

## ОТ АВТОРОВ

**В**о 2-й половине XX в. появились мощные электроэнергетические системы (ЭЭС) с аппаратами управления высокой конструктивной сложности, способные выполнять сложные задачи. В процессе функционирования систем стало расти число отказов составляющего их оборудования. Не вызывает сомнений, что качество, эффективность, безопасность, живучесть, управляемость, устойчивость системы в целом возможны только при стабильной работе образующих ее элементов. Каждое из приведенных свойств имеет смысл при наличии изначального свойства любого оборудования — надежности. Поэтому столь естественно появление в 1950-х гг. новой дисциплины — теории надежности как науки о закономерностях отказов различных систем: сначала технических, а затем и биологических, экономических и др.

Имеющаяся в настоящее время литература по надежности, которая может быть рекомендована студентам, к сожалению, либо содержит общие вопросы теории и практики надежности, либо вопросы отраслевого характера (авиационные, радиотехнические, энергетические, автоматизированные, автоматические и другие системы), либо отдельные вопросы надежности. Предлагаемое учебное пособие предназначено для ликвидации этого пробела и для освещения достаточно узкой области теории надежности — надежности электрических аппаратов, используемых в современных ЭЭС.

# ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ «НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»

**Ц**ель курса: обучение основам теории надежности электрических аппаратов на всех этапах их проектирования, изготовления, монтажа, наладки и эксплуатации.

В результате изучения учебной дисциплины студенты должны знать:

- основные понятия теории надежности;
- математические методы, используемые в теории надежности;
- методы выбора и обоснования количественных показателей надежности;
- научные основы и практические методы использования теории надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации элементов электрических аппаратов;
- методы расчета электрических аппаратов на надежность;
- этапы расчета надежности при решении практических вопросов исследования электрических аппаратов;
- характеристики надежности при расчете показателей эффективности и экономичности электрических аппаратов;
- методы испытаний элементов электрических аппаратов на надежность;
- причины появления теории надежности;
- этапы становления теории надежности;

- существующие и перспективные методы повышения надежности электрических аппаратов.

Первый раздел учебника «Математические методы в теории надежности» предназначен для ознакомления с общими проблемами теории надежности, основными понятиями и количественными показателями надежности исследуемых объектов. Надежность объектов рассматривается как сложное свойство, состоящее из свойств безотказности, ремонтопригодности, долговечности и сохраняемости. Даётся подробное абстрактное описание процесса функционирования объектов и классификация их отказов. Также рассматриваются элементы общей теории множеств и элементы математической логики, способствующие изложению дальнейшего теоретического материала по теории надежности. Приводятся статистические методы оценки в теории надежности; излагаются стохастические закономерности, используемые в теории надежности, аналитические зависимости между показателями надежности. Анализируются законы распределения дискретных непрерывных случайных величин, наиболее часто применяющихся в теории надежности. Особое внимание обращено на раскрытие сущности марковских случайных процессов, адекватно описывающих надежность изделий как объектов исследования.

Материалы второго раздела «Расчет надежности электрических аппаратов» с достаточной степенью общности позволяют понять суть расчетов электрических аппаратов на надежность.

Третий раздел учебного пособия «Надежность электрических аппаратов при эксплуатации» посвящен основам инженерной методики планирования, проведения и обработки результатов многофакторных испытаний электрических аппаратов на надежность, а также методам повышения надежности электрических аппаратов.

В четвертом разделе учебного пособия «Техническая диагностика электрических аппаратов» даны методологические основы технического диагностирования, математические модели дискретных систем и систем диагностирования при случайных воздействиях; рассмотрены проектирование и оптимизация устройств диагностирования; рационализация структуры сложных систем диагностирования. Приведены сведения о направлениях дальнейшего развития теории и практики надежности электрических аппаратов. Показана связь теории и практики надежности с вопросами диагностики, контроля, идентификации отказов, дефектов

и повреждений объектов. Подчеркнуто исключительное влияние оценки надежности на повышение характеристик безотказности, живучести и экономической эффективности современных электрических аппаратов.

В библиографическом списке указаны основные и дополнительные литературные источники. Каждая глава учебника дополнена задачами и контрольными вопросами.

