, которым, как правило, предшествует осмотр.

Опробования производят с целью определения исправности, или работоспособности, коммутационного оборудования, защит, устройств автоматики и телемеханики после любого вида ремонта или испытаний. Опробование осуществляется трехкратной подачей команды «включить» и «отключить» (непосредственно или косвенно) на подготовленное к работе присоединение. Периодичность эксплуатационных опробова-

ний назначается в соответствии с производственными инструкциями [1, 13, 20].

Ремонты оборудования производят с целью восстановления его исправности, или работоспособности, и восстановления ресурса. В зависимости от глубины и объема восстановительных работ ремонты подразделяются на плановые и неплановые. К плановым ремонтам относятся текущий, внеочередной и капитальный [1, 20]. Отметим, при капитальном ремонте объект (электроустановка) доводится до состояния исправности с полным восстановлением ресурса.

Из отмеченного выше следует, что ТО имеет системный характер и должно осуществляться по определенным программам, согласно которым организуется процесс ТО и его оценка. Проанализируем график изменения надежности объекта, см. рис. 1.1.

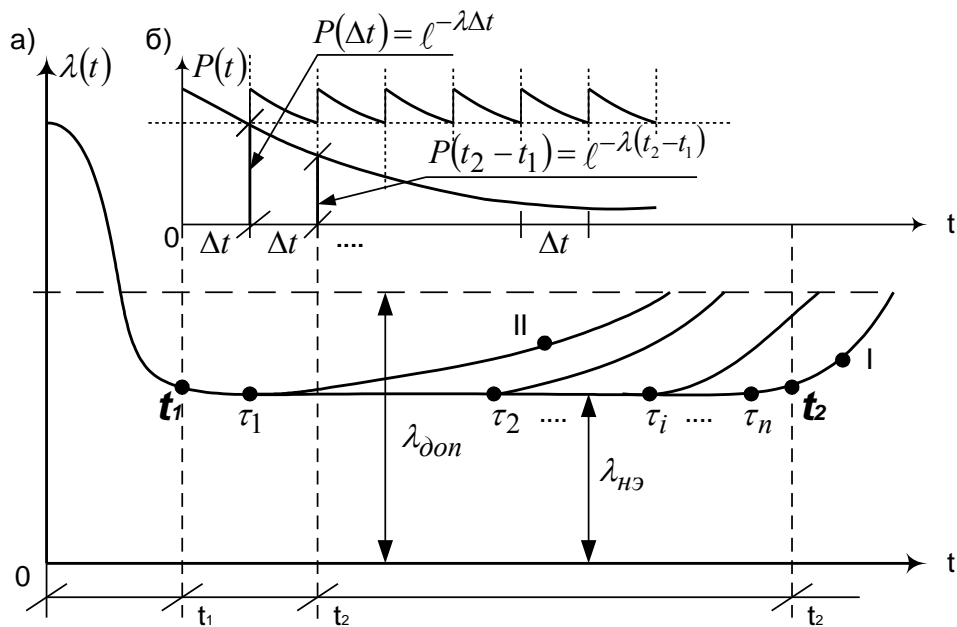


Рис. 1.1. Изменение надежности объекта: а) кривая жизни объекта; б) вероятность безотказной работы объекта при ТО через интервал

$$\Delta t \text{ при } \lambda = \text{const}, P(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$$

Как правило график $\lambda(t)$, см. рис. 1.1, а, имеет три характерных участка [18]: $0 - t_1$ приработка; $t_1 - t_2$ период нормальной эксплуатации; $> t_2$ деградация. При изменении $\lambda(t)$ по линии I на участке $t_1 - t_2$ $\lambda = \text{const}$ – период нормальной эксплуатации. Для большинства объектов ЭУ он составляет до 10 и значительно более лет [15, 18, 19]. На участке $\lambda = \text{const}$ объекты не изменяют своих свойств, дефекты (неисправности) появляются случайно по закону Пуассона. Вероятность безотказной работы объекта зависит от длительности интервала использования под нагрузкой. Если через время Δt производить кратковременное отключение объекта и, убедившись в исправности его вновь включить на последую-

щий отрезок Δt и т.д., получится пилообразный график $P(t)$, (см. рис. 1.1, б). Из этого графика видна роль ТО, когда используется только осмотр.

Объекты силовых ЭУ рассчитаны на длительный срок эксплуатации, естественно, подвергаются воздействию критических нагрузок, широкому изменению климатических факторов (температура, влажность, ветер, вибрации, солнечная радиация и др.). В связи с этим объекты электроэнергетики рассчитывают на максимальные нагрузки с повторяемостью один раз в пять лет, и десять или пятнадцать лет в зависимости от напряжения. При статистическом характере появления предельной нагрузки участок $t_1 - t_2$ в реальной эксплуатации может многократно сокращаться переходя в линию II, когда с точки t_1 наступает период деградации – резкое увеличение $\lambda(t)$.

При четко выраженном износовом характере изменения кривой $\lambda(t)$ момент достижения предельного значения $\lambda_{доп}$ во многом определяется сочетанием влияющих факторов. За время изменения $\lambda_{н.э.} \leq \lambda \leq \lambda_{доп}$ необходимо стареющий объект заменить или отремонтировать. Поскольку участок нормальной эксплуатации реально изменяется в широких пределах, то точку t_i , когда $\lambda(t) \geq \lambda_{н.э.}$, необходимо определять с помощью средств диагностики. На участке $\lambda_{н.э.} = \lambda_{const}$ вмешательство в работу ЭУ не только не снизит интенсивность внезапных случайных отказов, но при плохом качестве работ приведет к снижению надежности, к всплеску послеремонтных приработочных отказов. Следовательно при $\lambda=const$ основной операцией ТО является осмотр, где большое значение имеют человеческий фактор и технические знания персонала. Одной из основных задач ТО является определение времени ухудшения надежности объекта, например $\lambda(t) > \lambda_{н.р.}$.

1.2. Изменения технического состояния электроустановок

Техническое состояние объекта – это состояние, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект. За длительный срок эксплуатации любой объект электроустановки неизбежно в той или иной мере ухудшает свои характеристики. Факторы, влияющие на изменения технического состояния, можно разделить на конструктивно-производственные, определяющие начальное качество объектов и эксплуатационные, отражающие изменение технического состояния в процессе эксплуатации. Эксплуатационные факторы могут быть субъективными и объективными.

