

658,26
К 64

Библиотека электротехника

**Е. А. Конюхова
Э. А. Киреева**

**НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

658.26
К64

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу "Энергетик"

План выпусков

Первая половина 2001 г.

Курбангалиев У. К. **Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.**

Овчинников В. В. **Автоматическое повторное включение.**

Кузнецов А. П., Лукоянов В. Ю. и др. **Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики.**

Шабад М. А. **Защита генераторов малой и средней мощности.**

Иноземцев Е. К. **Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (две части).**

Вторая половина 2001 г.

Шкарин Ю. П. **Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи (две части).**

Овчаренко Н. И. **Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики.**

Безчастнов Г. А., Красильников А. М. и др. **Контроль состояния изоляции электрических машин.**

Шуин В. А., Гусенков А. В. **Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ.**

Конюхова Е. А., Киреева Э. А. **Надежность электроснабжения промышленных предприятий.**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу "ПРЕССА РОССИИ". Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы "Библиотечки электротехника"

— приложения к журналу "Энергетик"

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу "Энергетик"

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 12(36)

Е. А. Конюхова

Э. А. Киреева

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Москва

ИТФ "Энергопрогресс", "Энергетик"

2001

д. 9052

НИГРЭС

**НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА**

Главный редактор журнала "Энергетик" А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

"Библиотечки электротехника"

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабал

Конюхова Е. А., Киреева Э. А.

К 64 Надежность электроснабжения промышленных предприятий. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. — 92 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик"; Вып. 12(36)]

Изложены основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения, рассмотрены основные показатели, характеризующие надежность работы электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий. Приведены примеры расчета показателей надежности электроснабжения по средним значениям вероятностей состояния элементов для различных видов схем, а также средства и методы повышения надежности электрооборудования и систем электроснабжения.

ISSN 0013-7278 © НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2001

Предисловие

Надежность системы электроснабжения можно определить как способность этой системы и ее отдельных элементов обеспечивать бесперебойное питание электроэнергией промышленное предприятие, не приводящее к срыву производства и к авариям в электрической и технологической частях.

Надежность характеризуется повреждаемостью оборудования, ожидаемой продолжительностью бесперебойной работы, длительностью перерыва питания электроэнергией, а также ущербом от перерыва питания и другими факторами.

Повреждаемость системы электроснабжения складывается из повреждаемости электрооборудования; из-за нарушения правильной эксплуатации; некачественной ревизии и профилактики; ошибочных действий персонала; неблагоприятных условий окружающей среды и др.

Большое значение для обеспечения бесперебойного питания и успешной ликвидации аварии имеет правильная эксплуатация электрохозяйства промышленных предприятий.

Одной из главных проблем в системах электроснабжения является обеспечение оптимальной надежности этих систем, при которой приведенные ежегодные затраты, включая ущерб от перерывов электропитания, будут минимальны.

В данной брошюре использованы сведения по надежности систем электроснабжения промышленных предприятий, приведенные в периодической печати и книгах, многие из которых стали библиографической редкостью.

Авторы стремились представить этот материал таким образом, чтобы он был доступен широкому кругу инженерно-технических работников в области промышленного электроснабжения.

Глава 1, 2 (кроме § 2.5) и 5 написаны Э. А. Киреевой; главы 3, 4 и § 2.5 написаны Е. А. Конюховой.

**Замечания и пожелания по данной брошюре
просим направлять по адресу:
109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала "Энергетик".**

Авторы

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Краткие сведения о системах электроснабжения промышленных предприятий

1.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Современная система электроснабжения промышленного предприятия должна удовлетворять следующим *основным требованиям*:

- экономичности;
- надежности;
- безопасности;
- удобства эксплуатации;
- обеспечения надлежащего качества электроэнергии (уровней напряжения, стабильности частоты и т.п.);
- необходимой гибкости, обеспечивающей возможность расширения при развитии предприятия.

Важные *дополнительные требования* к системам электроснабжения предъявляют:

- электроприемники с резкопеременной циклически повторяющейся ударной нагрузкой;
- электроприемники непрерывного производства, требующие бесперебойности питания при всех режимах системы электроснабжения.

Специальные требования к системам электроснабжения и электрооборудованию предъявляют электроустановки, расположенные в зонах с загрязненной средой и в районах Крайнего Севера.

При реконструкции и проектировании системы электроснабжения учитывают многочисленные факторы, к числу которых относятся:

- потребляемая мощность;
- категория надежности питания отдельных электроприемников;

- графики нагрузок крупных потребителей;
- характер нагрузок;
- размещение электрических нагрузок на генеральном плане предприятия;
- число и мощность подстанций и других пунктов потребления электроэнергии;
- напряжение потребителей;
- число, расположение, мощность, напряжение и другие параметры источников питания;
- требования энергетической системы;
- учет совместного питания с другими потребителями;
- требования аварийного и послеаварийного режимов;
- степень загрязненности среды;
- требования ограничения токов КЗ;
- условия выполнения простой и надежной релейной защиты, автоматики и телемеханики и др.

Определяющими факторами, тесно связанными между собой, являются: характеристика источников питания, а также мощность и категоричность потребителей электроэнергии. При построении рациональной системы электроснабжения учитывают общую энергетику рассматриваемого района, перспективный план его электрификации.

При этом главные понижающие подстанции (ГПП) на крупных предприятиях могут в некоторых случаях выполнять функции районных подстанций. Целесообразно с точки зрения экономии строить единую энергетическую сеть района, включая тяговые сети.

При реконструкции действующих и проектировании новых систем электроснабжения различных промышленных предприятий района стремятся к максимальной унификации схемных и конструкторских решений электрической части, электрооборудования и канализации электроэнергии. Подсобные устройства такие как трансформаторно-масляное хозяйство, электроремонтное хозяйство, диспетчерская связь и другие, а также крупное резервное электрооборудование выполняют общими для всех этих предприятий.

Как показал опыт эксплуатации, при реконструкции действующих и проектировании новых систем электроснабжения целесообразно проводить принцип "децентрализации" трансформирования и коммутации электроэнергии, благодаря чему:

- источники высшего напряжения (ВН) максимально приближаются к электроустановкам потребителей;
- сводятся к минимуму сетевые звенья и ступени промежуточной трансформации и коммутации;
- уменьшаются потери электроэнергии;

повышается в целом надежность электроснабжения.

Практика эксплуатации, а также опыт, накопленный при реконструкции и проектировании систем электроснабжения, позволили на основе обобщения этих данных выработать критерии в виде нормативных требований обеспечения надежности электроснабжения электроприемников, которые сформулированы в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ).

Согласно ПУЭ все электроприемники подразделяют на три категории с выделением в I категории особой группы электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы для жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

К электроприемникам I категории относятся те, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный материальный ущерб, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов коммунального хозяйства.

К электроприемникам II категории относятся те, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности городских и сельских жителей.

К электроприемникам III категории относятся все остальные, не попадающие под определение I и II категорий.

Для электроприемников I категории перерыв электроснабжения может быть допущен лишь на время автоматического ввода резерва (АВР), т.е. на доли секунды; для особых непрерывных производств предусматривается технологическое резервирование или специальные устройства безаварийного останова технологического процесса, действующие при нарушении электроснабжения. Для электроприемников II категории допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады (десятки минут, единицы часов).

Для электроприемников III категории допустимы перерывы до 1 сут. Частота перерывов в явном виде ни для одной категории приемников не нормируется. Реальные узлы нагрузки систем электроснабжения содержат от единиц до десятков тысяч электроприемников, поэтому имеет место множество решений по обеспечению норм ПУЭ.

Выбор схем питания и распределения электроэнергии, напряжения и конфигурации питающих и распределительных сетей до и выше 1 кВ, числа, мощности, месторасположения и типа подстанций решается комплексно с выполнением в необходимых случаях технико-экономического сравнения вариантов по приведенным затратам. При этом учитывается очень важное условие, а именно: обязательная координация уровней надежности составных звеньев системы электроснабжения таким образом, чтобы надежность повышалась при переходе от потребителей электроэнергии к источникам питания по мере увеличения мощности соответствующих звеньев системы.

Однако надежное питание электроприемников I и основных нагрузок II категории обеспечивают независимо от их места в системе электроснабжения и мощности.

Выбор рациональной системы напряжений для электроснабжения промышленного предприятия определяет режим нейтрали сети, которая может быть:

- изолирована от земли;
- соединена с землей через активные или реактивные сопротивления;
- глухо заземлена.

В первом случае ($U_{ном} = 6, 10, 20, 35$ кВ) при нарушении изоляции одной фазы в какой-либо точке сети может возникнуть однофазное замыкание на землю. Напряжение этой фазы относительно земли становится равным нулю, а напряжение остальных фаз относительно земли повысится до междуфазного напряжения. Ток замыкания на землю $I_{\Sigma 1}$ по сравнению с нагрузочным током сети или ее отдельных линий относительно мал. Замыкание на землю при указанных выше напряжениях практически не влияет на режим работы приемников и считается не аварийным, а лишь аномальным режимом. В этих случаях питание потребителей не прерывается. Из всех видов нарушения изоляции однофазные замыкания на землю в системах с изолированной нейтралью составляют обычно 75 – 85 %; сам факт замыкания существенно влияет на обеспечение требуемой надежности питания потребителей.

В сетях с изолированной нейтралью необходимо обращать внимание на следующее:

1) повышение напряжения двух фаз относительно земли при замыкании на землю третьей фазы приводит к необходимости рассчитывать изоляцию всех фаз относительно земли не на фазное, а на междуфазное (линейное) напряжение ($U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$);

2) возможность образования в месте замыкания на землю перемежающейся дуги обуславливает возникновение коммутационных пе-

ренапряжений с амплитудой $(4 - 6)U_{ном}$, которые могут привести к пробоям изоляции в других местах и других фазах сети, а также к нарушению работы некоторых приемников;

3) тепловое действие дуги в месте замыкания на землю на изоляцию других фаз сети может привести к переходу замыкания на землю в двух- или трехфазное КЗ.

Время, за которое требуется отыскать и отключить возникающее в сети замыкание на землю, обычно принимают равным 2 ч. Ток $I_{з.з}$ не должен превышать 30 А для сетей 6 кВ и 20 А для сетей 10 кВ. Если $I_{з.з}$ превышает допустимые значения, то нейтраль источника питания сети соединяют с землей через заземляющий реактор, благодаря которому ток $I_{з.з}$, имеющий емкостной характер, компенсируется индуктивным током; дуга становится неустойчивой и быстро гаснет. Для ограничения тока $I_{з.з}$ может применяться заземление нейтрали через активное сопротивление.

При глухом заземлении нейтрали ($U_{ном} \geq 110$ кВ) замыкание одной фазы на землю является однофазным КЗ и должно приводить к срабатыванию соответствующей защиты. Чтобы частые отключения линий из-за замыканий на землю не нарушали надежности питания потребителей, на таких линиях применяется однофазное или трехфазное автоматическое повторное включение (АПВ).

В целом система электроснабжения выполняется таким образом, чтобы в условиях послеаварийного режима, после соответствующих переключений и пересоединений она была способна обеспечить питание нагрузки предприятия (с частичным ограничением) с учетом использования всех дополнительных источников и возможностей резервирования (перемычек, связей на вторичном напряжении, аварийных источников и т.п.). При этом возможны кратковременные перерывы питания электроприемников II категории на время переключений и пересоединений и перерывы питания электроприемников III категории на время до 1 сут.

Для наиболее экономичного резервирования в системах электроснабжения учитывают перегрузочную способность электрооборудования, резервирования технологической части, возможность проведения плановых ремонтов и ревизий электрооборудования в период планово-предупредительных ремонтов технологического оборудования. Кроме того, при аварии предусматривается автоматическая или ручная разгрузка от неответственных потребителей с выделением питания нагрузок III категории для возможности их отключения по аварийному, заранее имеющемуся на предприятии, графику.

Многолетние обследования электрохозяйства промышленных предприятий показали, что имеет место недогрузка электрообору-

дования не только при достижении полной проектной мощности, но даже при ее превышении. Естественный последующий рост нагрузок не может служить основанием для завышения параметров электрооборудования и сечения питающих и распределительных сетей при реконструкции и проектировании систем электроснабжения. При росте нагрузок не используют резервы, предусмотренные для обеспечения бесперебойного питания электроэнергией предприятия, так как это может привести к снижению надежности электроснабжения всех потребителей предприятия.

Все более важное значение приобретает при построении рациональной и надежной системы электроснабжения обеспечение бесперебойного питания особой группы электроприемников, потребителей, расположенных в зонах с загрязненной средой, а также в северных районах с тяжелыми климатическими условиями. Особое значение для повышения надежности и экономичности системы электроснабжения имеет обеспечение необходимого качества электроэнергии в связи с ростом резкопеременных нагрузок электропривода, электротермии, электросварки, оказывающих вредное влияние на качество электроэнергии.

При технико-экономических сравнениях возможных вариантов электроснабжения руководствуются директивными документами, в которых даются принципиальные указания для выбора экономически целесообразных технических решений в области энергетики.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Одной из самых главных проблем в промышленной энергетике является энергосбережение и экономия материальных, а также трудовых ресурсов. Сюда можно отнести, например выпуск менее материалоемких, но более надежных и долговечных изделий, более полное использование вторичных сырьевых и энергетических ресурсов, повышение КПД энергоустановок, уменьшение потерь энергии и т.д.

Важным резервом экономии электроэнергии в промышленности является в настоящее время применение энергосберегающих технологий (совершенствование существующих и разработка новых).

Экономия электроэнергии означает прежде всего уменьшение потерь электроэнергии во всех звеньях системы электроснабжения и в самих электроприемниках. Основными путями снижения потерь электроэнергии в промышленности являются следующие:

1) рациональное построение системы электроснабжения при ее реконструкции и проектировании, включающее в себя применение рациональных напряжений, числа и мощности силовых трансформаторов, общего числа трансформаций, места размещения подстанций, схемы электроснабжения, компенсации реактивной мощности и др.;

2) снижение потерь электроэнергии в действующих системах электроснабжения, включающее в себя управление режимами электропотребления, регулирование напряжения, ограничение холостого хода электроприемников, модернизацию существующего и применение нового, более экономичного и надежного технологического и электрического оборудования, применение экономически целесообразного режима работы силовых трансформаторов, замену асинхронных двигателей (АД) на синхронные (СД), где это возможно, автоматическое управление освещением в течение суток, повышение качества электроэнергии и др.;

3) нормирование электропотребления, разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции; нормирование электропотребления предполагает наличие на предприятиях надежных систем учета и контроля расхода электроэнергии;

4) организационно-технические мероприятия, которые разрабатываются конкретно на каждом предприятии с учетом его специфики.

В системах электроснабжения промышленных предприятий и установок энерго- и ресурсосбережение достигается за счет уменьшения потерь электроэнергии при ее передаче и преобразовании, а также за счет применения менее материалоемких и более надежных конструкций всех элементов этой системы. Это учитывается, в частности, при выборе вариантов системы электроснабжения при ее реконструкции и проектировании (например, при выборе номинальных напряжений сетей).

Одним из действенных путей уменьшения потерь электроэнергии является компенсация реактивной мощности (КРМ) потребителей с помощью местных источников реактивной мощности (ИРМ). Причем весьма важное значение имеет правильный выбор типа, мощности, местоположения и способа автоматизации ИРМ.

Компенсация реактивной мощности означает снижение реактивной мощности, циркулирующей между источником тока и приемником, а, следовательно, снижение реактивного тока в генераторах и сетях. Снизить потребление реактивной мощности, т.е. умень-

шить потери активной мощности, можно двумя способами: без применения и с применением компенсирующих устройств (КУ).

К *первому способу* (без применения КУ) относятся: упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима работы оборудования, к повышению коэффициента мощности $\cos \varphi$; замена малозагруженных двигателей двигателями меньшей мощности, переключение статорных обмоток АД напряжением до 1 кВ с треугольника на звезду, если их нагрузка составляет менее 40 %, повышение качества ремонта двигателей с сохранением их номинальных данных, правильный выбор электродвигателей по мощности и по типу и др.

Ко *второму способу* (с применением КУ) относится использование в качестве КУ батарей конденсаторов и СД. Зависимость мощности конденсаторных батарей от квадрата напряжения снижает устойчивость нагрузки и может привести к лавине напряжения. Наличие высших гармоник тока и напряжения в сети может привести к пробоям конденсаторных батарей.

Синхронные двигатели широко применяются для привода насосов, вентиляторов, компрессоров и т.д. Такие СД выпускаются с номинальным опережающим $\cos \varphi$, равным 0,9, и могут работать в режиме перевозбуждения, т.е. генерации реактивной мощности. Характер и значение реактивной мощности СД определяются током возбуждения в обмотке его ротора. В режиме перевозбуждения СД представляет собой активную и емкостную нагрузку, т.е. СД работает не только как двигатель, но и как источник реактивной мощности.

При эксплуатации систем электроснабжения большое значение имеет также выравнивание нагрузок во времени с использованием для этого целенаправленного управления электрооборудованием (выравнивание графиков нагрузки, снижение и смещение пиковых мощностей и т.п.).