Учебное пособие также содержит приложения: глоссарий надежности, таблицы часто встречающихся функций и критериев при расчете надежности. Авторы приносят глубокую благодарность доктору технических наук, академику РАН, профессору И. А. Рябинину; доктору технических наук, заслуженному деятелю науки РФ, профессору Ю. П. Коськину; доктору технических наук, профессору В. В. Титкову, доктору технических наук, профессору В. Л. Беляеву за внимательное прочтение рукописи, доброжелательную критику и ряд полезных замечаний, способствующих ее улучшению.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АС — атомная станция  
АСНИ — автоматизированная система научных исследований  
АСОИУ — автоматизированная система обработки информации и управления  
АСУ — автоматизированная система управления  
АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическими процессами  
БДНФ — бесповторная дизъюнктивная нормальная форма  
БФАЛ — бесповторная функция алгебры логики  
ВВР — вероятность безотказной работы  
ВПО — выходной параметр объекта  
ВПЭ — выходной параметр элемента  
ДНФ — дизъюнктивная нормальная форма  
ЗИП — запасные части, инструмент, принадлежности  
КЗ — короткое замыкание  
КНФ — конъюнктивная нормальная форма  
МО — математическое ожидание  
МФИН — многофактурные испытания на надежность  
ННС — модель «нагрузка — несущая способность»  
ОДНФ — ортогональная дизъюнктивная нормальная форма  
ОД — объект диагностирования  
ОУ — объект управления  
ППД — модель «параметр — поле допуска»  
ППР — планово-предупредительный ремонт  
ППЭ — прочностной параметр элемента  
ПТС — параметр технического состояния  
ПФ — прогнозирующая функция  
ПФЭ — полный факторный эксперимент  
РМОТ — рабочее место оператора-технолога  
САР — система автоматического реагирования  
САУ — система автоматического управления  
СКНФ — совершенная конъюнктивная нормальная форма  
СКО — среднее квадратическое отклонение  
СОИ — система отображения информации  
СДНФ — совершенная дизъюнктивная нормальная форма  
СС — сложная система  
СУ — система управления  
СЧМ — система «человек — машина»  
ТО — техническое обслуживание  
ТУ — технические условия  
ФАЛ — функция алгебры логики  
ФПО — функциональный параметр объекта  
ЦТП — центральная предельная теорема  
ЧМИ — человеко-машинный интерфейс  
ЭА — электрический аппарат  
ЭВМ — электронная вычислительная машина  
ЭЭС — электроэнергетическая система  
ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$P(t)$  — вероятность безотказной работы  
 $Q(t)$  — вероятность отказа  
 $D_\xi$  — дисперсия случайной величины  $\xi$   
 $\lambda(t)$  — интенсивность отказов  
 $M$  — математическое ожидание непрерывной случайной величины  
 $M_\xi$  — математическое ожидание непрерывной случайной величины  $\xi$   
 $M_\xi^{(k)}$  —  $k$ -й момент случайной величины  $\xi$   
 $S$  — среднее квадратическое отклонение отказа  
 $s$  — оценка среднего квадратического отклонения  
 $m_t$  — оценка математического ожидания  
 $\Omega$  — пространство элементарных событий  
 $\omega$  — обозначение элементарных событий  
 $\Phi$  — пустое множество  
 $f_\xi(x)$  — плотность распределения величины  $\xi$

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

---

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ В ТЕОРИИ  
НАДЕЖНОСТИ**

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

## 1.1. НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ КАК КОМПЛЕКСНОЕ СВОЙСТВО

**В** числе важнейших эксплуатационно-технических характеристик, определяющих эффективность объектов, особое место занимают показатели надежности.

**Надежность** — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. В данном определении, во-первых, подчеркнута непрерывность выполнения объектом заданных функций. Нет смысла говорить о надежности объекта, например, во время проведения на нем планово-предупредительных работ, ремонтов, замены оборудования, освидетельствований и других мероприятий, связанных с остановкой объекта, так как в это время объект не выполняет своих функций, а именно: не выдает электроэнергию и промышленное тепло, не перевозит грузы и пассажиров и т. д. Во-вторых, в определение надежности включено понятие «установленные пределы». Сложная система при отказе отдельных элементов или подсистем сохраняет свою работоспособность и может обеспечивать своих потребителей, например, энергией, но в меньшем количестве. В-третьих, надежность объекта целесообразно определять за определенные промежутки времени, например, меж-

ду перегрузками топлива, за время работы на заданном уровне мощности, за время до прекращения эксплуатации и др.

В зависимости от условий решаемой задачи один и тот же объект может именоваться системой или элементом. Под системой (системой элементов) обычно понимают объект, в котором необходимо и возможно различать определенные взаимозависимые части, соединенные воедино. Элемент — определенным образом ограниченный объект, рассматриваемый как часть другого объекта. Понятия «система» и «элемент» относительны, любой объект при решении одних задач может рассматриваться как система, а при решении других — как элемент. Например, электрический аппарат в целом при анализе его надежности является сложной системой, элементами которой можно назвать устройства, обеспечивающие селективность отключения, перегрузки, короткого замыкания и др. Но если производится анализ надежности системы управления ЭЭС, включающей группу электрических аппаратов, то в этом случае электрический аппарат является элементом системы. В свою очередь, ЭЭС может явиться элементом более крупной ЭЭС данного экономического района страны. Однако такое представление о надежности объекта было бы неполным, если не учитывать структуру элемента, заданную комплектом технической документации.