Субъективные факторы связаны с воздействием обслуживающего персонала и могут способствовать как повышению, так и снижению надежности. Они связаны с выбором правильных режимов эксплуатации

ЭУ, системой ТО, квалификацией обслуживающего персонала и качеством работы.

Объективные изменения параметров и характеристик ЭУ во времени являются следствием происходящих в них физико–химических процессов. Эти процессы очень сложны и природа многих из них изучена недостаточно. Многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на элементы ЭУ вынуждают оценивать надежность посредством аппарата теории вероятностей и математической статистики [2, 8, 11, 18]. Таким же образом необходимо анализировать диагностирующие параметры ЭУ.

Для систематизации факторов, влияющих на состояние ЭУ следует составить таблицу, в которой представляются важнейшие параметры для контроля.

Таблица 1.1.

Параметры, характеризующие состояние электроустановок

Вид Электроустановки	Параметр						
	Сопротивление изоляции	Сопротивление постоянному току	Ток несимметрии	Температура	Вибрация	Частичные разряды	tgδ (угол потерь)
Генераторы (двигатели переменного тока)	+	+	+	+	+	+	-
Трансформаторы, Реакторы	+	+	+	+	+	+	+
Выключатели	+	+	-	+	-	-	+
Воздушные Линии	+	-	+	-	+	+	-
Аппараты Управления Защиты	+	-	-	-	-	-	-
Кабели	+	+	+	+	-	-	+

Из табл. 1.1. видно, что число подлежащих контролю диагностирующих параметров в ЭУ изменяется от одного до 7 и более. Наиболее сложным объектом для контроля технического состояния является силовой маслонаполненный трансформатор. Рассмотрим некоторые параметры. Известно, что по результатам анализа трансформаторного масла можно выявить большинство дефектов в трансформаторе. Состояние масла характеризуется несколькими параметрами [15, 18]. Сте-

пень увлажнения масла можно определить по углу диэлектрических потерь $tg\delta$ и электрической прочности E , (рис.1.2).

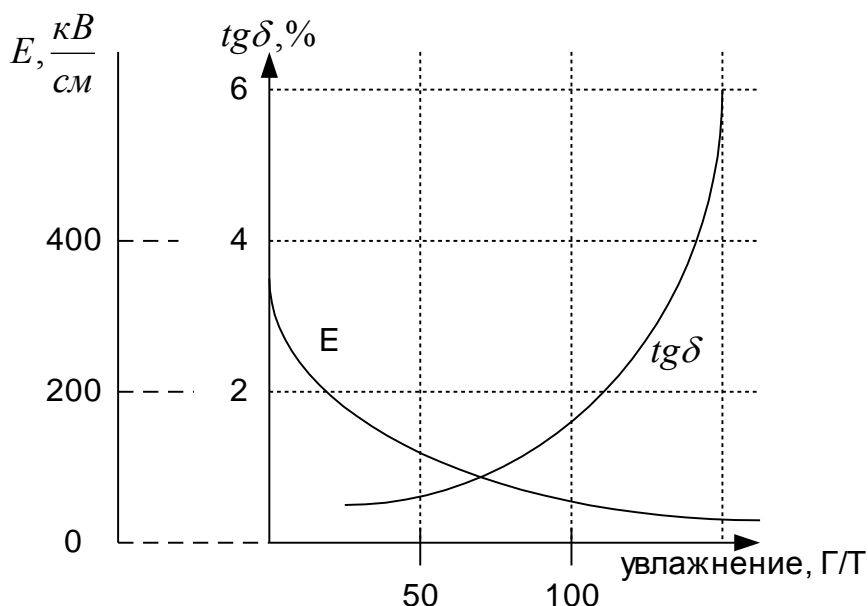


Рис.1.2. Зависимость $tg\delta$ и электрической прочности E масла от увлажнения, $\theta = 70^{\circ}\text{C}$

Значение $tg\delta$ при температуре масла 20°C должно быть не более 3%. В диапазоне температур $20^{\circ} \dots 90^{\circ}\text{C}$ $tg\delta$ не должен превышать 4%, [13]. По рис. 1.2 видно, что далее с увеличением влажности диэлектрические потери в масле начинают резко возрастать, особенно с $tg\delta > 2 \dots 3\%$. Следовательно необходимо увеличивать количество контрольных проверок, а в зоне предельного состояния, $tg\delta = 3 \dots 4\%$, переходить на непрерывный, отключая трансформатор (высоковольтные вводы) при достижении $tg\delta \geq 4\%$.

Подобную картину можно наблюдать при ухудшении переходного контакта (увеличения сопротивления) медь – алюминий, алюминий – сталь и др. С ухудшением переходного сопротивления в системе ТО нужно адекватно росту сопротивления переходного контакта увеличивать количество контрольных проверок. Естественно это можно осуществить на основе автоматизированных измерительно – вычислительных комплексов [1, 15]. Статистика показывает, что каждый сороковой – пятидесятый токопроводящий контактный узел имеет повышенную температуру и находится в состоянии близком к критическому [18]. В связи с этим важно учесть, что период изменения нагрузки в тяговой сети составляет время около суток. Следовательно, максимальная токовая нагрузка (температура), которую надо контролировать, может появиться как случайная величина в течение суток. При таких технологических режимах необходимо за период повторяемости нагрузки определить веро-

ятность превышения нагрузкой (тока, напряжения, температуры) заданного предельного значения, когда происходит основное ухудшение параметров объекта. Таким образом, объективную картину изменения (ухудшения) параметров ЭУ можно получить с помощью приборов, которые работают в автоматическом режиме длительное время.

2. Место и роль технического диагностирования

2.1. Методы диагностирования

Общим понятием теории надежности и технической диагностики является работоспособность. Состояние объекта, при котором значения всех диагностических признаков, характеризующих способность объекта диагностики (ОД) выполнять заданные функции, соответствуют установленным требованиям, называется работоспособным. В этом случае говорят, что объект (ЭУ) функционирует штатно. Если объект неработоспособен (не выполняет всех необходимых функций), то он функционирует не штатно.