К проблеме энерго- и ресурсосбережения относится также повышение надежности электроснабжения, так как внезапное прекращение питания может привести к большим убыткам в производстве. Однако повышение надежности обычно связано с увеличением стоимости системы электроснабжения. Поэтому, как правило, определяют оптимальные показатели надежности, выбирают оптимальную по надежности структуру системы электроснабжения.

Другой проблемой, ставшей особенно актуальной в связи с широким применением вентиляльных преобразователей, подключенных к системам электроснабжения, является обеспечение требуемого качества электроэнергии. Низкое качество электроэнергии приводит

прежде всего к увеличению потерь электроэнергии как в электроприемниках, так и в сети.

Так, при снижении напряжения от $U_{ном}$ потери возрастают до 5 % и более; дополнительные потери электроэнергии имеют место также и при несимметричной нагрузке и при несинусоидальном напряжении. Снижение качества электроэнергии сокращает срок службы электрооборудования главным образом за счет перегрева оборудования и преждевременного старения изоляции.

Так, например, при несимметрии напряжения, равной 4 % срок службы полностью загруженного АД сокращается в 2 раза; при несимметрии, равной 10 %, располагаемая мощность АД уменьшается на 20 — 50 % в зависимости от исполнения двигателей. Значительную экономию электроэнергии можно получить от внедрения автоматизированных систем управления на базе компьютерной техники.

Переход на новую элементную базу вспомогательных цепей систем электроснабжения, а именно внедрение микропроцессорных систем защиты, автоматики и телемеханики открывает возможность значительного уменьшения мощности и материалоемкости трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), а также перехода на принципиально новые, более совершенные измерительные преобразователи.

Широкое внедрение управляющих микропроцессорных систем обеспечивает значительный экономический эффект за счет повышения гибкости и надежности систем электроснабжения.

Актуальной и весьма важной задачей является обеспечение электро-, пожаро- и взрывобезопасности установок электроснабжения, совершенствование и разработка новых устройств защиты и сигнализации.

Системы электроснабжения промышленных предприятий имеют следующие особенности:

- а) непрерывность и неразрывное единство производства, передачи и потребления электроэнергии; практическая невозможность ее складирования;
- б) многоцелевое использование электроэнергии при наличии категорий потребителей с различными требованиями к надежности и качеству электроэнергии;
- в) малая вероятность полного отказа систем, а также их непланового ремонта вследствие большого количества потребителей и значительного развития характеристик взаимозаменяемых элементов;
- г) непрерывное развитие систем электроснабжения во времени и пространстве.

В последнее время количественные оценки систем электроснабжения используются не только на этапе проектирования и реконструкции, но и при эксплуатации для управления уровнем надежности. При этом необходимо иметь информацию о фактическом состоянии элементов, о ремонтных группах, о режимах работы оборудования.

Надежность системы основывается на случайных явлениях, а чтобы они могли выступать как необходимые, система должна быть избыточной. Под избыточностью понимают дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Таким образом, с одной стороны избыточность системы является необходимым условием надежности и должна быть свойственна техническим системам. С другой стороны, избыточные системы, приобретаая высокую надежность, могут приобрести ряд свойств, снижающих их эффективность. В частности, для избыточных систем характерны большие экономические затраты на сооружение и эксплуатацию.

На практике избыточность систем электроснабжения выступает в форме резервирования, совершенствования конструкций и материалов, из которых изготовлены элементы, повышения их долговечности, прочности, совершенствования технического обслуживания, контроля и управления.

Возможные нарушения нормального режима электроснабжения промышленных предприятий

2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Под *надежностью* понимают свойство системы электроснабжения выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования.

Надежность системы электроснабжения определяется многими факторами (о них будет идти речь в последующих главах данной книги), среди которых следует выделить такой фактор как повреждаемость системы электроснабжения и ее элементов. Надежность системы электроснабжения предполагает бесперебойное питание электроэнергией потребителей, что обеспечивает их бесперебойную работу.

Под *бесперебойной работой* понимают такой режим, при котором возможные кратковременные перерывы питания по своей продолжительности не приводят к расстройству технологического процесса и существенному ущербу производства.

Чтобы обеспечить надежную работу ответственных электроприемников при нормальном и послеаварийном режимах необходимо: свести к минимуму число и продолжительность перерывов их электроснабжения;

обеспечить надлежащее качество электроэнергии для создания устойчивой работы ответственных технологических аппаратов при нарушениях режима электроснабжения.

Надежность системы электроснабжения, в первую очередь, определяется схемным и конструктивным построением системы, разумным объемом заложенных в нее резервов, а также надежностью

входящих в нее основных составных элементов, в частности электрооборудования.

Для предприятий с непрерывным технологическим процессом одним из важных условий повышения надежности работы является сохранение устойчивости электродвигательной нагрузки при кратковременных перерывах питания. С этой целью производится анализ динамической устойчивости СД с учетом общесистемной автоматики и координации электрических и технологических защит, а также проверка возможности ресинхронизации наиболее ответственных СД и осуществления самозапуска АД во избежание нарушения технологического процесса.

Перерыв питания электроэнергией предприятия вызывает так называемый ущерб. Перерыв питания может быть вызван авариями или повреждениями в энергосистеме или системе электроснабжения предприятия. Он может сопровождаться полным прекращением или частичным ограничением питания различной продолжительности в послеаварийный период. Система электроснабжения выполняется таким образом, чтобы в этот период было обеспечено электроснабжение основных производств.

Второй вид перерыва (частичный или полный) может быть вызван дефицитом мощности в питающей системе в определенное время суток и бывает различной продолжительности. В большинстве случаев этот вид перерыва может быть заранее предусмотрен ("запланирован") и учтен в программе производства. Никаких мероприятий в системе электроснабжения предприятия при этом не требуется, кроме составления графика отключения менее ответственных потребителей на время ограничения мощности. Ущерб от перерыва питания является основным и наиболее объективным критерием при определении требуемой надежности.

Время перерыва питания t_0 складывается из времени перерыва по вине источника питания t_1 и времени, необходимого для восстановления электроснабжения электроприемника t_2 после возобновления питания. Существует минимально допустимая продолжительность перерыва питания $t_{0\text{доп}}$, которая не отражается на работе данного потребителя вследствие инерционности электроприводных и технологических механизмов и технологических процессов. Перерыв питания, равный $t_{0\text{доп}}$ или менее его, не вызывает нарушения производственного процесса и прекращения выпуска продукции и не приводит к ущербу. Значение $t_{0\text{доп}}$ зависит от характера процесса и специфики производства и колеблется в больших пределах. Правильное определение $t_{0\text{доп}}$ важно для расчета надежности питания,

затрат на резервирование в электрической и технологической частях и для оценки ущерба от перерыва электроснабжения.

Основным фактором, влияющим на степень резервирования, является удельный вес электроприемников различных категорий. Если преобладают нагрузки I и II категорий, то автоматическое резервирование предусматривают, начиная с высших ступеней электроснабжения. Если же удельный вес электроприемников I категории невелик, то целесообразны более дешевые решения при помощи резервных переключателей небольшой мощности. Иногда такое резервирование целесообразно делать не на подстанции, чтобы не усложнять ее, а на цеховых силовых пунктах, к которым подключены электроприемники I категории. Питание этих пунктов производится от разных подстанций или разных секций подстанций, и для переключения применяется простейшая автоматика.

При определении объема резервирования в системе электроснабжения обязательно учитывают степень резервирования в технологической части. При этом исходят из принципа одинакового уровня надежности в электрической и технологической частях.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения показал, что наиболее надежными и экономичными источниками питания (ИП) электроэнергией промышленных предприятий являются электрические станции и сети районных энергосистем. Приведенное в ПУЭ определение независимого источника дает возможность экономического решения системы электроснабжения для предприятий различной мощности и ответственности. Так, например, для крупных энергоемких предприятий наилучшими, т.е. наиболее надежными, являются территориально разобщенные ИП.

Главнейшими принципами, лежащими в основе построения надежных схем электроснабжения промышленных предприятий, являются следующие:

1) *максимальное приближение источников высокого напряжения к электроустановкам потребителей*, благодаря чему уменьшается число сетевых звеньев и ступеней промежуточной трансформации и коммутации;

2) *отказ от "холодного" резерва*, т.е. от специальных резервных, нормально не работающих линий и трансформаторов, установленных на подстанции; это связано с тем, что при включении под нагрузку таких линий и трансформаторов они могут отказать в работе вследствие долгого бездействия;

3) *глубокое секционирование всех звеньев системы электроснабжения* (от шин ГПП до шин вторичного напряжения цеховых подстанций, а иногда и до шин цеховых распределительных силовых пунк-

тов; на секционных аппаратах предусматриваются простейшие схемы АВР);

4) *раздельный режим работы линий, трансформаторов, токопроводов*, что не только существенно снижает ток КЗ, но и упрощает коммутацию и релейную защиту.

Кроме указанных выше принципов, повышающих надежность системы электроснабжения, предусматривают следующие: из общего перечня нагрузок выделяются ответственные нагрузки, питание которых обеспечивают при проведении энергосистемой аварийных разгрузок. В период послеаварийного режима элементы сети могут быть перегружены в пределах, допускаемых ПУЭ.

Следует принимать во внимание, что проведение профилактических и капитальных ремонтов оборудования систем электроснабжения (если ремонт выполняется не под напряжением) предусматривает отключение элементов, изменение схем коммутаций, что приводит к изменению уровня надежности электроснабжения в этот период времени.

2.2. НАРУШЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Для ритмичной работы промышленного предприятия по выполнению плана выпуска продукции с требуемыми экономическими показателями система электроснабжения должна обеспечивать потребителей необходимым количеством электроэнергии заданного качества. При этом преобразование и распределение электрической энергии между цехами, установками и отдельными электроприемниками должны производиться по схеме, отвечающей минимуму затрат.

Нормальным считается такой режим электроснабжения, при котором потребители обеспечиваются электроэнергией заданного качества и количества в соответствии с графиком потребления, и по схеме, предусмотренной для нормальных условий длительной работы.

При эксплуатации, реконструкции и проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий необходимо учитывать следующие возможные нарушения нормального режима электроснабжения:

кратковременные и длительные отклонения напряжения от номинального;

внезапные кратковременные (продолжительностью до нескольких секунд) перерывы электроснабжения или глубокие посадки напряжения, вызванные переходными процессами в энергосистеме;

внеплановые перерывы электроснабжения с предварительным предупреждением;

внезапные длительные (до нескольких часов) перерывы электроснабжения;

ограничения электроснабжения по мощности или электроэнергии;

ограничения по мощности или электроэнергии с предварительным предупреждением, приводящие к необходимости консервации предприятия.

Во время работы системы электроснабжения возникают кратковременные переходные процессы, вызванные изменениями потоков мощности, аварийными режимами, действиями средств противоаварийной автоматики. Эти процессы, несмотря на кратковременность, могут отразиться на режиме работы потребителей электроэнергии, особенно промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом.

Пример. 2.1. Двухфазное КЗ в сети напряжением 110 кВ, ликвидированное через 0,25 с, не отразилось непосредственно на работе технологических агрегатов и электродвигателей напряжением 6 кВ, но привело к отпаданию магнитных пускателей электродвигателей 0,4 кВ маслососов (мощностью 3 и 7 кВт), обслуживающих технологические агрегаты. Следствием остановки маслососов явилось отключение СД мощностью 2000 и 3900 кВт, приведшее к расстройству технологического процесса химического завода.

Основными причинами перерывов электроснабжения являются аварии в энергосистеме или в собственной системе электроснабжения потребителя. Причинами перерывов электроснабжения могут быть также дефицит мощности или электроэнергии в энергосистеме или ограничения пропускной способности элементов системы электроснабжения.

В зависимости от причин, вызвавших прекращение электроснабжения, или потребитель может быть заранее оповещен о предстоящем перерыве, или перерыв возникает для него внезапно. Исчезновение напряжения на питающей подстанции может вызвать необходимость отключения (автоматического или ручного) последующих элементов системы электроснабжения технологических агрегатов. Поэтому продолжительность перерыва электроснабжения потребителя t_0 , как указывалось выше, складывается из времени, необходимого для восстановления напряжения на питающей подстанции t_1 , и времени, необходимого на восстановление системы электроснабжения от питаю-

щей подстанции до пункта питания электроприемников рассматриваемой технологической установки t_2 , т.е.

$$t_0 = t_1 + t_2.$$

Продолжительность t_2 определяется сложностью системы электроснабжения, типом и характеристиками электроприемников технологических установок, автоматизацией управления и т.п. Одним из средств снижения t_2 является устранение промежуточных трансформаций, применение глубоких вводов, самозапуск агрегатов технологических установок и др. Каждому типу электроприемников и технологических установок свойственно свое допустимое время перерыва $t_{\text{доп}}$.

Пример. 2.2. На предприятии установлены поршневые компрессоры высокого давления с СД, вентиляторы с АД, а также электропечи. Наименьшее значение $t_{\text{доп}}$ будет у агрегатов с поршневыми компрессорами, немного большее — у вентиляторов и наибольшее — у электропечей. Следовательно, для рассматриваемого предприятия будут иметь место три ступени $t_{\text{доп}}$.

При предварительном предупреждении о перерыве электроснабжения потребитель может провести необходимые мероприятия для прекращения технологического процесса с минимальными потерями, избежать порчи материалов, повреждения оборудования и др.

Пример. 2.3. При электролизе алюминия перед длительным отключением электроэнергии во избежание застывания электролита и алюминия из ванны выливают весь электролит и часть металла, а аноды опускают до соприкосновения с оставшимся металлом. Это обеспечивает минимальные потери в технологическом процессе.

Дальнейшие потери потребителя определяются характеристиками технологического процесса и длительностью перерыва электроснабжения. После восстановления электроснабжения технологический процесс возобновляется.

Потери потребителей при перерывах электроснабжения с предварительным предупреждением определяются потерями, вызванными необходимостью останова и последующего пуска технологических установок, простоем персонала, а также невыработкой продукции за время простоя.

Хотя при остановах с предварительным предупреждением удается, как правило, избежать повреждения оборудования, возникающего при внезапном перерыве электроснабжения, для некоторых производств с непрерывным технологическим процессом останова снижают срок службы технологического оборудования. Как показывает опыт эксплуатации, целесообразно останова с предварительным предупреждением совмещать с проведением плановых ремонтов технологического и энергетического оборудования.

Внезапные перерывы электроснабжения могут привести к повреждению оборудования, браку продукции, порче сырья, а в ряде случаев и к крупным авариям. Потери потребителя во многом зависят от совпадения перерыва электроснабжения с тем или иным этапом технологического процесса. Иногда повреждение или сокращение срока службы оборудования возникает только при определенной длительности перерыва электроснабжения.

Основными причинами возникновения ограничения по мощности и электроэнергии являются крупные аварии в энергосистеме, приводящие к нарушению баланса активной мощности.

Кроме этих причин, могут иметь место также ошибки в прогнозировании спроса мощности (особенно в часы максимума энергосистемы) и электроэнергии, а также стихийные явления.

При заблаговременном предупреждении энергосистемой потребители могут принять меры, позволяющие сохранить в работе все электроприемники или их часть, но при сниженном электропотреблении. На предприятиях разработаны графики перевода электроприемников в режим ограниченного потребления, а также определены электроприемники и очередность их отключений.

Продолжительность восстановления технологического процесса после длительного перерыва электроснабжения зависит от следующих факторов:

- особенностей технологического процесса;
- времени перерыва электроснабжения;
- совпадения перерыва электроснабжения с тем или иным этапом технологического процесса;
- автоматизации производства;
- квалификации обслуживающего персонала и т.п.

К нарушению нормального режима относят также питание потребителей по резервным элементам системы электроснабжения, если при этом возникают дополнительные потери электроэнергии в сети.

Нарушение нормального режима электроснабжения может вызвать у потребителя разладку технологического процесса, брак продукции, выход из строя и сокращение срока службы оборудования, увеличение удельных затрат электроэнергии, сырья, материалов на выработку продукции, простой обслуживающего персонала.

В некоторых случаях внезапный перерыв электроснабжения может вызвать крупные аварии на промышленных предприятиях. Ущерб, вызванный указанными последствиями, называется *прямым ущербом*.

Нарушение нормального электроснабжения может привести к снижению или прекращению выработки продукции предприятием.

Ущерб, связанный с недопроизводством продукции, называют *дополнительным ущербом*.

Ущерб энергосистемы, вызванный нарушением нормального режима, определяется в основном следующими факторами:

дополнительными потерями электроэнергии в передающих и распределительных сетях, возникающими из-за перераспределения потоков электроэнергии или перегрузки части сети;

возросшим расходом топлива на электростанциях энергосистемы, если нарушение нормального режима привело к перераспределению выработки электроэнергии на электростанциях;

недоиспользованием основных и оборотных средств, если нарушение электроснабжения привело к недопроизводству электроэнергии в энергосистеме.

Надежность системы электроснабжения снижается вследствие возникновения нарушений нормального режима электроснабжения, к которым относятся так называемые отказы.

В аварийном и послеаварийном состояниях система электроснабжения находится на более низком уровне функционирования по сравнению с нормальным. При этом параметры ее режимов, к основным из которых относятся частота переменного тока, напряжение в узлах, потоки мощности в элементах, могут выходить за пределы, допустимые по нормам, что обуславливает отказ, отключение этих элементов или части системы, т.е. переход на еще более низкий уровень функционирования, в результате которого возможен полный отказ системы.