Надежность как сложное свойство в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний следующих свойств:

- безотказность;
- ремонтопригодность;
- долговечность;
- устойчивоспособность;
- сохраняемость;
- безопасность.

Для объектов, работающих непрерывно, таких, например, как энергоблок электрической станции, обзорный локатор аэродрома, магистральные нефте- и газопроводы, из этих свойств наиболее важны три первые. Объекты, работающие сезонно (сельскохозяйственная техника), напротив, должны, кроме приемлемой безотказности, иметь высшие показатели ремонтопригодности, долговечности и сохраняемости. Свойства, составляющие надежность, могут характеризовать и другие особенности объекта. Так, безопасность ЭЭС в значительной степени обусловлена безотказностью электрооборудования, хотя имеет и самостоятельное значение.

**Безотказность** — это свойство объектов сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Обычно она рассматривается применительно к режиму эксплуатации объекта, и перерывы в его работе (плановые и внеплановые) не учитываются.

Безотказность характеризуется техническим состоянием объекта: исправностью, неисправностью, работоспособностью, неработоспособностью, дефектом, повреждением и отказом. Каждое из этих состояний обладает совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, и качественных признаков. Номенклатура этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливаются нормативной документацией на объект.

Состояние объекта, обуславливающее способность выполнять заданные функции, которые соответствуют нормативно-технической и конструкторской документации, есть его **работоспособность**.

Исправное состояние объекта предполагает соответствие всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. В противоположность этому, неисправное состояние объекта означает несоответствие хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации. Если значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность элемента, к примеру электрического аппарата, выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, то такое состояние определяется как **неработоспособное**. А событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, называется **отказом**. Событие, состоящее в нарушении исправного состояния объекта, но сохраняющего его работоспособность, носит название **повреждения (дефекта)**.

Границы между исправным и неисправным, работоспособным и неработоспособным состояниями обычно условны и представляют собой, в основном, совокупность определенных значений параметров объектов. Эти значения одновременно являются границами соответствующих допусков. Работоспособность и неработоспособность могут быть как полными, так и частичными. Если объект полностью работоспособен, то в определенных условиях эксплуатации возможно достижение максимальной эффективности его применения. Эффективность применения в тех же условиях частично работоспособного объекта меньше максимальной,

но значения ее показателей находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным для данного объекта.

Работоспособность должна рассматриваться применительно к определенным внешним условиям эксплуатации объекта. Элемент, работоспособный в одних условиях, может, оставаясь исправным, оказаться неработоспособным в других.

Переход объектов из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Общая схема состояний и событий приведена на рис. 1.1.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации, выполнение которых обеспечивает его применение по назначению. Очевидно, что работоспособный элемент может быть неисправным или, например, не удовлетворяющим эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида не препятствует его применению по назначению.

Переход элемента из исправного в неисправное состояние происходит вследствие дефектов. Термин «дефект» применяют, в основном, на этапах изготовления и ремонта, когда требуется учитывать отдельно каждое конкретное несоответствие объекта требованиям, установленным нормативной документацией. Термин «неисправность» используется, когда требуется учитывать изменения технического состояния элементов независимо от числа обнаруженных дефектов. Находясь в неисправном состоянии, объект имеет один или несколько определенных дефектов. В этом плане возможно представление состояний в виде, показанном на рис. 1.2.

**Ремонтопригодность** — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и об-

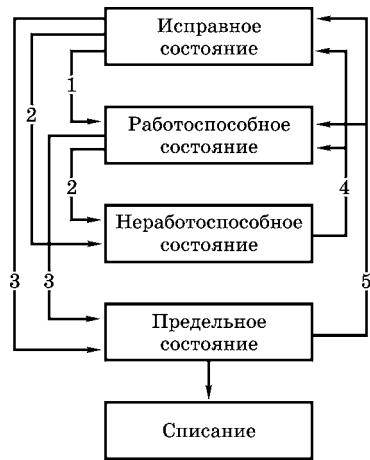


Рис. 1.1

Схема постоянных состояний и событий объектов:

1 — повреждение; 2 — отказ; 3 — переход объекта в предельное состояние; 4 — восстановление; 5 — ремонт.