Диагностирование может осуществляться различными методами. Метод диагностирования – совокупность операций, действий, позволяющих дать объективное заключение о техническом состоянии объекта. Различают рабочее и тестовое диагностирование. При рабочем диагностировании состояние объекта оценивается по выходным параметрам при подаче на его входы рабочих воздействий. При тестовом диагностировании состояние объекта оценивается по его реакции, вызываемой подаваемыми на его входы специальными тестовыми воздействиями. Метод диагностирования предусматривает определенный алгоритм, в соответствии с которым выполняются операции (воздействия) при проведении диагностирования.

Состояние объекта диагностирования оценивается по диагностирующим признакам (ДП). Диагностический признак – это параметр или характеристика, используемая при диагностировании и несущая информацию об изменении (ухудшении) состояния ОД.

В электрической сети необходимо анализировать две группы параметров: первая позволяет оценить электроэнергию с точки зрения потребителя; вторая – состояние сети (ЭУ) как надежного и безопасного канала передачи энергии. К первой группе относятся: частота, напряжение, ток, мощность, угол сдвига между током и напряжением, а так же ряд параметров, характеризующих качество электроэнергии.

Ко второй группе следует отнести: сопротивление изоляции, электрическая емкость и другие параметры, оценивающие качество изоляции и элементов конструкции сети.

В зависимости от условий диагностирования и особенностей ЭУ обычно решаются следующие задачи.

1. Контроль работоспособности – производится сравнение значений диагностических признаков ОД с требованиями технической документации и определение на этой основе вида технического состояния проверяемого объекта в данный момент.

2. Поиск места и определение причины дефекта (отказа). Эта задача решается в случае, когда ОД утратил работоспособность или она значительно снизилась по сравнению с предыдущей проверкой.

3. Прогнозирование изменения состояния объекта.

Прогнозирование особенно важно для высоконадежных и наиболее ответственных объектов, например высоковольтных силовых трансформаторов. Для железных дорог, электрифицированных на переменном токе, необходимо обеспечить не только надежность оборудования ЭУ, но и качество электроэнергии. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и др. Качество электроэнергии неразрывно связано с надежностью функционирования ЭУ системы электроснабжения. В таких системах требуется определять вероятность того, что значение выходной функции объекта, например коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, не выйдет за пределы, записанные в ГОСТ 13109 – 97. Вероятность выполнения ЭУ заданных функций, плотность распределения выходного параметра (коэффициента), необходимы для прогнозирования и мониторинга ОД.

Диагностирование возможно на всех стадиях жизненного цикла ЭУ: при проектировании, изготовлении (монтаже), эксплуатации.

Работоспособность ЭУ можно оценить при использовании по назначению (рабочее диагностирование) или подавая на нее внешнее воздействие и наблюдая за ее реакцией (тестовое диагностирование). Состояние объектов в процессе функционирования оценивается по различным внешним признакам: нагрев определенных его частей или общее тепловое поле, электрическое поле, вибрации и т.д., см. рис. 2.1.

Применительно к Силовому (тяговому) высоковольтному трансформатору из 12 признаков, приведенных на рис. 2.1, практически необходимы все. Можно утверждать, что чем больше используется диагностирующих признаков тем точнее состояния трансформатора. В настоящее время успешно внедряются в практику контроля устройства, использующие диагностирующие признаки нижнего ряда таблицы, (рис. 2.1).

Для сложных, ответственных ЭУ применяется как рабочее, так и тестовое диагностирование. Последнее осуществляется как в рабочем, так и в резервном состоянии ЭУ. Тестовое диагностирование требует специальных генераторов, вырабатывающих сигналы тестового воздействия [16, 18, 22].

Диагноз ставится путем выявления (всеми доступными оператору методами) симптомов неисправного состояния (наличия дефекта), определения без разборки фактических значений структурных параметров объекта и методического их сопоставления с допустимыми отклонениями от нормального уровня (номинала), соответствующего техническим условиям (ТУ).