Чтобы избежать этого, вводят ограничения по режимам (в аварийных и послеаварийных состояниях), т.е. мероприятия, предотвращающие развитие аварии (каскадные отключения). К ним относятся: перераспределение нагрузки источников питания, форсирование регулирующих и компенсирующих устройств, включение ненагруженных или мало нагруженных резервных элементов, коммутационные изменения в схеме и др. Если эти мероприятия не обеспечивают ввод режима в допустимые нормами пределы, то часть потребителей отключается.

2.3. ОТКАЗЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Эксплуатационные показатели для энергетического оборудования задаются паспортными данными, инструкциями по эксплуатации, а их текущие значения назначаются службой режимов, диспетчерами и дежурным эксплуатационным персоналом.

Надежная работа энергетического оборудования в зависимости от его назначения может требоваться в различные периоды времени: между плановыми ремонтами; в определенный сезон года; при прохождении максимума или минимума нагрузки и т.д.

Состояние электрооборудования, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации, называют *работоспособностью*. Нарушение работоспособности является отказом.

Отказом называется событие, заключающееся в переходе оборудования с одного уровня работоспособности или функционирования на другой, более низкий, или в полностью неработоспособное состояние. Отказы классифицируются по разным признакам:

1) по степени нарушения работоспособности: *полные* или *частичные*. Для части системы электроснабжения отказ одного элемента или группы элементов в одном случае может привести к ограничению потребляемой мощности и энергии, в другом — к полному прекращению электроснабжения потребителей; в первом случае отказ следует считать частичным, во втором — полным; если рассматривать для системы в целом, то оба отказа следует считать частичными;

2) по связи с отказами других элементов (оборудования): *независимые* и *зависимые*;

3) по характеру процессов проявления: *внезапные* и *постепенные*. Внезапные отказы проявляются в результате резкого, скачкообразного изменения основных параметров системы, связанных с нарушением условий работы, ошибочными действиями персонала и т.д.; при постепенных отказах наблюдается плавное изменение параметров оборудования в результате старения, износа. Постепенные отказы часто проявляются в форме внезапных;

4) по времени существования: *устойчивые* и *неустойчивые*. Устойчивый — это такой отказ, когда для восстановления работоспособности требуется ремонт оборудования; неустойчивый — когда для восстановления работоспособности требуется только отключение оборудования или изменение его режима работы без ремонта;

5) по времени проведения: *плановые* и *неплановые*. Плановый отказ — это текущий или капитальный ремонт, сроки проведения которого заранее оговорены. Влияние плановых ремонтов на надежность системы электроснабжения может оказаться весьма существенным, так как возможно наложение на плановый ремонт одного элемента отказа другого, в частности, его резервирующего.

Самовосстанавливающийся отказ называют *сбоем*.

При полном отказе (полной утере работоспособности) оборудование или установку надо выводить из работы в ремонт. При частичном отказе оборудование или установка может какое-то ограниченное время выполнять часть заданных функций.

Отказом в работе называют отказ, выявившийся в момент выполнения заданной функции, а *дефектом* — отказ, обнаруженный при наладке, профилактическом осмотре или плановом ремонте.

Как показывает опыт эксплуатации, основными характеристиками, определяющими работоспособность электрооборудования, являются следующие:

- 1) механическая прочность;
- 2) износостойчивость контактов при включении тока;
- 3) износостойчивость контактов при отключении тока;
- 4) стойкость контактов против сваривания;
- 5) коммутационная способность, а также термическая и динамическая стойкость;
- 6) надежность контактирования (стабильность переходного контактного сопротивления);
- 7) сохраняемость свойств изоляции;
- 8) стабильность характеристик срабатывания.

Указанные выше характеристики работоспособности оборудования в основном определяют их надежность. Высокие характеристики работоспособности означают и высокую надежность.

Все отказы в работе оборудования объясняются неудовлетворительным уровнем или состоянием перечисленных характеристик, которые являются физическими составляющими главного свойства надежности — безотказности в работе. Эти характеристики работоспособности имеют различную важность для разного оборудования. Так, работоспособность автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей на 100 % зависит от этих характеристик; работоспособность плавких предохранителей — на 45 %, тепловых реле — на 30 %, рубильников — на 20 % и т.д.

При анализе надежности электрооборудования рассматривают четыре группы основных факторов:

- эксплуатационные;
- связанные со свойствами применяемых материалов;
- конструктивного характера;
- производственные.

Из этого перечня особое значение имеют *производственные факторы*. Влияние этих факторов учитывают отдельно, потому что, во-первых, они не могут быть конкретно учтены при проектировании, и, во-вторых, после отработки конструкции и внедрения ее в

производство уровень надежности оборудования полностью определяется стабильностью производства. Кроме того, одно и то же оборудование, изготовленное на разных предприятиях, нередко очень резко отличается друг от друга по качеству.

К *конструктивным факторам* относят прежде всего:

- скорость замыкания и размыкания контактов;
- раствор, провал и нажатие контактов;
- вибрацию контактов при включении;
- трение в элементах подвижных частей;
- особенности привода;
- особенности дугогасящего устройства и др.

Факторы, определяемые свойствами применяемых материалов, — это, в основном, особенности контактных и изоляционных материалов, а также материалов для пружин, термобиметаллических элементов и т.п.

При эксплуатации электрооборудование подвергается разнообразным воздействиям, зависящим от нагрузки, режима и условий работы. По влиянию на характеристики работоспособности оборудования *эксплуатационные факторы* делят на две группы:

- 1) ток и напряжение, род тока, характер нагрузки, частота срабатывания, продолжительность включения и др.;
- 2) окружающая температура, влажность воздуха, давление и запыленность воздуха, агрессивные газы, особенности монтажа, внешние вибрации, действия обслуживающего персонала и др.

Суммарное воздействие той или иной комбинации перечисленных выше факторов вызывает отказы оборудования.

Возникновению отказов способствуют также следующие часто встречающиеся недостатки при эксплуатации оборудования:

- пренебрежение указаниями заводских инструкций по монтажу, регулировке и обслуживанию;
- недопустимые замены материалов изношенных деталей, в особенности контактных;
- нарушение правил хранения и транспортировки;
- неправильное использование в непредусмотренных режимах или условиях;
- неправильная, небрежная или несвоевременная профилактика и др.

Большая часть повреждений в системах электроснабжения связана с нарушением электрической изоляции элементов (генераторов, трансформаторов, кабельных и воздушных линий, компенсирующих устройств и др.). Поэтому от момента возникновения повреждения до его локализации зона неблагоприятного влияния, как пра-

вило, велика. Причем для отдельных видов потребителей (например, предприятий химической промышленности) сам факт возникновения повреждения, при котором понижается напряжение, является отказом.

Элементы систем электроснабжения относятся к восстанавливаемым при отказах. Надежность системы или элемента обеспечивается свойствами безотказности, долговечности, устойчивости, управляемости, живучести, безопасности и ремонтпригодности, о которых подробно будет изложено в последующих главах книги.

В процессе эксплуатации элементов системы электроснабжения в материалах, из которых они изготовлены, вследствие термических и механических воздействий, а также воздействий электромагнитных полей, агрессивной среды, снижения показателей качества электроэнергии накапливаются необратимые изменения, снижающие прочность, нарушающие координацию и взаимодействие частей. Эти изменения в случайные моменты времени могут приводить к отказу элемента.

При рассмотрении показателей надежности любого элемента различают три периода его эксплуатации: I — период приработки; II — период нормальной эксплуатации; III — период интенсивного износа и старения.

Период I характеризуется снижением интенсивности отказов с течением времени, что объясняется выявлением скрытых дефектов монтажа и изготовления, отбраковкой элементов.

Период II характеризуется примерно постоянной интенсивностью отказов. При этом они имеют внезапный характер (механические повреждения, повреждения вследствие неблагоприятных внешних условий и т.д.).

Период III характеризуется повышением интенсивности отказов с течением времени и связан с интенсивным износом и старением, необратимыми физико-химическими процессами в материалах, из которых изготовлены элементы и их части (постепенные отказы).

Подразделение отказов на внезапные и постепенные условно и служит для удобства анализа и количественной оценки протекающих явлений.

Основной причиной внезапных отказов является превышение механической прочности элемента.

Пример. 2.4. Кабельная линия напряжением 6 – 10 кВ обладает определенной механической прочностью, и все ее конструктивные элементы выполнены так, чтобы обеспечить сохранность линии при воздействии механических нагрузок, не превышающих предел проч-

ности бронированного покрытия, оболочки, изоляции жил кабеля. Механические нагрузки, воздействующие на кабельную линию при эксплуатации, являются случайными, и связи между значениями таких нагрузок во времени обычно не наблюдаются. Пиковые экстремальные нагрузки, приводящие к повреждению кабельной линии, возникают случайно, и невозможно однозначно предсказать момент их появления. Среднее значение воздействующих механических нагрузок на кабельную линию практически при любых условиях прокладки намного меньше предельно допустимого (по механической прочности). Первое превышение механической прочности кабельной линии приводит к ее отказу. Учитывая конструкции кабельных линий и характерные условия их эксплуатации, следует отметить два обстоятельства:

уровень предельно допустимой механической нагрузки остается постоянным в период эксплуатации;

отказ возникает в результате не постепенного изменения внутреннего состояния элемента (так как предел механической прочности с течением времени изменяется мало), а лишь как следствие внешних случайных воздействий, являющихся независимыми и возникающих в случайные моменты времени, которые однозначно предсказать невозможно.

Основной причиной постепенных отказов является старение материалов и износ отдельных частей элементов. Со временем материалы, из которых изготовлен элемент, претерпевают необратимые изменения. Причинами их возникновения являются следующие факторы:

тепловое, вибрационное старение изоляции трансформаторов, кабельных линий, генераторов;

коррозия металлических частей проводов, опор, оболочек кабельных линий;

износ дугогасительных камер коммутационных аппаратов при отключении токов КЗ;

деформация материалов;

диффузия одного материала в другой;

механическая нагрузка.

По мере эксплуатации элементов (оборудования) вследствие влияния процессов нагревания, обусловленных протеканием токов нагрузки; изменения условий внешней среды; электродинамических сил, возникающих при резком изменении тока; вибрации; повышения влажности и вредных примесей в среде, окружающей изоляцию; воздействий электрического поля в изоляции происходят сложные физико-химические процессы старения. Изоляция становится хрупкой, ломкой, появляются трещины, в результате чего уме-

няется ее электрическая прочность и при случайном превышении напряжения сверх допустимого уровня происходит отказ.

Аналогичные ситуации происходят при коррозии и окислении металлических частей оборудования, а также под воздействием механических нагрузок. Эти факторы приводят к постепенному снижению прочности и при случайном превышении предела прочности — к отказу оборудования. Таким образом, постепенный износ отдельных частей оборудования представляет собой как бы накопление элементарных повреждений в различных его частях и снижение общего предела прочности. После достижения некоторого уровня, т.е. накопления определенного числа элементарных повреждений, происходит отказ оборудования системы электроснабжения. Если в случае внезапных отказов первое превышение предела прочности приводит к отказу оборудования, то в случае постепенных отказов необходимо интегрирование элементарных повреждений в различных его частях, обусловленных влиянием многих факторов, носящих случайный характер и приводящих к постепенному изменению состояний оборудования. Таким образом, необходимо, например, многократное превышение температуры изоляции сверх допустимой, многократное отключение токов КЗ выключателями, многократное воздействие неблагоприятных условий внешней среды и т.д.

Надежность наиболее распространенных элементов электрических сетей, таких, как силовые трансформаторы, кабельные линии, в значительной степени определяются надежностью работы изоляции, "прочность" которой изменяется при эксплуатации. Основной характеристикой изоляции электротехнических изделий является, как указывалось выше, ее электрическая прочность, которая в зависимости от условий эксплуатации и вида изделия определяется механической прочностью, эластичностью, исключающей возможности образования остаточных деформаций, трещин, расслоений под воздействием механических нагрузок, т.е. неоднородностей.

Разрушение изоляции при функционировании элемента происходит, в основном, в результате нагревания токами нагрузки и температурных воздействий внешней среды; механические нагрузки (вибрация, деформация, удары и др.) также вызывают разрушение изоляции.

Если изоляция находится под воздействием высокого напряжения, то на процессы старения изоляции заметно влияет электрическое поле. Вначале, когда изоляция новая и достаточно однородная, электрическое старение происходит медленно. При эксплуатации, вследствие тепловых и механических воздействий, сопровождаю-

шихся расслоением, возникновением воздушных прослоек, пустот, трещин, газовых включений, масла, электрическое старение становится заметным.

Среди перечисленных факторов, определяющих срок службы изоляции указанных элементов систем электроснабжения, одним из основных является тепловое старение. На основании экспериментальных данных было получено известное "восьмиградусное правило", согласно которому повышение температуры изоляции, выполненной на органической основе, на каждые 8°C в среднем вдвое сокращает срок службы изоляции.

Другим важным фактором, вызывающим интенсивное старение изоляции, является механическая нагрузка, обусловленная электродинамическими процессами при резких изменениях тока, например при резкопеременной нагрузке силового трансформатора, частых набросах и сбросах нагрузки, сквозных токах КЗ. Механические характеристики прочности изоляции также зависят от температуры. Так, при ее увеличении предел механической прочности изоляции быстро снижается.

Указанные выше два фактора, влияющие на срок службы изоляции, тесно связаны между собой и зависят в значительной степени от качества изготовления электротехнического изделия, от однородности материала изоляции.

Опыт эксплуатации основного оборудования систем электроснабжения промышленных предприятий показывает, а статистика подтверждает, что наименьшее число отказов имеют воздушные и кабельные линии, затем масляные выключатели и другое оборудование. Более подробные сведения приведены в следующих главах книги.

Статистические исследования показали, что масляные выключатели в значительном числе случаев (от 17 до 35 %) отказывают при отключении токов КЗ и в большинстве случаев их отказ сопровождается КЗ в ячейке (от 66 до 100 %), а, следовательно, на шинах распределительного устройства (РУ).

Отказы большей части элементов систем электроснабжения: воздушных и кабельных линий, генераторов, трансформаторов, сборных шин, выключателей и разъединителей (в статическом состоянии) — сопровождаются обычно КЗ (одно-, двух- и трехфазными). Отказы такого вида не локализируются в отказавших элементах, а приводят к необходимости работы релейной защиты и автоматики, возмущающей на коммутационные аппараты (выключатели, автоматические воздушные выключатели и предохранители), которые ло-

кализуют отказ элемента и ограничивают зону и продолжительность его воздействия на другие элементы.

Коммутационные аппараты также могут отказывать при необходимости отключения (включения), т.е. при заявке на срабатывание. Кроме того, не каждый элемент в системе электроснабжения оборудован с двух сторон автоматическим коммутационным аппаратом, способным локализовать его отказ. Поэтому зона его действия на системы в зависимости от схемы коммутации может быть весьма обширной, даже при отказе одного независимого элемента.

Отказы электрооборудования в системах электроснабжения несут ущерб не только потребителям, которые могут быть отключены от источников электроснабжения, но и самим системам электроснабжения, прежде всего потому, что приводят к внеплановым и аварийным ремонтам и ревизиям электрооборудования, связанным с расходами на производство и содержание ремонтного персонала. Изменения режима работы систем электроснабжения после отключения отказавшего оборудования вызывают перерасход топлива, увеличение потерь в сетях в послеварийном режиме. Кроме того, отказы оборудования при неблагоприятном стечении обстоятельств могут развиваться в тяжелые системные аварии.

Надежность подстанции как элемента системы электроснабжения зависит от быстроты и безотказности действия устройств релейной защиты, автоматического повторного включения линий и трансформаторов.

Устройства релейной защиты в период эксплуатации могут быть в следующих состояниях:

полной работоспособности с включением во вторичные цепи измерительных трансформаторов и в оперативные цепи аппаратуры;

полной работоспособности, но выведены из работы по вторичным и оперативным цепям;

нечувствительности к повреждениям в зоне действия;

поддачи ложного сигнала в оперативные цепи при отсутствии каких-либо возмущений в первичной цепи.

Последние три состояния вызывают соответственно *три вида отказов* устройств релейной защиты и автоматики:

а) *отказы в срабатывании* при появлении повреждения или ненормального режима;

б) *неселективные* (неизбирательные) *срабатывания* при повреждениях на соседнем участке;

в) *ложные срабатывания* при отсутствии повреждений и ненормальных режимов.

Правильная организация системы ремонтов и профилактики электрооборудования, в том числе и устройств релейной защиты и автоматики, значительно повышает надежность подстанций, а, следовательно, и надежность системы электроснабжения в целом.

2.4. ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Повреждения оборудования в системах электроснабжения промышленных предприятий являются отказами, классификация которых соответствует указанной в § 2.3. Ниже приведены основные причины повреждений воздушных и кабельных линий, силовых трансформаторов и коммутационных аппаратов.

Наиболее часто повреждаются линии электропередач (воздушные и кабельные). Это связано с их территориальной рассредоточенностью и подверженностью влиянию внешних неблагоприятных условий среды.