Рис. 1.2  
Состояния и события объекта

наружению причин отказов, повреждений и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Ремонтопригодность представляет собой совокупность технологичности при техническом обслуживании и ремонтной технологичности объектов. Свойство ремонтопригодности полностью определяется его конструкцией, т. е. предусматривается и обеспечивается при разработке, изготовлении и монтаже объектов с учетом будущего целесообразного уровня их восстановления, который определяется соотношением ремонтопригодности и внешних условий для выполнения ремонта, в том числе устанавливаемых для этого пределов соответствующих затрат. Отсюда происходит относительность деления объектов на восстанавливаемые и невосстанавливаемые применительно к определенным внешним условиям (точнее, на подлежащие и не подлежащие восстановлению). Один и тот же элемент в зависимости от окружающих условий и этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, доступность для выполнения ремонта встроенных электрических аппаратов во время работы подсистемы ЭЭС ограничена, эти элементы при работе ЭЭС можно отнести к невосстанавливаемым. Если электрический аппарат доступен для ремонта, то его относят к восстанавливаемым.

Таким образом, деление объектов на восстанавливаемые и не восстанавливаемые зависит от рассматриваемой ситуации и в значительной степени условно. Необходимо и безусловное деление этих же элементов на вообще доступные для ремонта и не подлежащие ему применительно ко всему времени их существования, т. е. на ремонтируемые и неремонтируемые. Деление по обоим признакам для многих объектов совпадает: ремонтируемый элемент может быть восстанавливаемым на протяжении всего срока службы, а неремонтируемый остается невосстанавливаемым в течение всего времени существования. Однако имеются ремонтируемые объекты, которые в определенных ситуациях в случае возникновения отказа в течение данного интервала времени не подлежат восстановлению. С другой стороны, есть неремонтируемые элементы, самовосстанавливающие работоспособность в случае возникновения некоторых отказов — в частности, при наличии резервных элементов и соответствующих автоматических устройств, осуществляющих в таких случаях переход на использование резерва (например, элементы систем управления и защиты).

Следовательно, при формулировании и решении задач обеспечения, прогнозирования и оценивания надежности существенное

практическое значение имеет решение, которое должно приниматься в случае отказа объекта, — восстанавливать его или нет. Отнесение объекта к восстанавливаемым или невосстанавливаемым предполагает выбор определенных показателей надежности. Например, очевидно, что для невосстанавливаемого объекта не имеет смысла такой показатель надежности, как среднее время восстановления.

**Долговечность** — это свойство объектов сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Для предельного состояния объекта характерно следующее: дальнейшее его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление исправного или работоспособного состояний невозможно или нецелесообразно. Критерием предельного состояния служит признак/совокупность признаков предельного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и конструкторской документации. Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности или эффективности.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение его эксплуатации.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый совпадает с неработоспособным состоянием; второй обусловлен тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента времени дальнейшая эксплуатация пока еще работающего элемента согласно определенным критериям оказывается недопустимой в связи с безопасностью. Переход ремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит раньше момента возникновения отказа.

Для ремонтируемых объектов можно выделить три вида предельных состояний. Первый и второй предполагают капитальный или средний ремонт, т. е. временное прекращение эксплуатации. Третий — окончательное прекращение эксплуатации объекта.

Таким образом, в общем случае долговечность объектов, измеряемая техническим ресурсом или сроком службы, ограничена не отказом объекта, а переходом в предельное состояние, что означает необходимость в капитальном или среднем ремонтах либо вообще невозможность дальнейшей эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим контактную систему ЭА. Основным ее органом является контактный узел, функции которого

заключаются в замыкании и размыкании цепи. Надежность контактной системы ЭА (предельное состояние) определяется, в основном, коммутационной износостойкостью контактов. На износостойкость влияет множество факторов:

- величина тока;
- магнитное дутье;
- геометрические размеры контактов;
- начальное нажатие;
- вибрация, возникающая при замыкании и при ударе якоря электромагнитного привода об опору;
- электрическая дуга, возникающая при отключении (размыкании).

Одним из центральных понятий теории надежности является понятие **наработка**, потому что отказы и переходы в предельное состояние объектов обусловлены, как правило, их работой. Под наработкой понимается продолжительность или объем работы объекта, она измеряется в единицах времени и единицах объема выполненной работы.

Объект может работать непрерывно (за исключением вынужденных перерывов, обусловленных возникновением отказа и ремонтом) или с перерывами, не обусловленными изменением технического состояния. Во втором случае различают непрерывную и суммарную наработку.

Оба вида наработка могут представлять собой случайные и детерминированные величины (например, наработка за смену в случае отсутствия вынужденных простоев). Суммарную наработку в ряде случаев сопоставляют с определенным интервалом календарного времени.

Если объект работает в различные интервалы времени с различной нагрузкой (на разных уровнях мощности), различают непрерывную и суммарную наработку для каждого вида или степени нагрузки (для разного уровня мощности).

**Наработка до отказа** — это наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. Она характеризует безотказность как неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

**Наработка между отказами** — это наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа; она определяется продолжительностью работы объекта от  $i$ -го до  $(i + 1)$ -го отказа, где  $i = 1, 2, \dots$ . Она относится только к восстанавливаемым объектам.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)