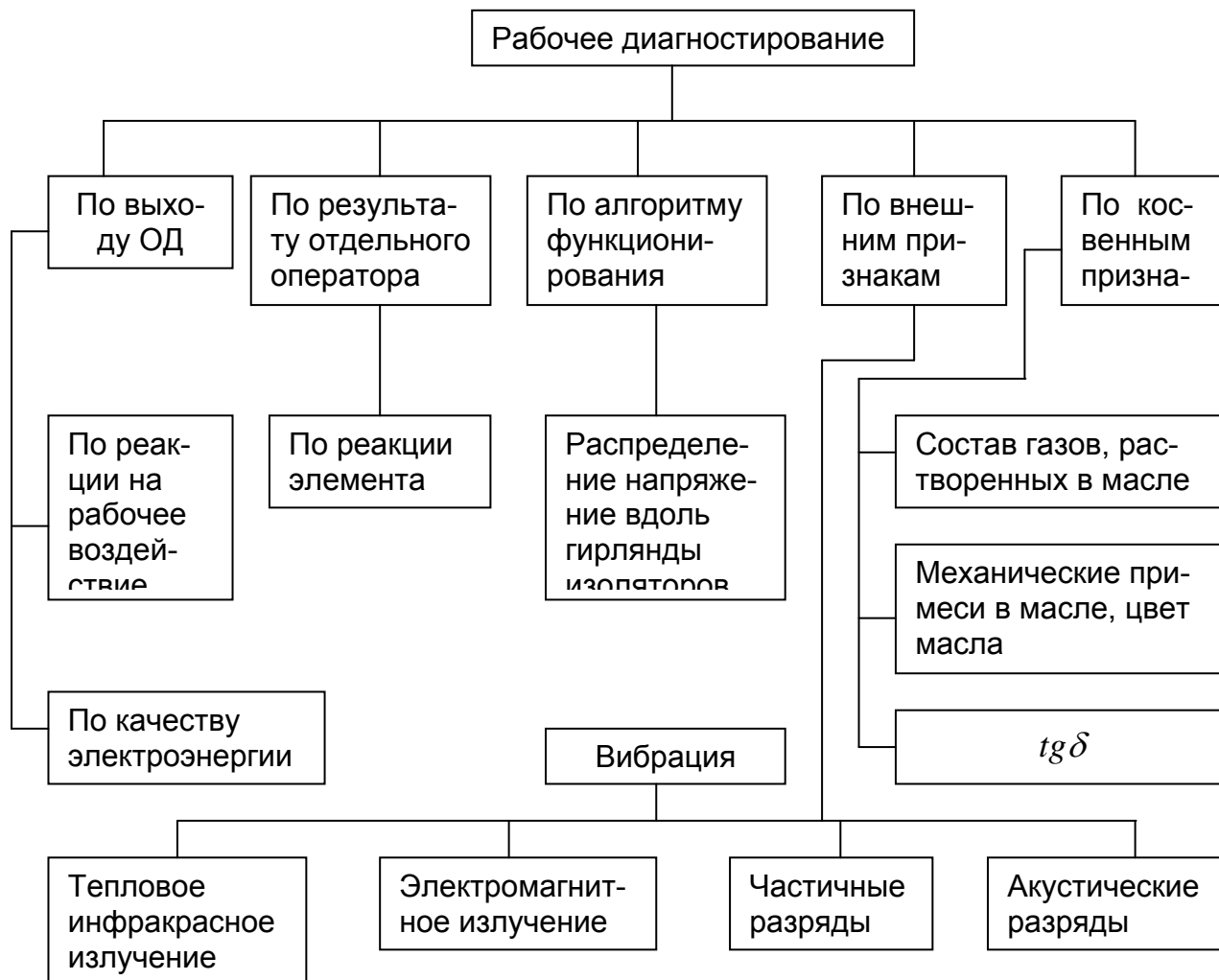


Рис. 2.1. Методы рабочего диагностирования ЭУ

Как правило диагностические сигналы (температура, вибрация, частичные разряды, и др., см. рис. 2.1) необходимо преобразовать в электрический сигнал (напряжения). Преобразование физических явлений, используя которые работает исследуемый объект, в электрический сигнал позволяет автоматизировать процесс диагностирования. С помощью современных информационно-вычислительных комплексов (ИВК) типа «Омск», «Эрис» и др., созданных на основе ПЭВМ, анализируемый диагностический сигнал можно исследовать за длительное время, период повторяемости – сутки и более. При этом, рассматривая изменения исследуемой величины как случайный процесс, можно получить законо-

мерность изменения диагностируемого параметра за период повторяемости, определить время превышения его допустимого значения, прогнозировать техническое состояние контролируемого объекта.

На вход регистрирующего прибора (ИВК) диагностирующий сигнал должен поступать как относительная величина:

$$\eta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}}, \quad (2.1.)$$

где U_{\max} и U_{\min} – соответственно максимальное и минимальное напряжения преобразованного диагностируемого натурального параметра (температура, сопротивление, частичные разряды и др.). Как видим, диагностирующий параметр η может изменяться в диапазоне $0 \dots 1$. Для оценки технического состояния достаточно сравнить измеренный параметр η_i со значением $\eta_{\text{доп}}$, соответствующего нормам ТУ. Если $\eta_i < \eta_{\text{доп}}$, то объект работоспособен и подлежит дальнейшему использованию по назначению. Если же $\eta_i > \eta_{\text{доп}}$, то объект необходимо вывести из работы для ремонта, или замены однотипным исправным. Таким образом, задача постановки диагноза сводится к определению параметра η и сравнению его со значением $\eta_{\text{доп}}$. Рассмотрим пример. Производится диагностирование n однотипных объектов, рассчитанных на длительную работу и у которых со временем техническое состояние ухудшается. Следовательно $\eta_i(t)$ монотонная случайная функция времени t , соответствующая контролируемому параметру i -го объекта. η^{**} - предельно допустимое значение параметров $\eta_i(t)$, пересечение (превышение) которого приводит к отказу i -го изделия. Дополнительно вводится η^* - наименьшее предотказное значение параметра. Из рис. 2.2 видно, что идентичные по назначению, изготовленные по одной и той же технологии в одинаковых условиях эксплуатации из-за многообразия воздействия случайных факторов объекты срывают свой ресурс за разное время: $T_1 < T_p < T_2 \dots < T_i < \dots < T_n$. Следовательно, организовывая эксплуатацию по ресурсу при наработке объектом $t = T_p$ последний необходимо заменить или отремонтировать. В соответствии с рис. 2.2 объекты 2... n будут заменены, не отработав установленного по ТУ ресурса.

Интервал $\Delta\eta = \eta^{**} - \eta^*$ определяет упреждающий допуск. Тогда область $0 - \eta^*$ изменения диагностирующего параметра соответствует исправному состоянию объекта. Область $\eta^{**} - \eta^*$ изменения $\eta_i(t)$ соответствует работоспособному состоянию i -го объекта с наличием дефекта. Следовательно, за время $t(\Delta\eta)$ необходимо устранить выявленный при диагностировании дефект в объекте путем замены или ремонта последнего. Область $\eta \geq \eta^{**}$, $\eta^* = 1$ соответствует отказу – (неработоспособному) состоянию объекта.

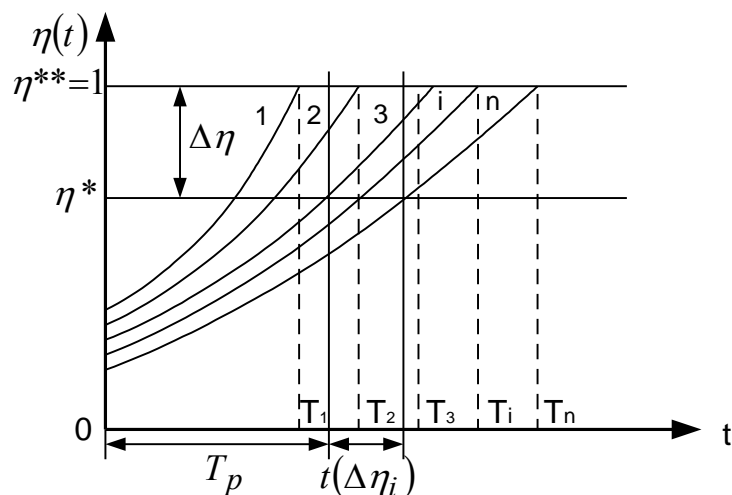


Рис. 2.2. Взаимосвязь моментов отказа, $T_1 \dots T_n$ с износом объектов; T_p – ресурс анализируемого типа объектов

Таким образом, при наличии диагностирования предоставляется возможность оптимизировать управляющее воздействие по времени и глубине (сложности) ремонтной операции. В зависимости от условий эксплуатации ЭУ, с учетом многообразия воздействия случайных факторов, организация ТО с решением задач оптимизации времени воздействия, величины затрат и обеспечения надежности привод к большому количеству стратегий ТО и ремонта электроустановок [18, 23]. Естественно выбранной стратегии ТО и ремонта должна соответствовать определенная глубина диагностирования.