Основными причинами повреждений воздушных линий являются:

- гололедно-ветровая нагрузка;
- перекрытия изоляции вследствие грозных разрядов;
- повреждение опор и проводов автотранспортом и другими механизмами;
- дефекты изготовления опор, проводов, изоляторов;
- перекрытия изоляции из-за птиц;
- несоответствие опор, проводов, изоляторов природно-климатическим зонам;
- неправильный монтаж опор и проводов;
- несоблюдение сроков ремонта и замены оборудования.

Указанные причины приводят, в основном, к ослаблению или нарушению механической прочности опор, проводов, изоляторов; поломке деталей опор; коррозии и гниению металлических и деревянных частей.

Вибрация, "глыска" и обрыв проводов, разрушение опор или их частей сопровождаются, как правило, КЗ (одно-, двух- и трехфазными) воздушных линий.

Основной причиной повреждения кабельных линий является нарушение их механической прочности землеройными машинами и механизмами (до 70 % всех повреждений, что зависит от интенсивности проведения земляных работ в местах прокладки кабелей и способов их прокладки: непосредственно в земле, трубах, блоках, туннелях). Наибольшая повреждаемость возникает при прокладке кабелей непосредственно в земле.

Значительную долю поврежденных кабельных линий составляют электрические пробой в кабельных муфтах (соединительных) и на концевых воронках, участках кабелей, проложенных с большим уклоном.

Существенно реже возникают повреждения кабельных линий вследствие старения и износа изоляции (междуфазной и поясной), попадания влаги в кабельную линию, коррозии металлических частей (коррозия усиливается при появлении блуждающих токов), возникновения неравномерностей в вязкой пропитке по длине кабеля из-за разности уровней по горизонту. Повреждения кабельных линий, так же как и воздушных, сопровождаются КЗ. Продолжительность восстановления кабельных линий намного больше, чем воздушных, и составляет десятки часов.

Силовые трансформаторы по сравнению с воздушными и кабельными линиями повреждаются реже, но их восстановление требует более продолжительного времени (от единиц до сотен часов).

Основными причинами повреждения трансформаторов являются:

- нарушение изоляции обмоток вследствие воздействия внешних и внутренних перенапряжений, сквозных токов КЗ, дефектов изготовления; причины повреждения изоляции обмоток трансформаторов — это ее износ и старение вследствие перегрузок, недостаточного охлаждения;
- повреждение устройств, регулирующих напряжение (особенно автоматических под нагрузкой);
- повреждение вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции;
- повреждение контактных соединений;
- упуск масла (для масляных трансформаторов).

Коммутационные аппараты, применяемые в системах электроснабжения промышленных предприятий, являются более сложными с точки зрения надежности объектами, чем рассмотренные выше воздушные и кабельные линии и силовые трансформаторы.

Известно, что коммутационные аппараты подразделяются на автоматические (выключатели, отделители с короткозамыкателями, автоматические воздушные выключатели, предохранители) и неавтоматические (разъединители и рубильники).

Повреждения коммутационных аппаратов происходят при выполнении ими операций (отключение токов КЗ, токов нагрузок, оперативных переключений и др.) и в стационарном состоянии.

Основными причинами повреждения коммутационных аппаратов являются:

- несрабатывание приводов;

механические и электрические повреждения;
износ дугогасительных камер;
обгорание контактов;
перекрытие изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях.

Продолжительность восстановления коммутационных аппаратов возрастает с увеличением номинального напряжения электрооборудования и, как правило, соизмерима с продолжительностью восстановления воздушных линий (единицы, десятки часов).

Для указанного выше оборудования причинами повреждений могут быть ошибочные действия оперативного персонала, а также неправильное действие релейной защиты и автоматики (ложное срабатывание, неселективное срабатывание, несрабатывание), приводящие к КЗ.

Элементы систем электроснабжения, которые подвергаются аварийному ремонту после возникновения повреждений, нередко подвергаются также и профилактическому предупредительному ремонту, осуществляемому в тех случаях, когда отдельные части элементов изношены. Такой ремонт увеличивает интервал времени между отказами, что позволяет сделать предположение, что элемент, в данном случае коммутационный аппарат, после аварийного ремонта восстанавливается до состояния "нового".

2.5. МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ВРЕМЯ ПЕРЕРЫВОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При оценке надежности следует учитывать, что не всякий перерыв электроснабжения может причинить ущерб производству. Возможны перерывы длительностью меньше минимально допустимых $t_{\text{доп}}$, которые не отражаются на производстве. Данные о продолжительности перерывов электроснабжения, не вызывающих ущерба для отдельных производств, приведены табл. 2.1.

При длительности перерывов электроснабжения, превышающей указанные в табл. 2.1, имеет место так называемый "технологический" перерыв, длительность которого не зависит от длительности перерыва подачи электроэнергии. В табл. 2.2 приведены длительности технологических перерывов, или время восстановления технологического процесса, $T_{\text{тех}}$ для разных видов металлургических производств.

Таблица 2.1. Минимально допустимое время перерывов электроснабжения.

Вид производства	Электропотребители	$t_{\text{доп}}$
Коксохимическое производство	Отделения обогатительной фабрики: гравитационное, сушильное, флотационное	1 – 2 с
	Дробительные и смесительные машины	1 – 2 с
	Отделение предварительного дробления	1 – 2 с
	Машины, обслуживающие коксовую батарею	10 мин
	Коксовые батареи	10 мин
	Установка тушения кокса	10 мин
	Коксосортировка	0,5 ч
	Насосы перекачки конденсата холодильников	0,5 ч
	Насосы подачи воды на орошение газосборников	1 – 2 с
	Механизированные осветители	6 – 8 ч
	Насосы подачи оборотной воды для холодильников	1 – 2 с
	Насосы подачи воды в аммиачное отделение	1 – 2 с
	Экстаузер	1 – 2 с
	Аммиачно-сульфатное отделение со скрубберами	8 ч
	То же с абсорберами	5 – 10 мин
	Насосы подачи насыщенного раствора в испаритель	10 мин
	Насосы подачи кристаллов в центрифуги	10 мин
	Центрифуги	5 мин
	Обесфеноливающая установка	10 ч
	Цех ректификации бензола	1 – 2 с
Цех сероочистки	30 мин	
Смолперегонный цех	5 мин	
Пенококсый цех	5 мин	
Окискование	Корпус дробления и измельчения кокса, известняка	1 с
	Конвейер подачи агломерата в доменный цех	1 с
	Шаровые мельницы окомкования	0,5 ч
	Отделение дробления бетонита и известняка	0,5 ч
	Агломерационная машина	0,2 ч
	Насосы охлаждения горна обжиговой машины	0,5 ч
	Обжиговая машина	0,2 ч
	Конвейер готовых окатышей	1 с
Насосы оборотной воды на фабрике окомкования	0,1 ч	
Прокат	Непрерывные станы	1 с
	Реверсивные станы	5 – 10 мин
Обогащение	Дробилки	1 с
	Дешламаторы	10 мин
	Дисковые фильтры	1 мин
	Сгустители	15 мин
	Конвейеры дробильной и обогатительной фабрик	1 мин

Продолжение табл. 2.1

Вид производства	Электропотребители	$t_{\text{вос}}$	
Энергетические цехи	Водонасосные станции	1 – 1,5 с	
	Кислородные станции	1 – 1,5 с	
	Компрессорные станции	1 – 1,5 с	
Химия и нефтехимия	Каталитический крекинг	3 – 5 с	
	Каталитический риформинг	3 с	
	Риформинг	20 с	
	Газофракционирующая установка	20 с	
	Установка азеотропной перегонки	2 мин	
	Установка деасфальтизации	1 – 3 с	
	Атмосферно-вакуумная трубчатка	2 – 3 с	
	Цех депарафинизации и парафиновый	1 – 2 мин	
	Цех распределения производства	1 с	
	Цех выделения каучука	1 – 2 с	
Завод синтетического каучука	Цех полимеризации	2 – 3 с	
	Насосы обратного водоснабжения	2 – 3 с	
	Цех экстрактивной дистилляции	2 – 3 с	
	Цех легирования бутилена	3 с	
	Цех легирования бутана	5 – 8 с	
	Цех сжатого воздуха	3 с	
	Цех производства холода	1 – 2 мин	
	Станко-строительный завод	Листопрокатный цех	0,5 ч
		Травильные ванны	1 ч
		Калибровочный цех	0,5 ч
Режущий инструмент		1 с	
Литейное отделение		10 мин	
Цементные печи		0,5 ч	
Отпускные печи		0,5 ч	
Соляные ванны		0,5 ч	
Малярный, кузнечно-заготовительный цех		0,5 ч	
Автомобильный завод		Печи сопротивления литейного цеха	5 мин
	Газовые печи литейного цеха	1 ч	
	Шахтные печи, вытяжные вентиляторы цинковых ванн	0,1 с	
Электромашиностроение	Ванны для цинкования	1 ч	
Химкомбинат	Мешалки чанов	15 мин	
	Чаны для смешивания компонентов, их наделения и перекачивания	5 мин	
Ситцебинная фабрика	Электropечи для закалки молотовалов	20 мин	
	Гальванические ванны	5 мин	

Таблица 2.2. Время восстановления технологического процесса

Вид производства	Продолжительность нарушения электроснабжения $T_{\text{в}}$	Время восстановления технологического процесса $T_{\text{вос}}$, ч
1. Подготовительное производство		
Открытый рудник	$T_{\text{в}} > 1 \text{ с}$	–
Дробильная фабрика	$T_{\text{в}} > 1 \text{ с}$	5 – 7
Обогащательная фабрика	$1 \text{ с} < T_{\text{в}} < 1 \text{ мин}$	1
	$1 \text{ мин} < T_{\text{в}} < 10 \text{ мин}$	2 – 3
	$10 \text{ мин} < T_{\text{в}} < 15 \text{ мин}$	3 – 4
	$T_{\text{в}} > 15 \text{ мин}$	4 – 6
2. Коксохимическое производство и фабрика окомкования		
Коксохимическое производство	$1 \text{ с} < T_{\text{в}} < 5 \text{ мин}$	1,5
	$5 \text{ мин} < T_{\text{в}} < 0,5 \text{ ч}$	2
	$T_{\text{в}} > 0,5 \text{ ч}$	2
Аглофабрика	$1 \text{ с} < T_{\text{в}} < 0,2 \text{ ч}$	–
	$T_{\text{в}} > 0,2 \text{ ч}$	2 – 3
Фабрика окомкования	$1 \text{ с} < T_{\text{в}} < 0,2 \text{ ч}$	–
	$0,2 \text{ ч} < T_{\text{в}} < 3,5 \text{ ч}$	1 – 1,5
	$T_{\text{в}} > 3,5 \text{ ч}$	1,5 – 2
3. Домашнее производство		
Домашняя печь	$1,5 \text{ с} < T_{\text{в}} < 1 \text{ ч}$	2 – 6
	$T_{\text{в}} > 1 \text{ ч}$	6 – 12
4. Сталеплавильное производство		
Сталеплавильная электропечь	$T_{\text{в}} < 4,5 \text{ ч}$	3 – 4
	$T_{\text{в}} > 4,5 \text{ ч}$	15 – 17
Конвертер	$T_{\text{в}} > 5 \text{ ч}$	0,5
5. Прокатное производство		
Блюминги и слябинги	$T_{\text{в}} > 10 \text{ с}$	0,5 – 1
Мелкосортный стан	$T_{\text{в}} > 1 \text{ с}$	0,5 – 1
Проволочный стан	$T_{\text{в}} > 1 \text{ с}$	0,5 – 1
Среднесортный стан	$T_{\text{в}} > 1 \text{ с}$	0,5 – 1
6. Энергетические цехи		
Водонасосная станция	$T_{\text{в}} > 1,5 \text{ с}$	0,5
Кислородная станция	$T_{\text{в}} > 1,5 \text{ с}$	3
Компрессорная станция	$T_{\text{в}} > 1,5 \text{ с}$	0,5

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Статистические показатели надежности электрооборудования в системах электроснабжения промышленных предприятий

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Надежность электрических станций, подстанций, линий электропередачи, систем электроснабжения, преобразовательных установок, источников питания является основным техническим требованием, предъявляемым к таким установкам.

В широком смысле под надежностью понимают свойство системы или изделия сохранять свои параметры в заданных пределах при заданных условиях эксплуатации. Применительно к системам электроснабжения нормальным следует считать режим, при котором потребители обеспечиваются электроэнергией заданного качества и количества в точном соответствии с графиком ее спроса и схемой электроснабжения, предусмотренной для условий длительной работы.

Надежность системы электроснабжения определяется надежностью ее отдельных элементов (генерирующих агрегатов, линий электропередачи, коммутационной аппаратуры, устройств защиты и автоматики и др.), схемы (степенью резервирования) и режима (запасами статической и динамической устойчивости), а также жизнеспособностью или живучестью системы, т.е. ее способностью выдерживать системные аварии без катастрофических последствий. Отказы оборудования в работе неизбежны даже при хорошем качестве оборудования и высоком уровне эксплуатации. Отказы происходят в силу ряда объективных причин случайного характера и, прежде всего, из-за того, что в условиях эксплуатации оборудование

может подвергаться нерасчетным воздействиям, учет которых потребовал бы неоправданно больших запасов.

В зависимости от постановки задачи надежность можно характеризовать различными показателями. Применительно к системам электроснабжения в качестве основных показателей надежности принимают число и длительность нарушений нормального режима системы электроснабжения. На основе количественных оценок надежности возможна оценка экономической эффективности системы электроснабжения.

Оптимальный уровень надежности электроэнергетических установок определяют, оценив ущерб, нанесенный потребителям перерывом электроснабжения, а также убытки, обусловленные аварийным ремонтом, и расходы, связанные с повышением надежности. Система электроснабжения должна работать так, чтобы при ограниченной надежности ее элементов обеспечивалась оптимальная надежность электроснабжения.

Требования к надежности системы электроснабжения определяют выбор объемов и способов резервирования.

Электроприемники и их группы (электропотребители) обычно делят на три основные категории, о которых говорилось выше.

Требования, предъявляемые к надежности системы электроснабжения, во многом определяются технологией производства, поэтому рациональные решения по обеспечению требуемой надежности могут быть найдены при совместном рассмотрении вопросов технологической схемы производства и системы электроснабжения.

Отказы элементов системы электроснабжения определяются большим числом факторов, носящих случайный характер, и поэтому могут рассматриваться как случайные события. Это и предопределяет необходимость анализа надежности на основе теории вероятностей.

Для правильного понимания дальнейшего материала следует указать, что понятие элемента системы электроснабжения является в определенной степени условным. Дело в том, что в зависимости от постановки задачи одна и та же часть системы электроснабжения может рассматриваться и как система, и как элемент. Например, при анализе общей надежности системы электроснабжения предприятия, цеховые подстанции (ЦП) или распределительные устройства (РУ) могут приниматься за элементы системы электроснабжения. Однако при анализе надежности электроснабжения отдельных цехов эти же ЦП или РУ целесообразно рассматривать как систему.

Если мы принимаем РУ как систему и оцениваем его надежность, то элементами этой системы могут быть комплектные устройства, составляющие данную подстанцию. В свою очередь, если нашей целью является изучение надежности комплектного устройства, то оно будет представлять собой систему, состоящую из отдельных элементов — разъединителей, выключателей, трансформаторов тока, шин и т.д.

Различают неремонтируемые (невосстанавливаемые) и ремонтируемые (восстанавливаемые) элементы. Под *неремонтируемыми элементами* понимают элементы, восстановление которых после отказа считается невозможным (нецелесообразным). Однако это не означает, что данные устройства не могут ремонтироваться.

Понятие “неремонтируемый элемент” характеризуется не видом данного элемента, а его специфическим назначением. Например, выключатель в системе электроснабжения является, по существу, неремонтируемым элементом, но это не означает вообще невозможность ремонта и восстановления выключателя.

Под *ремонтируемыми (восстанавливаемыми) элементами* понимают такие, работа которых после отказа может быть возобновлена после проведения необходимых восстановительных работ. Под восстановлением нужно понимать не только ремонт того или иного элемента или системы, но и замену его на аналогичный и подключение резервного элемента. Например, при выходе из строя одного из трансформаторов (и при наличии устройства АВР) система электроснабжения может быть восстановлена достаточно быстро устройством АВР, хотя поврежденный трансформатор еще не будет восстановлен.

Показателем надежности принято называть признак, по которому оценивается надежность элемента, а *характеристикой надежности* — количественное значение этого показателя для этого элемента.

3.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Работоспособность элемента представляет собой состояние элемента, при котором он способен выполнять заданные функции с параметрами, установленными соответствующими требованиями.

Ремонтопригодность — приспособленность системы или элементов к предупреждению или устранению отказов или неисправностей.

Долговечность — свойство системы или элементов сохранять работоспособность до предельного состояния при необходимом об-

служивании. Предельное состояние определяется невозможностью дальнейшей эксплуатации, снижением эффективности или требованием безотказности.

Безотказность — свойство системы или элементов сохранять работоспособность в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности, т.е. когда система или элемент перестают целиком или частично выполнять свои функции.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации до момента возникновения предельного состояния.

Наработка — продолжительность или объем работы элемента, измеряемая в часах, киловатт-часах и др.

Ресурс — наработка до предельного состояния.

Среднее время восстановления — среднее время вынужденного регламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением одного отказа.

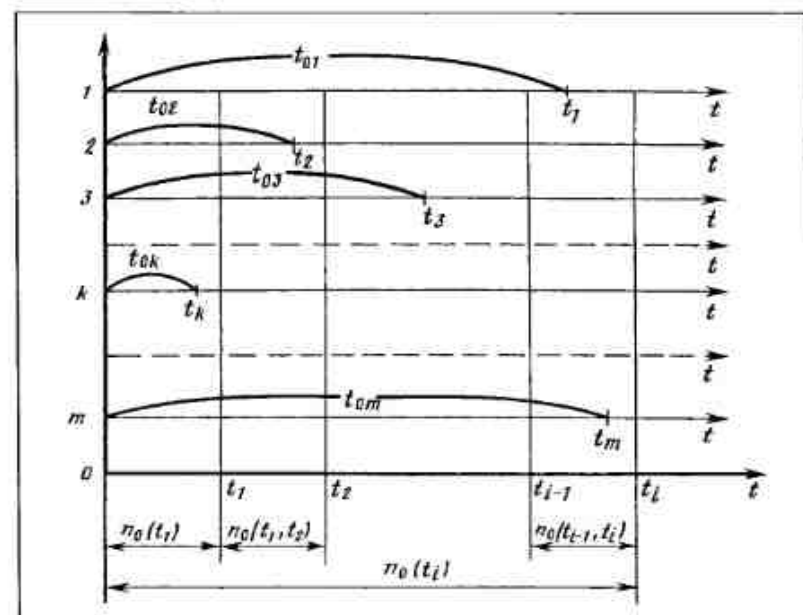


Рис. 3.1. Диаграмма экспериментального исследования надежности изделий однократного действия

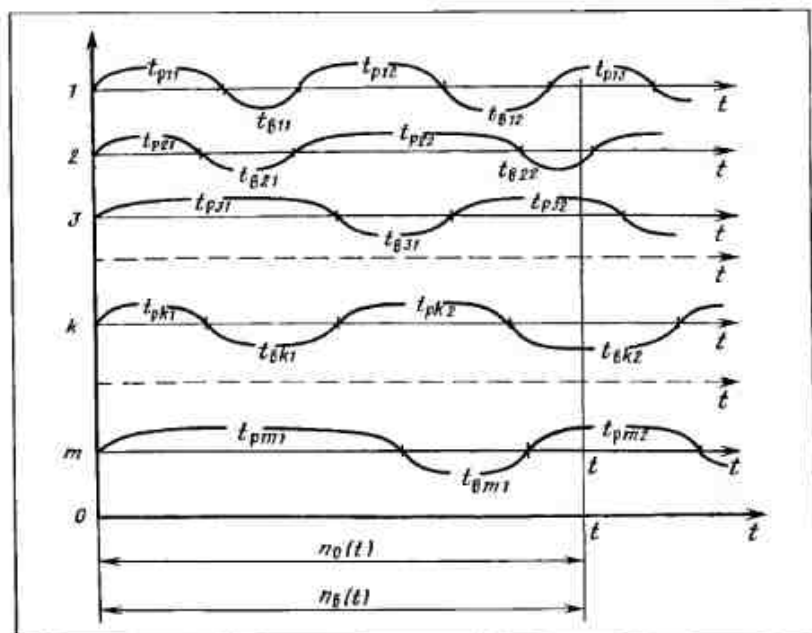


Рис. 3.2. Диаграмма экспериментального исследования надежности изделий многократного действия

Отказ и восстановление — это два противоположных случайных события. Отрезки времени между этими событиями являются случайными величинами, которые характеризуют вероятность отказа.

Пусть m одинаковых изделий однократного действия (неремонтируемых) находятся под наблюдением (в эксплуатации или на испытаниях) для оценки надежности. Изделия находятся практически в одинаковых условиях. Каждое изделие проработает какое-то время и откажет. На рис. 3.1 графически изображены результаты такого эксперимента. Промежутки времени от начала работы до момента отказа обозначены через t_{0k} , а моменты времени, когда появились отказы, через t_k . Информацию об отказах можно связать либо с непрерывной случайной величиной T_p — временем исправной работы до первого отказа, либо с дискретной случайной величиной $n_0(t_{i-1}, t_i)$ — числом отказов за рассматриваемый промежуток времени t_{i-1}, t_i .

Теперь рассмотрим аналогичное испытание m одинаковых изделий многократного действия (ремонтируемых). После отказа эти из-

делия восстанавливаются, графически процесс изображен на рис. 3.2, где t_{pk} — промежуток времени непрерывной работы k -го элемента до i -го отказа после $(i-1)$ -го восстановления; t_{bk} — промежуток времени, затрачиваемого на восстановление k -го элемента. При испытаниях изделий многократного действия рассматриваются следующие случайные величины: T_p — время исправной работы; T_w — время восстановления; $n_0(t)$ — число отказов за промежуток времени $(0, t)$; $n_b(t)$ — число восстановлений за промежуток времени $(0, t)$.

Эмпирическая вероятность отказа за любой отрезок времени t подсчитывается как отношение суммы всех t_{pk} , меньших t , к сумме всех t_{pk} , полученных во время испытаний на всех m элементах. Аналогично определяется эмпирическая вероятность восстановлений. Ряд таких эмпирических оценок дает представление о функциях распределения случайных величин T_p и T_w , характеризующих вероятности случайных событий отказа и восстановления.

Вероятность безотказной работы $p(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени (или в пределах заданной наработки) при заданных условиях работы не произойдет ни одного отказа, или вероятность того, что время безотказной работы T_p элемента или системы будет больше или равно времени t .

$$p(t) = p(T_p \geq t). \quad (3.1)$$

Вероятность отказа $q(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ, или вероятность того, что время безотказной работы T элемента или системы будет меньше времени t .

$$q(t) = q(T < t). \quad (3.2)$$

Так как отказ и безотказная работа являются событиями противоположными и несовместными, то

$$p(t) + q(t) = 1. \quad (3.3)$$

Последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то моменты времени, называется *поток событий*. События, образующие поток, в общем случае могут быть и различными. Мы будем рассматривать потоки однородных событий, различающиеся только моментами их появления.

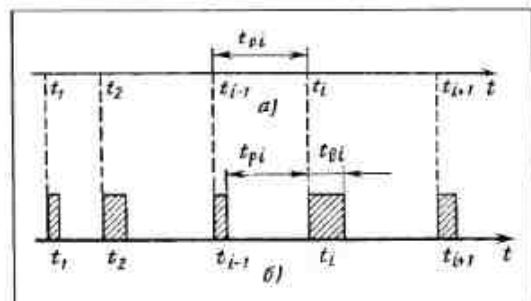


Рис. 3.3. Поток отказов и восстановлений:
 а — при нулевом времени восстановления; б — при конечном времени восстановления

Графически поток отказов и восстановлений можно представить в виде бесконечно коротких импульсов (рис. 3.3, а) при нулевом времени восстановления, либо в виде прямоугольных импульсов (рис. 3.3, б) при конечном времени восстановления.

Важной характеристикой потока является мгновенный *параметр потока отказов* $\omega(t)$ — число отказов n_0 в единицу времени Δt , отнесенное к общему числу элементов m при условии, что отказавшие элементы восстанавливаются незамедлительно:

$$\omega(t) = n_0 / m \Delta t = dq(t) / dt = q'(t). \quad (3.4)$$

Параметр $\omega(t)$ также называют *удельной повреждаемостью восстанавливаемых элементов*.

Интенсивность или опасность отказов $\lambda(t)$ — скорость изменения ненадежности изделия с течением времени, отнесенная к вероятности безотказной работы в данный момент времени. Интенсивность отказов определяется отношением числа отказов n_0 в единицу времени Δt к числу безотказно работающих в отрезок времени Δt элементов m_0 :

$$\lambda(t) = q'(t) / p(t) = n_0 / m_0 \Delta t. \quad (3.5)$$

Потоки событий, встречающиеся на практике, обладают рядом свойств. Наиболее простым свойством является свойство *ординарности* потока. Поток называется *ординарным*, если вероятность совмещения двух или более событий в один и тот же момент времени настолько мала, что практически такое совмещение является невозможным. Для большинства случаев отказов оборудования в системе электроснабжения это условие выполняется. Поток восстановлений также может считаться ординарным.

Для ординарных потоков параметр потока отказов и интенсивность отказов равны, т.е. $\omega(t) = \lambda(t)$.

Поток событий называется *стационарным*, если его вероятностный режим не изменяется во времени, т.е. если вероятность появления n_0 отказов на отрезке времени $(t, t + \tau)$ зависит только от длины отрезка τ и не зависит от t . Для стационарного и ординарного потока событий и интенсивность потока, и параметр потока отказов не зависят от времени:

$$\omega = \lambda = \text{const.}$$

Поток событий называется потоком *без последдействия*, если для любых не перекрывающихся интервалов времени число событий, появляющихся в один из них, не зависит от числа событий, появляющихся в другие интервалы.

Ординарные потоки без последдействия называют *пуассоновскими потоками*. Пуассоновские потоки могут быть как стационарными, так и нестационарными.

Для стационарного пуассоновского потока вероятность k отказов элемента за период времени t при параметре потока отказов ω следующая:

$$q_k = (\omega t)^k e^{-\omega t} / k! \quad (3.6)$$

Параметр потока отказов для электрооборудования обычно имеет размерность 1/год, поэтому при $t = 1$ год

$$q_k = \omega^k e^{-\omega} / k! \quad (3.7)$$

Отсюда вероятность безотказной работы элемента, т.е. вероятность того, что не произойдет ни одного отказа элемента за год, составляет:

$$p = q_{k=0} = e^{-\omega}. \quad (3.8)$$

Например, при $\omega = 0,03$ 1/год $p = e^{-0,03} = 0,97$.

Поток восстановлений характеризуется по аналогии с потоком отказов.

Вероятность восстановления $v(t)$ — вероятность того, что время восстановления $T_{\text{в}}$ элемента или системы будет меньше времени t :

$$v(t) = v(T_{\text{в}} < t). \quad (3.9)$$

Вероятность невосстановления $w(t)$ — вероятность того, что время восстановления $T_{\text{в}}$ элемента или системы будет больше или равно времени t :

$$w(t) = w(T_{\text{в}} \geq t) = 1 - v(t). \quad (3.10)$$

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ в момент времени t , отсчитываемый от начала восстановления, — отношение плотности вероятности восстановления к вероятности невосстановления:

$$\mu(t) = v'(t)/w(t) = w'(t)/w(t). \quad (3.11)$$

3.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ПЛАНОВЫХ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Известно, что оборудование может находиться в следующих состояниях с соответствующими временами: в работе — $T_{\text{раб}}$; в аварийном простое — $T_{\text{ав}}$; в плановом ремонте — $T_{\text{пл}}$; в резерве — $T_{\text{рез}}$; в эксплуатационном останове — $T_{\text{экс}}$.

Для выбора схем электрических соединений электростанций, подстанций, электрических сетей и систем электроснабжения в целом, а также для определения величины и места размещения резерва необходимы следующие показатели, характеризующие надежность работы электрооборудования:

1) периодичность повреждений, неисправностей и отказов в работе оборудования, периодичность отказов, ложных и неправильных действий устройств защиты и автоматики;

2) время ликвидации аварии данного вида оборудования или установки, трудозатраты и стоимость аварийно-восстановительных работ;

3) периодичность проведения плановых ремонтно-эксплуатационных работ, связанных с выводом оборудования из работы, трудозатраты и стоимость ремонтно-эксплуатационных работ.

В табл. 3.1 приведены признаки классификации промышленных изделий для определения необходимых показателей надежности и сами показатели, оценивающие два состояния: работу и отказ.

Рассмотрим эти показатели применительно к электрооборудованию.

Параметр потока отказов (или удельная повреждаемость) определяется как отношение количества $\Delta n_0(t)$ отказавших единиц оборудования в единицу времени Δt к числу $m(t)$ единиц оборудования, работающих в данный отрезок времени:

$$\omega(t) = \Delta n_0(t)/m(t)\Delta t. \quad (3.12)$$

Характеристика $\omega(t)$ может иметь весьма сложную зависимость от времени. Особый интерес в связи с этим представляет зависимость $\omega(t)$ от срока эксплуатации, на основании которой можно установить периоды приработки, нормальной работы и старения для отдельных видов оборудования. В настоящее время в литературе приводятся данные об удельной повреждаемости в среднем за год работающего электрооборудования, следовательно, размерность параметра потока отказов и интенсивности отказов — 1/год.

Средняя наработка на отказ представляет собой среднее значение времени работы между отказами оборудования данного типа и определяется по экспериментальным данным:

$$T_{\text{ср}} = \sum t_{\text{р}}/k, \quad (3.13)$$

где $t_{\text{р}}$ — время работы оборудования данного типа между $(i-1)$ и i -м отказами; k — число отказов.

Число отказов, а, следовательно, и интервалы между ними для линий электропередачи зависят от длины линий, поэтому в этом случае интервалы между авариями должны приводиться к одной длине (например, $l = 100$ км) по формуле

$$t_{\text{р}} = t_{\text{рф}}(l_{\text{ф}}/l), \quad (3.14)$$

где $t_{\text{рф}}$ — фактический интервал; $l_{\text{ф}}$ — фактическая длина линии.

Среднее время наработки на отказ, или, иначе говоря, продолжительность работы между отказами, можно определить приблизительно за год

$$T_{\text{ср}} \approx \frac{1}{\omega}. \quad (3.15)$$

Таблица 3.1. Основные показатели надежности промышленных изделий

Изделие	Продолжительность функционирования	Основные факторы при оценке последствий отказа	Основные показатели надежности
Неремонтируемое	До первого отказа	Наличие отказа независимо от времени простоя	Средняя наработка на отказ T_{cp}
	До первого отказа или до предельного состояния		Ресурс $T_{рес}$
	До первого отказа или до окончания выполнения заданных функций	Факт выполнения или невыполнения заданных функций в заданном объеме	Вероятность безотказной работы за заданное время
Ремонтируемое	До предельного состояния	Факт выполнения или невыполнения заданных функций в заданном объеме	Ресурс $T_{рес}$, коэффициент готовности K_t
		Факт вынужденного простоя	Ресурс $T_{рес}$, вероятность безотказной работы за заданное время
		Наличие отказа независимо от длительности простоя	Ресурс $T_{рес}$, среднее значение параметра потока отказов ω
	До отказа или до окончания выполнения заданных функций	Факт выполнения или невыполнения заданных функций в заданном объеме	Вероятность безотказной работы за заданное время
	До предельного состояния, до отказа или до окончания выполнения заданных функций	Факт вынужденного простоя, факт выполнения заданных функций в заданном объеме	Ресурс $T_{рес}$, коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$

Ресурс — продолжительность, или объем, работы $T_{рес}$ в часах непрерывной работы или в числе операций до предельного состояния. Например, для выключателей ресурсом является допустимое число отключенных коротких замыканий до внепланового ремонта. Для других видов оборудования ресурс можно определить по результатам эксплуатации.

Среднее время восстановления представляет собой среднее значение времени отыскания и устранения имеющейся неисправности. При этом учитывается как среднее время проведения ремонтных работ по восстановлению поврежденного или отказавшего оборудования, так и среднее время, необходимое для проведения оперативных переключений по восстановлению нормальной схемы электро-

установки или замене отказавшего оборудования резервным. Среднее время восстановления определяется на основе эксплуатационного опыта и рассчитывается по формуле

$$T_{cp,в} = \Sigma t_{в}/k, \quad (3.16)$$

где $t_{в}$ — время ремонта или оперативных переключений (с учетом времени отыскания неисправности или повреждения); k — число отказов.

Коэффициент готовности характеризует готовность электрооборудования к выполнению своих функций или вероятность p надежной работы. Коэффициент готовности K_t определяется как отношение времени нахождения оборудования в рабочем состоянии к сумме времен нахождения в рабочем состоянии и в вынужденном простое за рассматриваемый период времени. При этом оборудование, выведенное в резерв, можно считать находящимся в рабочем состоянии. Тогда

$$K_t = (T_{раб} + T_{рез}) / (T_{раб} + T_{рез} + T_{ин}). \quad (3.17)$$

Если длительность нахождения оборудования в резерве невелика, коэффициент готовности определяется как отношение среднего времени рабочего состояния к сумме среднего времени рабочего состояния и среднего времени восстановления

$$K_t = p = T_{cp} / (T_{cp} + T_{cp,в}). \quad (3.18)$$

Коэффициент готовности, по существу, — вероятность безотказной работы элемента.