2.2. Стратегии технического обслуживания и ремонта

Стратегия технического обслуживания и ремонта представляет собой совокупность принятых принципов, правил и управляющих воздействий по поддержанию и восстановлению эксплуатационных свойств объектов (ЭУ) при минимуме затрат трудовых и материальных ресурсов, способов организации технического обслуживания и ремонта, и необходимой для этого производственно-технической базы.

Стратегии можно классифицировать по типу исходной информации о состоянии объектов. Использование информации о состоянии объектов в виде факта «отказал» или «не отказал» приводит к применению моделей непараметрических стратегий ТО. Непараметрические стратегии ТО могут быть двух типов: по состоянию и наработке. Организация ТО по стратегии «по наработке» не требует затрат на диагностику и в связи с этим не требуется высокая квалификация обслуживающего персонала. Но при этом почти никогда ресурс не срабатывает полностью, см. рис. 2.2. Поскольку фактическое состояние объекта неизвестно, то для предотвращения отказа стараются сократить срок проведения очеред-

ного воздействия, что приводит к недоиспользованию ресурса. Кроме этого в такой стратегии вероятны отказы.

При использовании параметрических стратегий ТО «по состоянию» предполагается диагностирование, что дает возможность наиболее полно использовать ресурс объекта и предотвратить отказ.

Вид стратегии ТО можно характеризовать по следующим признакам. По информации об объекте – параметрическая и непараметрическая; назначения сроков проведения управляющих воздействий (УВ) – по наработке или состоянию; по глубине УВ – с минимальным или полным восстановлением; по типу отказа – с частичным или полным отказом; по индикации – при наличии или отсутствии индикации отказа; по резервированию – при наличии или отсутствии резервирования объекта.

Структурная схема наиболее распространенных стратегий ТО изображена на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Наиболее распространенные признаки организации ТО

При организации ТО по признакам 1, 2, (см. рис. 2.3.) диагностирование присовокупляется к плановым проверкам технического состояния объекта (осмотр, испытания, опробования, текущий и плановый ремонт), предусмотренные техническими указаниями по эксплуатации или производственными инструкциями [1, 18, 23].

Признаки 3, 4 указывают на выполнение ТО с широким использованием методов и средств диагностирования. Как уже отмечалось, по такой стратегии необходимо производить диагностирование особо ответственных объектов. Своевременно не устраненный отказ приводит к значительным материальным затратам, снижению электробезопасности, вплоть до летального исхода.

При значительном количестве однотипных объектов и технологической трудности профилактической проверки их ТО организуется по признаку 5 (после отказа), например изоляторы в высоковольтной линии

электропередачи. Диагностирование не производится, с заменой или ремонтом отказавшего объекта выполняется ограниченный объем диагностики. При ТО по признаку 5 из-за отсутствия систематического контроля технического состояния объектов вопрос периодичности ТО и ремонта решается чаще всего на основе субъективных данных, которые не отражают фактического технического состояния объектов.

Существует определенная взаимосвязь между принятой стратегией ТО и допусками на диагностические параметры, см. рис. 2.4.

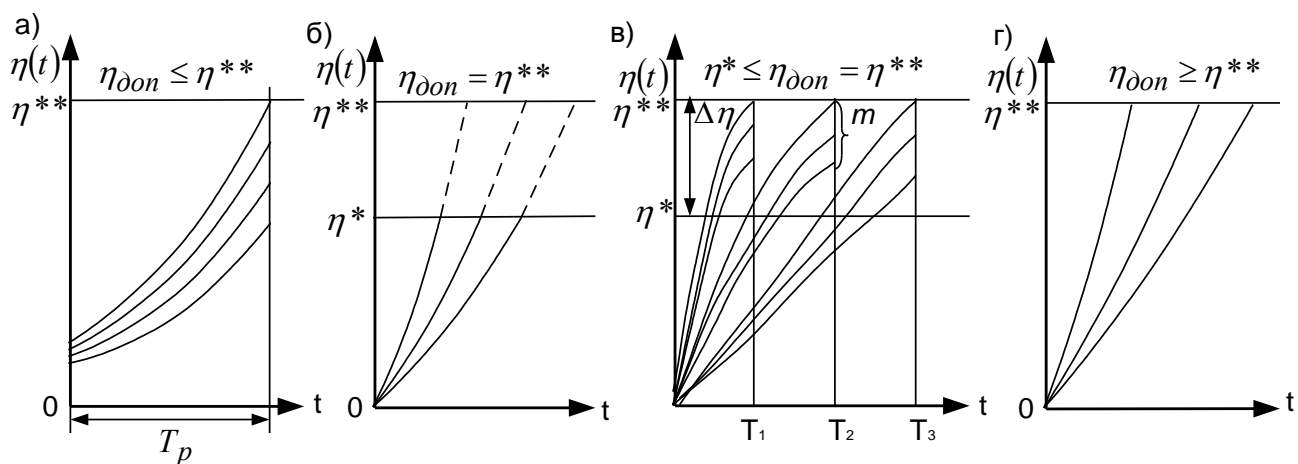


Рис. 2.4. Взаимосвязь с допусками на диагностические параметры:
 а) по ресурсу; б) с непрерывным контролем;
 в) с периодическим контролем; г) после отказа

В стратегии ТО по ресурсу, рис.2.4, а, на основании технических условий на эксплуатацию объекта задаются T_p и $\eta_{don} = \eta^{**}$, см. рис. 2.2. Упреждающий допуск $\Delta\eta$ не вводится. Обычно принимается $\eta_{don} = \eta^{**}$.