Коэффициент вынужденного простоя — это вероятность q того, что элемент будет неработоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между плановыми ремонтами, т.е. восстанавливается после отказа:

$$K_{в} = q = 1 - K_t = T_{cp,в} / (T_{cp} + T_{cp,в}). \quad (3.19)$$

Коэффициент вынужденного простоя может быть вычислен и непосредственно через основные показатели надежности:

$$K_{в} = T_{cp,в} / (T_{cp} + T_{cp,в}) = T_{cp,в} / (1/\omega + T_{cp,в}). \quad (3.20)$$

Если $T_{\text{ср.н}} \omega < 1$, а $T_{\text{ср.н}}$ приводится в годах, то

$$K_{\text{н}} = q = T_{\text{ср.н}} \omega. \quad (3.21)$$

Если $T_{\text{ср.н}}$ приводится в часах, то

$$K_{\text{н}} = T_{\text{ср.н}} \omega / 8760 = T_{\text{ср.н}} \lambda / 8760. \quad (3.22)$$

Таким образом, вероятность состояния отказа элемента за достаточно большой промежуток времени (не менее года) равна произведению среднего времени восстановления и параметра потока отказов (интенсивность отказов), т.е. практически по удельной повреждаемости оборудования и среднему времени восстановления можно определить средние вероятности состояния отказа и рабочего состояния.

Для оценки надежности систем электроснабжения, кроме показателей надежности элементов, необходимо знать показатели их плановых ремонтов, так как отказы в ремонтных режимах могут приводить к наиболее к тяжелым последствиям.

Показателями плановых ремонтов являются *частота плановых ремонтов* π , 1/год, и *средняя продолжительность планового ремонта* $T_{\text{пл}}$, ч.

По аналогии с коэффициентом вынужденного простоя можно определить *коэффициент планового ремонтного простоя*, или коэффициент ремонтного режима:

$$K_{\text{п}} = \pi T_{\text{пл}} / 8760. \quad (3.23)$$

Этот коэффициент является также вероятностью нахождения в плановом простое $q_{\text{п}}$.

Время вывода элемента в плановый ремонт обычно выбирают таким образом, чтобы вызванное отключением элемента снижение надежности было бы наименьшим.

Например, капитальный ремонт генерирующих агрегатов электростанций проводится, в основном, во время летнего провала графика нагрузки системы. Очевидна нецелесообразность вывода линий электропередачи в плановый ремонт, когда по прогнозу ожидаются неблагоприятные климатические условия — гроза, гололед. При отказе одного элемента вывод в плановый ремонт другого элемента, его резервирующего, как правило, может быть отложен и т.п. Эти обстоятельства принимаются во внимание при учете влияния плановых ремонтов на надежность электроснабжения.

Таблица 3.2. Показатели надежности и плановых ремонтов трансформаторов и линий электропередачи

Элемент и номинальное напряжение, кВ	Параметр потока отказов ω , 1/год	Время восстановления $T_{\text{вр}}$, ч	Частота плановых ремонтов π , 1/год	Продолжительность планового ремонта, $T_{\text{пл}}$, ч
Трансформаторы:				
220	0,020	250	1,0	40
110	0,015	200	1,0	30
35 – 20	0,020	150	1,0	30
6 – 10, кабельная сеть	0,005	100	0,5	10
6 – 10, воздушная сеть	0,050	100	0,5	10
Воздушные линии на 100 км с АПВ на металлических или железобетонных опорах:				
220	0,7	16	6	8
110	1,0	14	5	8
35	2,0	12	5	8
10	2,0	5	4	8
Кабели на 100 км:				
6 – 10, в траншее	8,0	60	1	8
6 – 10, в туннеле	1,3	35	1	8
6 – 10, в блоках	10,0	100	1	8

Показатели надежности и плановых ремонтов трансформаторов и линий электропередачи приведены в табл. 3.2.

Для автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов можно пользоваться показателями, приведенными в табл. 3.2 для двухобмоточных трансформаторов, увеличивая параметр потока отказов на 20 %.

Параметры потока отказов линий электропередачи $\omega_{\text{л}}$ даны для линий протяженностью 100 км и учитывают только устойчивые отказы, не ликвидируемые автоматическим повторным включением (АПВ). Определение параметра потока отказов $\omega_{\text{л}}$ линий, 1/год, протяженностью l , км, производится по формуле

$$\omega_{\text{л}} = \omega_{0\text{л}} l / 100. \quad (3.24)$$

Для воздушных линий на двухцепных или одноцепных опорах, но проходящих по одной трассе, а также для кабельных линий, проложенных в одной траншее, необходимо выделять отказы, приводящие к одновременным вынужденным простоям, обусловленным одинаковым воздействием внешних факторов на обе цепи.

Таблица 3.3. Показатели надежности и плановых ремонтов аппаратов и шин

Аппарат и напряжение, кВ	Составляющие параметра потока отказов, 1/год		Время восстановления, $T_{вр}, ч$	Частота плановых ремонтов, 1/год	Продолжительность планового ремонта, $T_{пл}, ч$
	ω'	ω''			
Воздушные выключатели:					
220	0,025	0,010	150	0,3	250
110	0,020	0,012	100	0,3	180
35	0,015	0,015	70	0,3	120
Масляные выключатели:					
в воздушной сети					
220	0,020	0,005	70	0,3	120
110	0,015	0,007	50	0,3	100
35	0,010	0,010	30	0,3	80
6 – 10	0,01	—	10	0,3	8
в кабельной сети 6 – 10					
	0,005	—	10	0,3	8
Короткозамыкатели и отделители:					
220	0,04	—	4	0,3	—
110	0,02	—	4	0,3	—
35	0,01	—	4	0,3	—
Разъединители:					
220	0,008	—	15	0,3	20
110	0,008	—	15	0,3	16
35	0,008	—	15	0,3	4
6 – 10	0,008	—	15	0,3	3
Реакторы 6 – 10					
	0,002	—	1	0,3	3
Шины (на одно присоединение):					
220	0,01	—	4	0,3	16
110	0,01	—	2	0,3	8
35	0,01	—	2	0,3	8
6 – 10	0,01	—	2	0,3	8

Доля отказов с одновременным простоем обеих цепей составляет 10 – 30 % общего числа отказов одной цепи. Таким образом, для двухцепных линий следует учитывать два показателя надежности: параметр потока отказов каждой из цепей:

$$\omega'_n = (1 - k_{2л})\omega_n; \quad (3.25)$$

параметр потока отказов, приводящих к одновременному простоем обеих цепей:

$$\omega''_n = k_{2л}\omega_n; \quad (3.26)$$

где $k_{2л} = 0,1 \div 0,3$ — доля отказов, приводящих к одновременному простоем обеих цепей.

В показателях плановых ремонтов линий не учтена возможность их выполнения под напряжением, т.е. без отключения линии.

Показатели надежности и плановых ремонтов аппаратов и шин приведены в табл. 3.3; в них учтены отказы не только самих выключателей, но и всего оборудования ячеек: разъединителей, измерительных трансформаторов, разрядников. В табл. 3.3 также приведены параметры надежности короткозамыкателей, отделителей, разъединителей, реакторов и шин.

Отказы выключателей зависят от числа отключаемых ими КЗ, примерно пропорциональны протяженности присоединенных к выключателю линий. Поэтому в табл. 3.3 приведены две составляющие параметра потока отказов выключателя: ω_1 и ω_2 , по которым определяется параметр потока отказов выключателя с учетом протяженности присоединенных к нему линий электропередачи l , км:

$$\omega_B = \omega_1 + \omega_2 l / 100. \quad (3.27)$$

При анализе надежности схем РУ различают внезапные отказы выключателей, приводящие к действию устройства резервирования отказа выключателя или защиты сборных шин и отключению выключателей, смежных с отказавшим, и отказы, выявляемые при осмотрах и осмотрах и требующие лишь вывода выключателя в внеплановый ремонт. Так, например, в схеме четырехугольника (рис. 3.4) внезапный отказ выключателя $B1$ приводит к отключению выключателей $B2$ и $B3$: при этом происходит отделение линии и трансформатора.

При отказе, обнаруженном во время осмотра, и выводе выключателя во внеплановый ремонт все линии и трансформаторы, коммутируемые в РУ, остаются в работе.

Коэффициент, характеризующий долю внезапных отказов от общего числа отказов выключателей, равен примерно 0,6. Обозначив его через $k_{шт}$, получим:

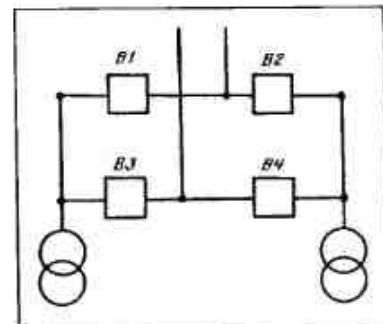


Рис. 3.4. Схема четырехугольника

параметр потока внезапных отказов выключателя

$$\omega'_u = k_{\text{шт}} \omega_{\text{шт}} \quad (3.28)$$

параметр потока отказов, выявленных при осмотре,

$$\omega''_u = (1 - k_{\text{шт}}) \omega_{\text{шт}} \quad (3.29)$$

При внезапных отказах выключателей отключившиеся элементы (генерирующие агрегаты, трансформаторы, линии электропередачи) в большинстве случаев могут быть введены в работу раньше, чем будет произведен ремонт выключателя. При этом длительность их простоя (время восстановления) определяется временем, ч, необходимым для выполнения переключений в РУ:

$$T_{\text{ср.в}} = T_0 + T_p n_p \quad (3.30)$$

где T_0 — постоянная составляющая, равная времени, необходимому для того, чтобы обслуживающий персонал мог прийти в РУ и установить характер повреждения (для подстанций с обслуживанием $T_0 = 0,1 \div 0,3$ ч); $T_p = 0,1$ ч — время для отключения (включения) разъединителя; n_p — число разъединителей, которые должны быть отключены (включены) для отделения поврежденного выключателя и ввода отключившихся элементов в работу.

Средняя продолжительность планового ремонта шин, ч, за год:

$$T_{\text{пл.ш}} = 1 + 2n_{\text{р.ш}} \quad (3.31)$$

где $n_{\text{р.ш}}$ — число разъединителей, присоединенных к системе сборных шин.

В качестве примера рассмотрим участок электрической сети, состоящей из последовательно соединенных элементов: выключателя, линии электропередачи и трансформатора (рис. 3.5). Очевидно, что отказ любого из элементов приводит к вынужденному простоям всего участка. Влияние каждого из элементов на надежность всего участка можно

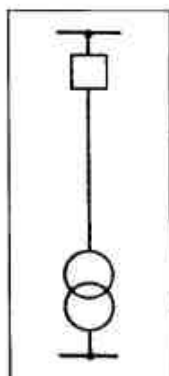


Рис. 3.5. Схема ЛЭП

Таблица 3.4. Показатели надежности элементов участка сети напряжением 110 кВ

Элемент	ω , 1/год	$T_{\text{ср.в}}$, ч	$K_{\text{в}}$, отн. сл.
Выключатель	0,026	100	0,0003
Линия 50 км	0,50	14	0,0008
Трансформатор	0,015	200	0,0003

оценить по данным табл. 3.4, где приведены показатели надежности элементов участка сети напряжением 110 кВ.

Сопоставление параметров потоков отказов ω элементов каждого из напряжений показывает, что наименее надежным элементом являются линии электропередачи. Их параметр потока отказов на порядок больше параметров потока отказов трансформаторов и выключателей.

Время восстановления $T_{\text{ср.в}}$ трансформаторов и выключателей, наоборот, на порядок больше, чем у линий электропередачи. Это приводит к тому, что значения коэффициентов вынужденного простоя $K_{\text{в}}$ (вероятности отказов) всех элементов имеют одинаковый порядок.

Простейшие модели надежности групп элементов

4.1. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ БЕЗ УЧЕТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Надежность каждого элемента системы электроснабжения можно характеризовать коэффициентом готовности K_r (вероятность рабочего состояния p) и коэффициентом вынужденного простоя $K_{\text{вп}}$ (вероятность состояния отказа q). Если не учитывать плановые простои (ремонт), то можно считать, что элемент в любой момент времени находится в одном из этих состояний. Тогда сумма вероятностей этих состояний равна 1:

$$p + q = 1.$$

Для группы из двух элементов возможны следующие сочетания:

- 1) оба элемента в рабочем состоянии;
- 2) первый элемент в вынужденном простое, второй в рабочем состоянии;
- 3) первый элемент в рабочем состоянии, второй в вынужденном простое;
- 4) оба элемента в вынужденном простое.

Вероятности этих состояний можно найти, воспользовавшись теоремой умножения вероятностей событий. Применительно к состояниям элементов эта теорема может быть сформулирована следующим образом: вероятность сложного события, состоящего в совпадении данных независимых состояний группы элементов, равна произведению вероятностей этих состояний.

Тогда вероятность сложного события группы из двух элементов, когда оба элемента находятся в рабочем состоянии, будет равна произведению вероятностей этих состояний: $p_1 p_2$.

Аналогично вероятности остальных перечисленных выше состояний: $q_1 p_2$, $p_1 q_2$ и $q_1 q_2$.
Очевидно, что

$$(p_1 + q_1)(p_2 + q_2) = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2 + q_1 q_2 = 1. \quad (4.1)$$

Если в системе из двух элементов элементы резервируют друг друга, то отказ системы произойдет только тогда, когда откажут оба, т.е. вероятность отказа системы из двух элементов со взаимным резервированием

$$q_c = q_1 q_2, \quad (4.2)$$

а вероятность надежной работы

$$p_c = 1 - q_c = 1 - q_1 q_2 = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2. \quad (4.3)$$

Таким образом вероятность надежной работы системы из двух взаиморезервируемых элементов можно определить, пользуясь теоремами сложения и умножения вероятностей. Теорема сложения формулируется так: вероятность состояния группы элементов, состоящего в появлении хотя бы одного из заданных несовместимых состояний, равна сумме вероятности этих состояний.

Если два элемента не резервируют друг друга, то состояние отказа этой системы будет тогда, когда откажет хотя бы один элемент, а состояние надежной работы будет тогда, когда оба элемента в работе, т.е. для не резервированной системы из двух элементов вероятность надежной работы

$$p_c = p_1 p_2; \quad (4.4)$$

вероятность отказа

$$q_c = 1 - p_c = 1 - p_1 p_2 = q_1 q_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2. \quad (4.5)$$

Для анализа показателей надежности электрической схемы соединений элементов или ее части используют структурные (логические) схемы надежности, которые учитывают электрическую схему, резервирование элементов и влияние их отказов на отказ всей системы. Например, если система состоит из двух элементов, и отказ элемента не приводит к отказу всей системы, то в логической схеме эле-

менты соединяются параллельно. Если отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы, то эти элементы соединяются последовательно. Отметим, что логическая схема надежности не всегда совпадает с электрической схемой, особенно для схем с большим количеством присоединений.

4.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Простейшей технической системой в смысле теории надежности является комплекс элементов, где отказ любого элемента вызывает отказ всей системы, и отказ любого элемента не изменяет надежности других. Такое соединение элементов в теории надежности называют последовательным.

Эта система будет находиться в рабочем состоянии, если все элементы находятся в рабочем состоянии. Сложное событие — работа всех элементов схемы состоит в совмещении событий работы каждого элемента. Применяя теорему умножения вероятностей независимых событий, получаем вероятность безотказной работы системы как произведение вероятностей безотказной работы всех элементов:

$$p_c = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod p_i \quad (4.6)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — элементы в последовательно соединенной системе; p_i — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Вероятность состояния отказа определяется как вероятность события, противоположного рабочему состоянию

$$q_c = 1 - p_c = 1 - \prod p_i \quad (4.7)$$

На практике вероятность состояния отказа в последовательно соединенной системе определяется как вероятность отказа хотя бы одного элемента, которая определяется с использованием формулы для вероятностей суммы совместных событий:

$$q_c = \sum q_i - \sum q_i q_j + \sum q_i q_j q_k - \dots - (-1)^{n-1} q_1 q_2 \dots q_n \quad (4.8)$$

Для элементов электрических систем вероятности отказов гораздо меньше 1, поэтому при определении состояния отказа из n последовательно соединенных элементов вторым, третьим и последующими слагаемыми правой части равенства (4.8) можно пренебречь,

как числами более высокого порядка малости. Поэтому в практических расчетах используют формулу

$$q_c = \sum q_i \quad (4.9)$$

При последовательном соединении элементов в логической схеме надежности вероятности безотказной работы элементов перемножаются (4.6), поэтому при экспоненциальном законе распределения:

$$p_c = e^{-\sum \omega_i} = e^{-\omega_c} \quad (4.10)$$

отсюда

$$\omega_c = \sum \omega_i \quad (4.11)$$

т.е. при последовательном соединении параметры потока отказов складываются.

Следовательно, чем большее число элементов n соединено последовательно в логической схеме надежности, тем больше параметр потока отказов системы и тем меньше вероятность ее надежной работы.

Среднее время между отказами или время наработки на отказ для такой схемы из n элементов равно:

$$T_{cp} = 1/\omega_c = 1/\sum \omega_i = 1/(1/T_1 + 1/T_2 + \dots + 1/T_n) \quad (4.12)$$

Для схемы из двух последовательно соединенных элементов с одинаковыми параметрами потока отказов, при $\omega_i = \omega$:

$$T_{cp} = 1/(1/T + 1/T) = T/2, \quad (4.13)$$

т.е. с увеличением числа элементов время рабочего состояния системы уменьшается.

Если известны вероятность вынужденного простоя и параметр потока отказов, можно определить среднее время одного восстановления (аварийного ремонта) системы в долях года:

$$T_{н.с} = q_c / \omega_c \quad (4.14)$$

4.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вероятность надежной работы такой системы наиболее просто определяется через вероятность противоположного события, т.е. вероятность состояния отказа системы, которое наступит тогда, когда все элементы откажут одновременно. Вероятность состояния отказа для такой системы определяется как произведение вероятностей отказа работы всех элементов:

$$q_c = q_1 q_2 q_3 \dots q_n = \prod q_i \quad (4.15)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — элементы в параллельно соединенной системе; q_i — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Вероятность рабочего состояния определяется как вероятность события, противоположного состоянию отказа

$$p_c = 1 - q_c = 1 - \prod q_i \quad (4.16)$$

Для системы из двух параллельно соединенных в логической схеме надежности элементов вероятность безотказной работы в течение одного года равна:

$$p_c = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) = p_1 + p_2 - p_1 p_2 = e^{-\omega_1} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)} \quad (4.17)$$

При $\omega_1 = \omega_2 = \omega$

$$p_c = 2e^{-\omega} - e^{-2\omega} \quad (4.18)$$

Для двух элементов в параллельной схеме надежности средняя наработка на отказ равна:

$$T_{cp} = \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4.19)$$

Если $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то

$$T_{cp} = \frac{2}{\omega} - \frac{1}{2\omega} = \frac{3}{2\omega} \quad (4.20)$$

Под параметром потока отказов группы элементов, соединенных параллельно в логической схеме надежности, понимают событие, заключающееся в совпадении вынужденных простоев всех элементов группы. Для системы из двух элементов параметр потока отказов равен:

$$\omega_c = \omega_1 q_2 + \omega_2 q_1 \quad (4.21)$$

где ω_1 и ω_2 — параметры потока отказов первого и второго элементов; q_1 q_2 — вероятности (коэффициенты) вынужденного простоя.

В (4.21) первый член соответствует наложению отказа первого элемента на вынужденный простой второго, а второй наоборот — наложению отказа второго элемента на вынужденный простой первого.

Чтобы найти время восстановления этой группы, определим вероятность их одновременного отказа:

$$q_c = q_1 q_2 \quad (4.22)$$

По известным параметру потока отказов и вероятности отказа, используя выражение (4.21), найдем время восстановления системы $T_{в.с}$ и при одинаковых параметрах элементов получим:

$$T_{в.с} = q_c / \omega_c = T_B / 2, \quad (4.23)$$

где T_B — время восстановления одного элемента.

4.4. УЧЕТ ПЛАНОВЫХ РЕМОНТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ

При оценке надежности групп элементов, кроме вероятности внезапных отказов при нормальных режимах, необходимо учитывать возможное наложение внезапного отказа одних элементов на плановый ремонт других. Для учета плановых ремонтов необходимо определять среднее число наложенных на плановый ремонт одного элемента отказов другого элемента и среднее время их одновременного простоя. Эти показатели для двух элементов определяют следующим образом.

Предположим, что известны: для первого элемента — частота плановых ремонтов π_1 , 1/год, и средняя продолжительность одного планового ремонта $T_{пл1}$, год; для второго элемента — параметр потока отказов ω_2 , 1/год, время восстановления $T_{в2}$, год.

Среднее число наложенных отказов второго элемента на плановый ремонт первого элемента, 1/год:

$$\omega_{пл1, в2} = \omega_2 \pi_1 T_{пл1} = \omega_2 q_{п1}, \quad (4.24)$$

где $q_{п1}$ — вероятность (коэффициент) планового простоя первого элемента.

Если логическая схема надежности последовательно соединенных элементов соответствует принципиальной электрической схеме соединения элементов, то, учитывая, что в реальных условиях плановый профилактический ремонт элементов последовательной цепи производится одновременно, вероятность простоя цепи определяется как сумма вероятностей состояния внезапного отказа q_c и преднамеренного отключения $q_{п.нб}$ того из элементов, у которого продолжительность планового отключения наибольшая:

$$q_{с.п} = q_c + q_{п.нб}. \quad (4.25)$$

4.5. СОСТАВЛЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НАДЕЖНОСТИ ПО СХЕМАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Последовательное соединение. Рассмотрим простейшую схему электрических соединений, состоящую из выключателя, линии электропередачи и трансформатора (рис. 3.5). Для такой электрической схемы логическая схема надежности представляет собой последовательное соединение трех элементов, так как отказ любого элемента вызывает отказ всей системы. На рис. 4.1 дана соответствующая логическая схема надежности. Обычно над прямоугольником, отражающим влияние каждого элемента на надежность системы в целом, указываются вид элемента, а в прямоугольнике — присвоенный ему номер в схеме надежности.

Для схемы на рис. 4.1 показатели надежности определяются как для последовательной схемы надежности (см. § 4.2).

Если шины источника питания, от которого отходит линия, имеют еще присоединения (рис. 4.2), то их надежность отражается на надежности электроснабжения потребителей рассматриваемой линии, поскольку отказ или вывод в плановый ремонт каждого из шинных разъединителей приводит к отключению всей шины и, следовательно, к отключению рассматриваемой линии. Поскольку, как сказано выше, отказ каждого присоединения приводит к отказу всей системы, в логической схеме надежности эти элементы соединены последовательно с элементами рассматриваемой линии (рис. 4.3).

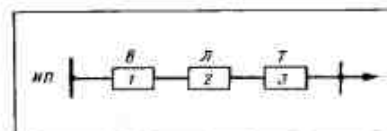


Рис. 4.1. Логическая схема надежности последовательно соединенных элементов

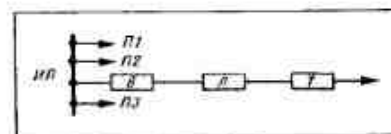


Рис. 4.2. Схема ЛЭП с несколькими (тремя) присоединениями к шинам ИП

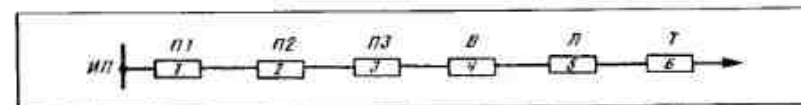


Рис. 4.3. Логическая схема надежности ЛЭП с несколькими (тремя) присоединениями к шинам ИП

Для схемы на рис. 4.3 показатели надежности определяются так же, как для последовательной схемы надежности (см. § 4.2). Очевидно, что значение параметра потока отказов схемы на рис. 4.3 больше, чем схемы на рис. 4.1, и чем большее число присоединений имеют шины ИП, тем менее надежна система электроснабжения в целом.

Параллельное соединение. Элементы в логической схеме надежности соединяют параллельно, если при отказе одного, другой обеспечивает надежность системы полностью. Для систем электроснабжения это возможно в том случае, если при отказе одной цепи оставшаяся в работе цепь обеспечивает требуемую пропуск-

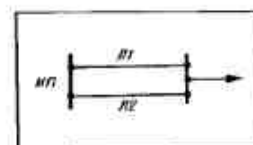


Рис. 4.4. Схема двухцепной ЛЭП без выключателей

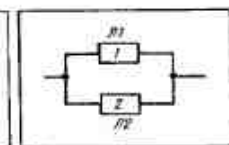


Рис. 4.5. Логическая схема надежности двухцепной ЛЭП

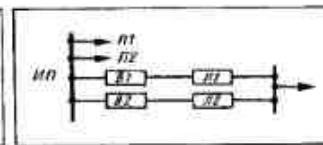


Рис. 4.6. Схема электроснабжения от одного ИП

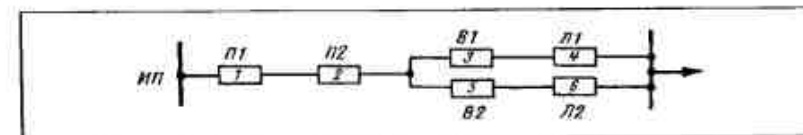


Рис. 4.7. Логическая схема надежности при параллельно-последовательном соединении элементов

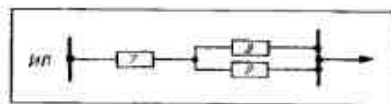


Рис. 4.8. Первый этап преобразования логической схемы надежности

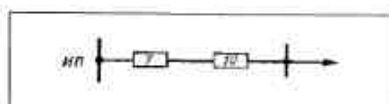


Рис. 4.9. Второй этап преобразования логической схемы надежности

ную способность элементов и мощность источника питания работающей цепи достаточна для обеспечения объекта электроснабжения без ограничения в подаче электроэнергии при надлежащем ее качестве. Если указанные выше условия не соблюдаются, то элементы не могут рассматриваться как взаиморезервируемые и, следовательно, в логической схеме надежности они не могут быть соединены параллельно.

На рис. 4.4 изображена электрическая схема двухцепной линии электропередачи, которая может быть представлена параллельным соединением элементов в логической схеме ее надежности (рис. 4.5). Для схемы на рис. 4.5 показатели надежности определяют как для параллельной схемы надежности (см. § 4.3).

Параллельно-последовательные и последовательно-параллельные соединения. Очевидно, что реальные схемы электроснабжения не сводятся только к последовательным или только к параллельным соединениям в логических схемах надежности. Так, например, для электрической схемы, изображенной на рис. 4.6, логическая схема надежности может быть представлена так, как показано на рис. 4.7.

Для анализа такой схемы электроснабжения необходимо получить показатели надежности всей схемы по показателям надежности ее элементов. Для этого следует преобразовать логическую схему надежности так, чтобы шины ИП и потребителя были связаны одним элементом (наподобие того, как преобразовываются электрические цепи с последовательно-параллельным соединением сопротивлений). Покажем порядок преобразований на примере схемы на рис. 4.7.

Преобразовываем все последовательные цепи и находим показатели надежности объединенных элементов 7, 8 и 9 (рис. 4.8):

$$\left. \begin{aligned} \omega_7 &= \omega_1 + \omega_2; & \omega_8 &= \omega_3 + \omega_4; & \omega_9 &= \omega_5 + \omega_6; \\ T_{\text{ср.в}7} &= (T_{\text{ср.в}1}\omega_1 + T_{\text{ср.в}2}\omega_2) / \omega_7; \\ T_{\text{ср.в}8} &= (T_{\text{ср.в}3}\omega_3 + T_{\text{ср.в}4}\omega_4) / \omega_8; \\ T_{\text{ср.в}9} &= (T_{\text{ср.в}5}\omega_5 + T_{\text{ср.в}6}\omega_6) / \omega_9. \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Соответствующие коэффициенты вынужденного и планового простоя рассчитывают по приведенным в § 3.3 формулам.

В результате преобразований получаем схему на рис. 4.8 с параллельными элементами (8 и 9). Далее необходимо заменить элементы 8 и 9 одним (10) на рис. 4.9).

Для двух параллельно соединенных элементов эквивалентный элемент характеризуется только показателями надежности, так как одновременные плановые простои элементов предполагаются недопустимыми.

Вероятность безотказной работы в течение одного года будет равна:

$$P_{10} = e^{-\omega_8} + e^{-\omega_9} - e^{-(\omega_8 + \omega_9)}. \quad (4.27)$$

Параметр потока отказов (4.21):

$$\omega_{10} = \omega_8 q_9 + \omega_9 q_8. \quad (4.28)$$

При $\omega_8 = \omega_9$ и $q_8 = q_9$:

$$\omega_{10} = 2\omega_8 q_9, \quad T_{\text{в}10} = T_{\text{в}8} / 2. \quad (4.29)$$

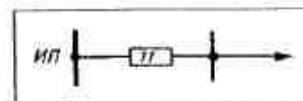


Рис. 4.10. Третий этап преобразования логической схемы надежности

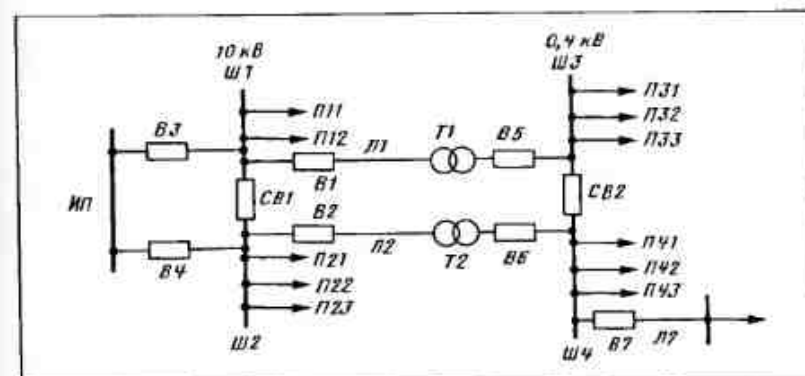


Рис. 4.11. Схема электроснабжения с двумя ИП

В результате получим схему с двумя последовательно соединенными элементами — 7 и 10 (рис. 4.9) и их параметры надежности. Далее следует определить параметры надежности всей схемы — элемента 11 (рис. 4.10) по параметрам последовательно соединенных двух элементов 7 и 10, как указывалось выше.

Мостиковые схемы. В электрических схемах электроснабжения с двумя источниками питания логическая схема надежности потребителя не может быть сведена к последовательно-параллельным соединениям из-за наличия секционных выключателей с автоматическим вводом резерва (АВР).

На рис. 4.11 показана схема электроснабжения объекта с двухтрансформаторной подстанцией 10/0,4 кВ, получающей питание от секционированных (через секционный выключатель СВ1) шин ИП. Первая секция шин Ш1 присоединена к ИП через выключатель В3 и имеет два присоединения (П11 и П12), кроме основного присоединения, питающего трансформатор Т1 объекта электроснабжения через выключатель В1 и линию Л1. Вторая секция шин Ш2 присоединена к ИП через выключатель В4 и имеет три присоединения (П21, П22 и П23), кроме основного, питающего трансформатор Т2 объекта электроснабжения через выключатель В2 и линию Л2. Трансформаторная подстанция объекта также имеет секционированную систему шин с секционным выключателем СВ2. Секция Ш3 имеет три присоединения (П31, П32, П33); секция Ш4 имеет три присоединения (П41, П42, П43) и выключатель В7 с линией Л7, питающей потребителя, надежность электроснабжения которого мы рассматриваем.

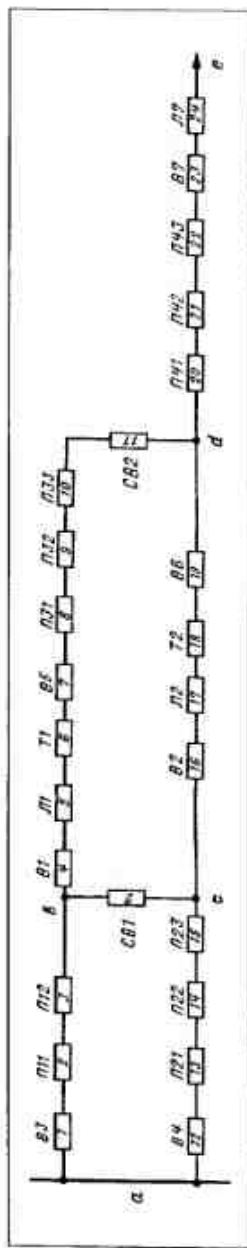


Рис. 4.12. Логическая схема надежности при двух источниках питания

Логическая схема надежности потребителей, питающихся от линии Л7, для электрической схемы рис. 4.11 представлена на рис. 4.12. После преобразований последовательных цепей получаем схему рис. 4.13, которая включает в себя “мостик” — элемент 25 — секционный выключатель на шинах ИП. Всего ветвей в этой схеме шесть, а узлов — пять. Однако собственно мостиковая схема содержит пять ветвей и четыре узла.

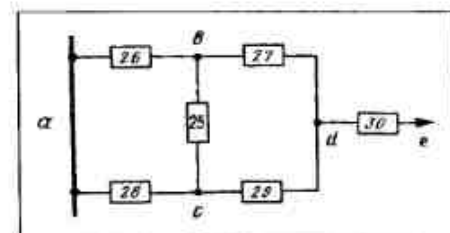


Рис. 4.13. Схема надежности “мостик”

Определение показателей надежности для такой схемы возможно при использовании следующих методов: метод перебора возможных состояний схемы с анализом параметров режимов в каждом состоянии; метод использования формулы полной вероятности и основанный на ней метод разложения на множители.

Метод перебора возможных состояний схемы. В общем случае, если сложная схема состоит из m ветвей и n узлов, то она может иметь 2^m состояний, если не учитывать преднамеренные отключения и отказы узлов, и до 3^m состояний, если учитывать преднамеренные отключения элементов.

Все возможные состояния (без учета преднамеренных отключений) можно получить разложением выражения

$$\prod_{i=1}^{i=m} (p_i + q_i).$$

Этот метод определения показателей надежности весьма громоздкий даже для схем с небольшим числом ветвей и узлов. Так, например, для схемы типа “мостик” с пятью ветвями и четырьмя узлами число всех возможных состояний без учета преднамеренных отключений равно $2^5 = 32$, поэтому расчет при использовании метода перебора состояний даже такой относительно простой схемы очень трудоемкий.

В практических расчетах рассматривают не все состояния элементов, а только те, в которых отключаются не более двух-трех элементов, так как вероятности состояний с большим числом отключенных элементов малы, и ими можно пренебречь, не внося заметной

ошибки в расчеты. Этот прием резко уменьшает число расчетных состояний схемы.