При непрерывном контроле, рис. 2.4, б, целесообразно ввести интервал $\Delta\eta$ (допуск). Лучшие показатели функционирования объекта достигаются при $\Delta\eta = 0$, $\eta_{don} = \eta^{**}$, тогда каждый однотипный объект реализует наработку, соответствующую η^{**} .

В стратегии ТО с периодическим контролем, рис. 2.4, в, из технологических соображений замена или ремонт объектов производится при достижении величин T_1, T_2, T_3, \dots , обычно приуроченного к плановым работам. К примеру на интервале $T_1 \dots T_2$ в зоне упреждающего допуска $\Delta\eta$ оказалось m объектов, соответственно которые будут отремонтированы или заменены. При такой организации ТО и ремонта оказывается возможным сконцентрировать материальные и людские ресурсы, повысить качество работ и эффективность использования электроустановок. Особенно это характерно для сложных объектов.

Эксплуатация объектов с использованием стратегии ТО, где каждый объект работает до отказа, широко распространена в мировой практике, рис. 2.4, г. техническое обслуживание каждого подконтрольного одно-

типного объекта заключается в проведении осмотра, регулировке, обнаружении и устранении отказа (без разборки сложной ЭУ).

Применительно ко всему парку однотипных объектов для установления $\eta_{доп}$ необходим контроль уровня надежности, что предполагает: организацию оперативного сбора и обработки информации о надежности, позволяющую определять фактический уровень надежности; оперативное сравнение фактического уровня надежности с нормативным и выполнения анализа возможных последствий увеличения (уменьшения) отказов. Совершенствование методов контроля надежности дает стратегию ТО по состоянию с контролем уровня надежности [18, 23]. Данная стратегия позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты, благодаря чему ее применение расширяется во многих отраслях производства. Отметим, что для эффективного применения стратегии с контролем уровня надежности необходима система анализа влияния всевозможных причин на техническое состояние объектов, т.е. диагностирования. Особое место при применении стратегии ТО с контролем уровня надежности занимают выбор и назначение допустимого (нормативного) уровня надежности, по которому назначается $\eta_{доп}$.

2.3. Алгоритм диагностирования

Определение технического состояния объекта в зависимости от стадии жизненного цикла, на которой он находится, решается путем диагностирования при проектировании, монтаже (изготовлении), эксплуатации. Алгоритм диагностирования объекта при использовании вероятностных характеристик изображен на схеме рис. 2.5.

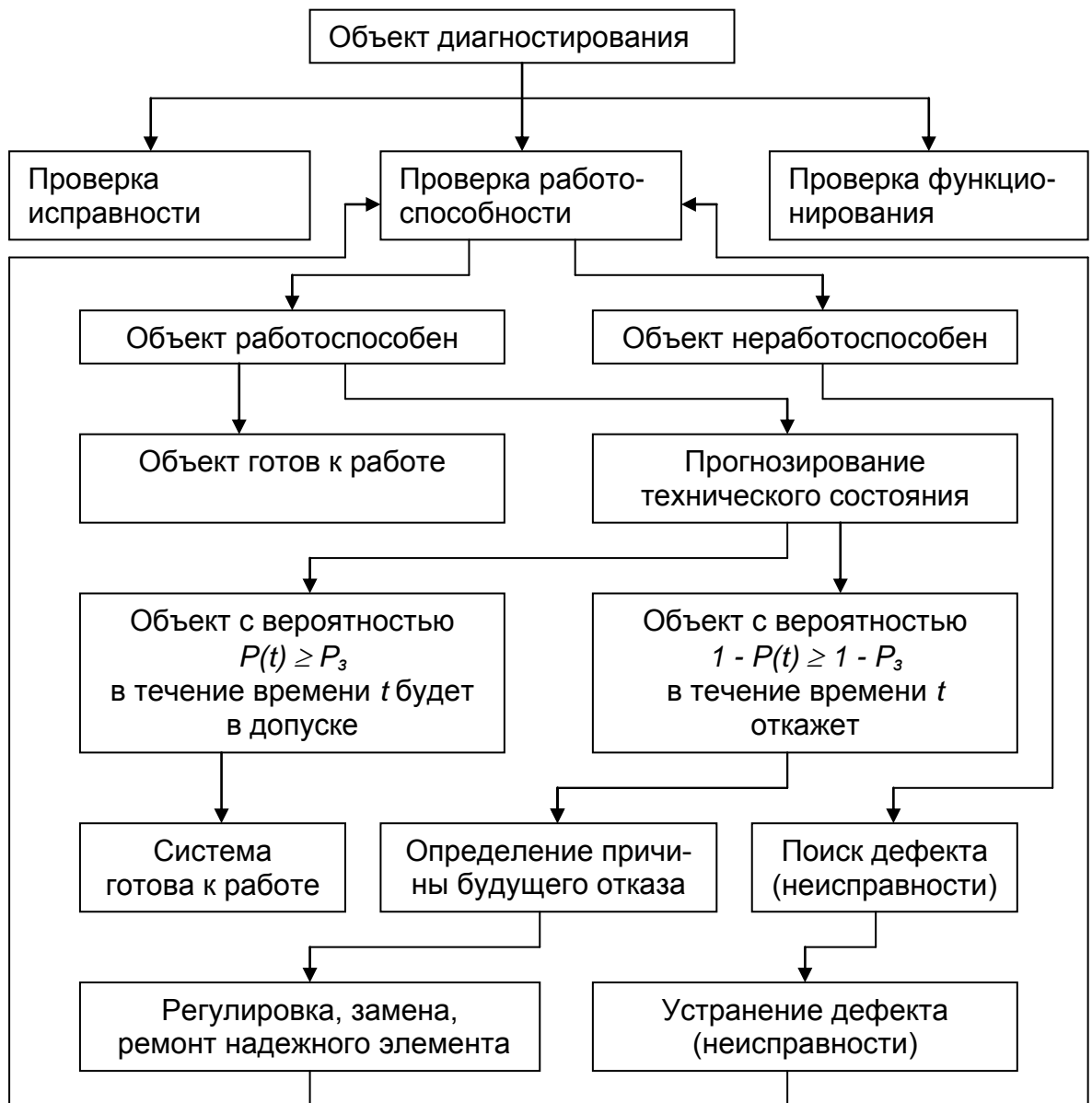


Рис. 2.5. Схема технического диагностирования объекта

Если получена функциональная зависимость $\eta(t)$, то можно считать, что задача диагностирования объекта по искомому признаку решена, включая прогнозирование. Как правило в реальных условиях эксплуатации такие задачи решаются вероятностными методами, например с помощью вероятности безотказной работы $P(t)$. Задаваясь допустимым уровнем надежности P_3 по алгоритму рис. 2.5 производится диагностирование.

2.4. Контроль уровня надежности при ТО однотипных объектов

В электрических сетях любого класса напряжения и назначения используется большое количество однотипных объектов (проводов, изоляторов, трансформаторов, коммутационных аппаратов и т.д.). Контроль

уровня надежности совокупности однотипных объектов осуществляется вероятностно-статистическими методами.

В большинстве объектов ЭУ со значительными сроками наработки определение данных крайне затруднено. В этих условиях более предпочтительно применение стратегии ТО с контролем уровня надежности. Исходной информацией для расчетов является: число однотипных объектов N в системе; число отказов n , выявленных за контрольный период времени, при этом характеризуются: вид отказов, место их проявления, причина и последствия; наработка T однотипных объектов за контрольный период; стоимость отказавших объектов и их замены. Фактический уровень надежности P_{ϕ} однотипных объектов определяется на основе отмеченных выше статистических данных. Заданный уровень надежности, как допустимый, определяется в предположении Пуассоновского потока распределения отказов:

$$P_{зад} = \sum_{n=0}^{n=ВГР} \frac{(\omega \cdot T)^n}{n!} e^{-\omega T}, \quad (2.2.)$$

где $n = ВГР$ – верхняя граница регулирования, соответствующая допустимому значению количества отказов, когда вероятность достигает $P_{зад}$; ω - запланированный параметр потока отказов; T – наработка однотипных объектов за контрольный период; n – число отказов за контролируемый период.

Для определения $n = ВГР$, которая является верхней границей регулирования, требуется знать $P_{зад}$. Обычно она задается на основе предыдущих значений P и экономических соображений. В зарубежной практике, например [23], для определения $ВГР$ принимают $P_{зад} = 0,975$. Это означает, что выброс числа отказов за $ВГР$ происходит случайно с вероятностью 0,025. На практике такую величину можно считать маловероятной. Превышение указанного значения предполагает наличие неслучайных (закономерных) причин отказов. Для устранения этих причин необходимо произвести анализ, разработать и выполнить мероприятия по повышению надежности подконтрольного типа объектов. При наличии ряда расчетов, к примеру ежемесячных, ежегодных появляется возможность объективной оценки эксплуатационной надежности и эффективности мероприятий по снижению отказов до уровня ниже $ВГР$. Как следует из сказанного, контроль за уровнем надежности производится путем сравнения количества фактических отказов n_{ϕ} и $ВГР$. Выполнение неравенства $n_{\phi} < ВГР$ говорит о том, что можно продолжать эксплуатацию данного типа объектов. При $n_{\phi} \geq ВГР$ необходим детальный анализ отказов подконтрольных объектов, разработка мероприятий по повышению их надежности и оценка экономической целесообразности использования стратегии ТО с контролем уровня надежности. Применительно к

высоковольтным ЭУ возможности широкого применения анализируемой стратегии должны быть проверены по вопросам безопасности.

2.5. Диагностические признаки, методы и средства контроля состояния объектов

В условиях эксплуатации в первую очередь необходимо обеспечить работоспособность электроустановок. При многообразии воздействующих факторов за длительное время объем и содержание контрольных проверок приходится увеличивать. Например для силового трансформатора явно недостаточно контроля таких важнейших характеристик как: сопротивление изоляции обмоток; тангес угла диэлектрических потерь $tg\delta$; отношения C_2/C_{50} и $\Delta C/C$, [21].

В таблице 2.1 показана взаимосвязь диагностических признаков, методов и средств контроля электроустановок.

Таблица 2.1.

Диагностические признаки, физические закономерности проявления дефекта, методы и средства контроля

Диагностический признак	Физическая закономерность проявления дефекта	Методы и технические средства контроля состояния объекта
1	2	3
1. Снижение электрической прочности	Старение (деструкция). Увлажнение. Изменение изоляционного расстояния.	- Измерение $tg\delta$ - (измерительный мост Р-2026; установка М-4000; измерение сопротивления мегомметром на 2500 В; аппарат АКИ-70 (АИМ-90). - Визуальный контроль, бинокли, линзы, эндоскопы, волоконно – оптические устройства. - Оптический метод. - Метод проникающего излучения (рентгено и гамма графирование) – электро-рентгенография электрических кабелей и муфт.
2. Ухудшение диэлектрических характеристик изоляции	Изменение электрической емкости. Изменение диэлектрической проницаемости. Возрастание тока утечки. Рост значения $tg\delta$.	- Емкостный метод. - Контроль частотных характеристик. - Измерительный мост Р-2026, установка М-4000. - Специальные схемы непрерывного контроля изоляции по изменению частотных характеристик.

Продолжение табл. 2.1.

	2	3
3. Изменения распределения напряжения	<p>Появление акустических сигналов.</p> <p>Появление электромагнитных сигналов в диапазоне 3-13 мкм.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Оптический метод (бинокли, использование фотоумножителей, электронно-оптические преобразователи). - Тепловизионный метод. - Акустический метод. - Зависимость акустической эмиссии от напряжения на высоковольтной изоляции. - Измерительные штанги ШИ-35 и др.
4. Частичные разряды	<p>Появление электромагнитных сигналов.</p> <p>Появление акустических сигналов.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Метод акустической эмиссии. - Средства инфракрасной техники, электронно-оптический дефектоскоп «Филин-3», «Филин-6» и др. - Ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66ПМ. - Тепловизоры МФ-20 тВ, Икар-3, ТВ-03, АГА 782, «Ирис-200» и др. [16, 18].
5. Появление продуктов разложения твердой и жидкой изоляции	<p>Появление различных газов.</p> <p>Появление воды и кислот.</p> <p>Появление растворимых газов в масле аппаратов.</p> <p>Изменение физико-химических свойств изоляционного материала.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Визуальная проверка. - Метод хроматографирования (приборы ЛМХ-80, «Модель 370», Агат и др. [18]). - Электрохимический сигнализатор водорода. - Использование мегомметра, фронтографа 2500 В.
6. Перегрев контактов и отдельных частей электроустановки	<p>Инфракрасное излучение.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Метод амперметра – вольтметра для измерения переходного контакта. - Оптический метод. - Вихретоковый метод. - Инфракрасный и тепловизионный контроль (тепловизоры НФ 20тВ, Икар-3, ТВ-03, Рубин 2, Янтарь МТ, пирометры Икар, ИКД, Термопоинт-90 и др. [16, 18]) - Инфракрасный термометр типа ИК-10Р и др. - Инфракрасный сканер «Super-E». - Термоиндикаторные краски. - Оптические люминисцентные датчики.
7. Электромагнитные высоковольтные переходные процессы	<p>Спектр высокочастотных сигналов.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Метод импульсов на частотах до 500 кГц. - Метод частотных характеристик (выявление деформаций обмоток). - Электронный осциллограф типа С9-8.

Продолжение табл. 2.1.

1	2	3
8. Изменение спектрального состава токов и напряжений	Гармоники нулевой и обратной последовательности. Искажение кривых тока и напряжения.	- Осциллограф цифровой запоминающий типа С9-8. - Информационно-вычислительный комплекс (ИВК) типа «Омск», «Эрис» и др. - Моделирование процессов. - Методы теории вероятностей и математической статистики.
9. Ухудшение характеристик несущих и фиксирующих элементов электроустановки	Деградация железобетона. Коррозия металла. Износ при трении. Местный отжиг цветного металла. Изменение положения объекта в пространстве.	- Методы: физики твердого тела, сопротивления материалов, теоретической механики. - Использование физических эффектов. - Вагон – лаборатория контактной сети (ВИКС-76, вагон НИИЭФА). - Инфракрасный дефектоскоп ИКД. - Пирометр «Термопоинт 90» фирмы AGEMA (Швеция) и др. [18]. - Диагностирование электрокоррозии (устройства АДО-2М, «Диакор», ИДА-2. Измерение толщины защитного слоя бетона – прибор ИЗС-10М; прочность бетона – приборы: «Бетон-5»; УВК-1М; УК-12П; УК-14ПМ – диагностирование железобетонных опор контактной сети и др. [18].

Значительный перечень методов и средств диагностирования объектов электроустановок обусловлен рядом причин и в частности тем, что в эксплуатации необходимо обеспечить высокую надежность их с выявлением предотказных состояний. Отказ с коротким замыканием в высоковольтных силовых установках сопряжен со значительными технико-экономическими затратами. При выборе системы диагностирования следует учесть:

1. Находящиеся в эксплуатации силовые высоковольтные трансформаторы системы электроснабжения территориально разобщены, находятся в различных режимах потребления мощности, объем и содержание статических данных о надежности их как правило различны. Диагностирование осуществляется для одного трансформатора.

2. Возможности восстановления силовых трансформаторов в месте установки, вне заводских условий, ограничены.

3. Конструктивно подстанции выполнены так, что не все трансформаторы можно диагностировать под рабочим напряжением.

4. Интенсивное влияние факторов окружающей среды при диагностировании ВЛ 6(10) ... 220 кВ под рабочим напряжением ограничивает

применение и без того трудоемких технологий использования прибора типа «Филин» или измерительных штанг.

5. В кабельных линиях как правило при диагностировании производится поиск точного места повреждения (пробоя). Определение предотказного (предельного) состояния кабеля связано с большими сложностями, чем в воздушной ВЛ.

2.6. Техническое обслуживание, методы и средства определения места отказа в кабельной линии

Высоковольтные кабельные линии, сооруженные в соответствии с требованиями правил устройства электроустановок (ПУЭ) и эксплуатируемые согласно соответствующих технических указаний, служат десятилетиями и более лет. За это время по различным случайным причинам появляются неисправности, развиваются дефекты вплоть до отказа. Основные причины повреждения силовых кабелей: воздействие высоких температур различного рода источников тепла; коррозия металлических оболочек кабелей из-за наличия блуждающих токов и агрессивных грунтов; механические повреждения в результате недопустимых изгибов кабеля; превышение допустимой разности уровней между высшей и низшей точками расположения кабеля по трассе; недостаточная компенсация температурных изменений в кабеле из-за укладки его без запаса по длине; несоблюдение температурных режимов при прокладке кабелей.

Техническое обслуживание кабельных линий усложняется тем, что подавляющая часть их прокладывается в земляных траншеях. Основные операции ТО: обход трасс и осмотр кабельных линий с периодичностью, предписанной соответствующими правилами (например ПЭЭП – правила эксплуатации электроустановок потребителей, [20]); контроль за нагрузкой и нагревом кабелей и сравнение их с паспортными по проверяемому кабелю; контроль за коррозией металлических оболочек кабелей и разработка мер борьбы с ней; профилактические испытания кабелей [16].

Кабельные линии подвергаются профилактическим испытаниям в плановом порядке. Своевременное проведение испытаний повышает эксплуатационную надежность, так как выявляются слабые места и доводятся до пробоя, вследствие чего уменьшается количество отказов кабелей, используемых по назначению. Кабель с бумажной изоляцией испытывается повышенным выпрямленным напряжением продолжительностью 10 мин: кабель на 6 кВ должен выдерживать 36 кВ, кабель 10 кВ соответственно 60 кВ, а 35-ти киловольтный должен выдержать 175 кВ, при другой изоляции испытательные напряжения естественно так же другие [14]. Кабельные линии 3 – 35 кВ, во время эксплуатации получившие отказы, подвергаются испытаниям на реже 1 раз в год.