Определим вероятность состояния отказа схемы (см. рис. 4.13) относительно узла d , используя метод перебора всех возможных состояний. Ограничения на пропускные способности элементов не накладываются. Средние вероятности отказов элементов могут изменяться в диапазоне $10^{-2} - 10^{-4}$.

Все возможные состояния схемы получаем разложением формулы:

$$(p_{26} + q_{26})(p_{27} + q_{27})(p_{28} + q_{28})(p_{29} + q_{29})(p_{25} + q_{25}).$$

Анализируя все 32 состояния схемы, отмечаем, что только 16 из них отвечают рабочему состоянию системы. Наиболее значительная вероятность надежной работы обеспечивается при безотказном состоянии всех элементов. При отказе одного из элементов рабочее состояние системы обеспечивается, но при гораздо меньшем значении вероятности. Вероятность отказа системы наиболее значимо характеризуется состояниями с отказами двух элементов одновременно: 26 и 28 или 27 и 29. В этом случае вероятность отказа системы относительно узла d равна

$$q_c = q_{26} q_{28} p_{27} p_{29} p_{25} + q_{27} q_{29} p_{26} p_{28} p_{25}.$$

Метод с использованием формулы полной вероятности. Метод перебора всех возможных состояний становится громоздким даже при незначительном увеличении числа элементов. Поэтому для определения вероятностей надежной работы или отказа таких схем целесообразно использовать формулу полной вероятности. Для определения вероятности надежной работы она интерпретируется следующим образом. Вероятность события работы системы относительно узла вычисляются как сумму произведений вероятностей несовместимых гипотез (либо работа, либо отказ любого элемента) на вероятность события работы оставшейся части схемы при этой гипотезе. Иными словами, надежность работы схемы равна сумме произведения вероятности безотказной работы i -го элемента схемы на вероятность безотказной работы оставшейся схемы (места подключения i -го элемента замкнуты) и произведения вероятности отказа того же i -го элемента схемы на вероятность безотказной работы оставшейся схемы (места подключения i -го элемента разомкнуты).

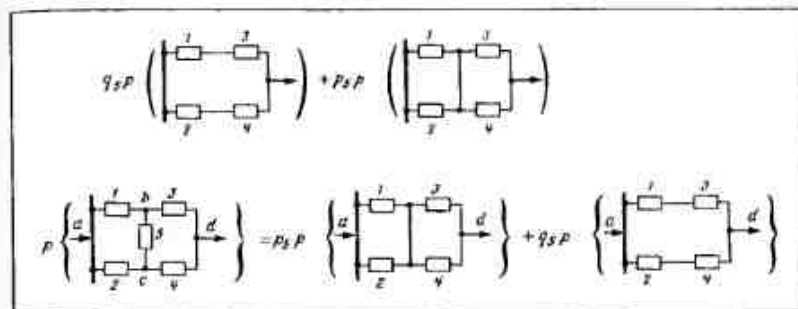


Рис. 4.14. Преобразование схемы надежности "мостик"

Покажем на примере мостиковой схемы применение формулы полной вероятности к определению показателей надежности сложных схем. Отказы узлов не учитываются. Относительно любого элемента схемы (рис. 4.14) можно рассматривать две несовместимые гипотезы: работа элемента с вероятностью p и отказ его с вероятностью q . В качестве такого элемента в схеме на рис. 4.14 выбираем элемент 5. Тогда, применяя формулу полной вероятности, нетрудно свести ее к сумме двух схем: последовательно-параллельной и параллельно-последовательной, определение показателей надежности которых хорошо разработаны. Вероятность безотказной работы схемы на рис. 4.14 относительно узла d

$$p_c = p_5 [(1 - q_1 q_2)(1 - q_3 q_4)] + q_5 [1 - (1 - p_1 p_2)(1 - p_3 p_4)].$$

В этом выражении $(1 - q_1 q_2)(1 - q_3 q_4)$ — вероятность безотказной работы схемы при первой гипотезе: безотказной работе элемента 5; $[1 - (1 - p_1 p_2)(1 - p_3 p_4)]$ — вероятность безотказной работы схемы при второй гипотезе: отказе элемента 5; p_5 — вероятность первой гипотезы; q_5 — вероятность второй гипотезы.

4.6. РАСЧЕТЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ниже приведены примеры расчетов показателей надежности систем электроснабжения.

Пример 4.1. Схема передачи электроэнергии (рис. 4.15) потребителю состоит из следующих элементов: повышающего трансформатора $T1$, линии электропередачи L , понижающего трансформатора

Т2. Параметры потоков отказов элементов и средние времена восстановления приведены ниже:

Элемент	Т1	Л	Т2
λ_p , 1/год	0,015	0,04	0,005
$T_{в}$, ч	200	60	100

Определить параметр потока отказов системы, среднюю вероятность отказа, среднее время восстановления (преднамеренные отключения не учитывать).

Решение. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами равен сумме параметров потоков отказов отдельных элементов:

$$\lambda_c = \lambda_{T1} + \lambda_L + \lambda_{T2} = 0,015 + 0,04 + 0,005 = 0,06 \text{ 1/год.}$$

Средняя вероятность отказа равна сумме вероятностей отказов элементов:

$$q_c = q_{T1} + q_{T2} + q_L = \lambda_{T1} \bar{T}_{в,T1} + \lambda_{T2} \bar{T}_{в,T2} + \lambda_L \bar{T}_{в,L} = \\ = (0,015 \cdot 200 + 0,04 \cdot 60 + 0,005 \cdot 100) \frac{1}{8760} = 6,74 \cdot 10^{-4}.$$

Среднее время восстановления:

$$\bar{T}_{в,c} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{6,74 \cdot 10^{-4}}{0,06} = 0,011 \text{ год}$$

или $\bar{T}_{в,c} = 96,4$ ч.

Пример 4.2. Потребитель (рис. 4.16) получает электроэнергию по двум независимым цепям линии электропередач Л1 и Л2, отказы которых независимы. Каждая линия может пропустить всю необходимую мощность потребителю. Параметры потоков отказов линий и средние времена восстановления приведены ниже:

Элемент	Л1	Л2
λ_p , 1/год	0,16	0,24
$T_{в}$, ч	60	60

Определить параметр потока отказов системы электроснабжения, среднюю вероятность отказа, среднее время восстановления (преднамеренные отключения не учитывать).

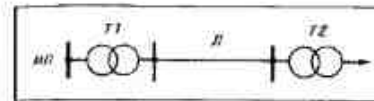


Рис. 4.15. Схема передачи электроэнергии к примеру 4.1

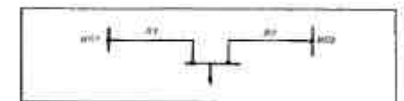


Рис. 4.16. Схема передачи электроэнергии к примеру 4.2

Решение. Параметр потока отказов для системы с двумя параллельно соединенными элементами:

$$\lambda_c = \lambda_{n1} q_{n2} + \lambda_{n2} q_{n1} = \\ = \lambda_{n1} \lambda_{n2} \bar{T}_{в,n2} + \lambda_{n2} \lambda_{n1} \bar{T}_{в,n1} = \lambda_{n1} \lambda_{n2} (\bar{T}_{в,n1} + \bar{T}_{в,n2}) = \\ = 0,16 \cdot 0,24 (60 + 60) \frac{1}{8760} = 5,26 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Средняя вероятность отказа равна произведению вероятностей отказов элементов:

$$q_c = q_{n1} q_{n2} = \lambda_{n1} \lambda_{n2} \bar{T}_{в,n1} \bar{T}_{в,n2} = \\ = 0,16 \cdot 0,24 \cdot 60 \cdot 60 \frac{1}{8760^2} = 1,8 \cdot 10^{-6}.$$

Среднее время восстановления:

$$\bar{T}_{в,c} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{\lambda_{n1} \lambda_{n2} \bar{T}_{в,n1} \bar{T}_{в,n2}}{\lambda_{n1} \lambda_{n2} (\bar{T}_{в,n1} + \bar{T}_{в,n2})} = \frac{60 \cdot 60}{60 + 60} = 30 \text{ ч.}$$

Пример 4.3. Схема передачи электроэнергии (рис. 4.17) потребителю состоит из следующих элементов: повышающего трансформатора Т1, линии электропередач Л, понижающего трансформатора Т2. От трансформатора Т1 получают питание потребители П1 – П5. Параметры

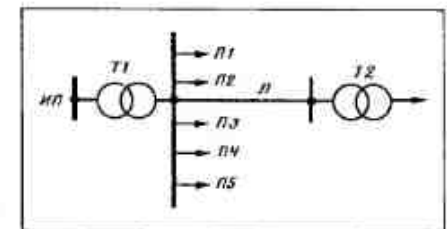


Рис. 4.17. Схема передачи электроэнергии к примеру 4.3

потоков отказов элементов и средние времена восстановления приведены ниже:

Элемент	$T1$	$T2$	L	$PI - P5$
λ_{ij} , 1/год	0,015	0,005	0,04	0,01
T_{ip} , ч.	200	100	60	2

Определить параметр потока отказов системы, среднюю вероятность отказа, среднее время восстановления (преднамеренные отключения не учитывать).

Решение. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами равен сумме параметров потоков отказов отдельных элементов:

$$\begin{aligned}\lambda_c &= \lambda_{T1} + \lambda_L + \lambda_{T2} + \sum \lambda_{PI} = \\ &= 0,015 + 0,04 + 0,005 + 5 \cdot 0,01 = 0,1 \text{ 1/год.}\end{aligned}$$

Средняя вероятность отказа равна сумме вероятностей отказов элементов:

$$\begin{aligned}q_c &= q_{T1} + q_{T2} + q_L = \lambda_{T1} \bar{T}_{в.т1} + \lambda_{T2} \bar{T}_{в.т2} + \lambda_L \bar{T}_{в.л} + \sum \lambda_{PI} \bar{T}_{в.п} = \\ &= (0,015 \cdot 200 + 0,04 \cdot 60 + 0,005 \cdot 100 + 5 \cdot 0,01 \cdot 2) \frac{1}{8760} = \\ &= 6,85 \cdot 10^{-4}.\end{aligned}$$

Среднее время восстановления:

$$\bar{T}_{в.с} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{6,85 \cdot 10^{-4}}{0,1} = 0,00685 \text{ год}$$

или $\bar{T}_{в.с} = 99,9$ ч.

ГЛАВА ПЯТАЯ

Повышение надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях эксплуатации

5.1. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Качество электроэнергии влияет не только на технологический процесс производства и производительность труда и механизмов, но и на потери электроэнергии, работу релейной защиты, автоматики и т.д. Поэтому качество электроэнергии является одним из основных требований, обеспечивающих нормальную работу систем электроснабжения.

В нормальном режиме работы системы электроснабжения показатели качества электроэнергии (ПКЭ) не должны выходить за пределы допустимых значений, которые приведены в ГОСТ 13109–98.

Этот ГОСТ указывает на необходимость установления на границе балансовой принадлежности системы электроснабжения требуемых значений ПКЭ, которые должны определяться по согласованию между договаривающимися сторонами. При подключении нового промышленного потребителя контроль ПКЭ проводят до и после его присоединения. Периодичность контроля ПКЭ осуществляется в зависимости от самого показателя и от потребителя. Длительность измерений ПКЭ должна быть не менее 1 сут. Контроль ПКЭ необходимо осуществлять также в характерных точках системы электроснабжения.

Наиболее значительное влияние на надежность работы приемников электроэнергии и технологических установок оказывают такие ПКЭ, как отклонения, несимметрия и несинусоидальность напряжения.

Основными факторами, вызывающими отклонения напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, являются следующие:

- изменение режимов работы приемников электроэнергии;
- изменение режима работы источника питания;
- нерациональное подключение однофазных и ударных нагрузок к элементам системы электроснабжения.

Изменение напряжения на зажимах приемника электроэнергии даже в пределах, установленных ГОСТ, вызывает изменение его технико-экономических показателей. Кроме того, отклонения напряжения влияют на показатели питающей сети за счет изменения потерь мощности и электроэнергии.

Существенное влияние оказывают отклонения напряжения на надежность работы асинхронных двигателей (АД), которые являются наиболее распространенным промышленным приемником электроэнергии. Приближенно можно считать, что вращающий момент АД пропорционален квадрату напряжения на его зажимах, т.е. $M_{вр} \approx U^2$. Поэтому при снижении напряжения уменьшается вращающий момент и несколько снижается частота вращения АД, так как увеличивается его скольжение. Снижение частоты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления M_c и от загрузки АД.

При малых нагрузках двигателя частота вращения ротора будет больше номинальной (при номинальной нагрузке двигателя). В таких случаях понижение напряжения не приводит к уменьшению производительности механизмов, так как не происходит снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной.

Для двигателей, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на зажимах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже $U_{ном}$. При значительном снижении напряжения на зажимах электродвигателя, работающего с полной нагрузкой, M_c механизма может превысить $M_{вр}$, что приведет к "опрокидыванию" двигателя, т.е. к его остановке. При правильном выборе мощности электродвигателя и элементов цеховой электрической сети явления "опрокидывания" двигателей, как правило, исключаются.

Практический интерес представляет зависимость потребляемой двигателем активной и реактивной мощности от напряжения на его зажимах. При отклонениях напряжения $\pm 10\%$ активная мощность на валу двигателя меняется незначительно. В то же время потери активной и реактивной мощностей в двигателе колеблются в значитель-

ных пределах. Изменения потерь активной мощности в АД соизмеримы с потерями в цеховой электрической сети и оказывают при этом заметное влияние на электропотребление.

Непостоянство активной и реактивной мощностей и напряжения вызывает изменение тока двигателя. При полной нагрузке двигателя и отклонении напряжения на $+10\%$ его ток незначительно отличается от $I_{ном}$. При отклонении же напряжения на -10% от $U_{ном}$ ток двигателя увеличивается на 10% . Поэтому с точки зрения нагрева более опасными являются отрицательные отклонения напряжения.

Отклонения напряжения влияют и на надежность работы других приемников электроэнергии. Так, для дуговых печей сопротивление установлено, что в зависимости от параметра регулирования уменьшение напряжения, подводимого к печному трансформатору, снижает активную мощность печи. Поэтому одним из условий повышения надежности и улучшения энергетического режима работы дуговых печей является регулирование напряжения под нагрузкой.

Опыт эксплуатации показал, что при отжиге заготовок в печах сопротивления при незначительном снижении напряжения технологический процесс удлиняется, а при снижении напряжения на 10% , процесс отжига производить невозможно. У машин точечной сварки при отклонениях напряжения $\pm 15\%$ получается 100% -ный брак продукции. На каждый процент понижения напряжения световой поток ламп накаливания уменьшается почти на 4% . Снижение светового потока ведет в конечном счете к снижению производительности труда.

Несимметрия напряжения неблагоприятно сказывается на работе и сроке службы, а, следовательно на надежности АД. Так, несимметрия напряжения в 1% вызывает значительную несимметрию токов в обмотках (до 9%). Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора, что приводит к ускоренному старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя. Известно, что при несимметрии напряжения в 4% срок службы АД, работающего с номинальной нагрузкой, сокращается примерно в 2 раза; при несимметрии напряжения в 5% располагаемая мощность АД уменьшается на $5-10\%$.

Магнитное поле токов обратной последовательности статора синхронных машин индуцирует в массивных металлических частях ротора значительные вихревые токи, вызывающие повышенный нагрев ротора и вибрацию вращающейся части машины. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной для машины.

Несимметрия напряжения не оказывает заметного влияния на работу кабельных и воздушных линий, однако у трансформаторов наблюдается значительное сокращение срока службы.

Токи нулевой последовательности постоянно проходят через заземлители и отрицательно сказываются на их работе, вызывая высушивание грунта и увеличение сопротивления растеканию.

Несинусоидальные режимы, обусловленные протеканием токов высших гармоник по элементам системы электроснабжения промышленного предприятия, вызывают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Наибольшие потери имеют место в трансформаторах, двигателях и генераторах.

При наличии высших гармоник в кривой напряжения более интенсивно протекает процесс старения изоляции. Так, например, при несинусоидальности в 5 % через 2 года эксплуатации в 2 раза увеличивается $\tan \delta$ конденсаторов. Ускоренное старение изоляции наблюдается и в силовых кабелях.

За счет высших гармоник тока довольно часто однофазные КЗ переходят в двухфазные в месте первого пробоя вследствие прожигания кабеля. Следовательно, высшие гармоники в кривой напряжения питающей сети приводят к сокращению срока службы силовых кабелей, повышению аварийности в кабельных сетях, увеличению числа необходимых ремонтов. Опыт эксплуатации показал, что при несинусоидальности 5 – 10 % суммарные амортизационные отчисления и стоимость текущих ремонтов кабелей возрастает на 15 – 20 %.

Если силовые кабели используются в качестве каналов связи между полуккомплектами диспетчерского и контролируемого пунктов, то высшие гармоники тока и напряжения ухудшают работу телемеханических устройств, вызывая сбои в их работе. Кроме того, высшие гармоники вызывают ложную работу устройств релейной защиты, в которой используются фильтры токов обратной последовательности, до 10 % увеличивают погрешность индукционных счетчиков электроэнергии.

Эксплуатация систем электроснабжения отечественных и зарубежных промышленных предприятий показала, что батареи конденсаторов, работающие при несинусоидальных режимах, часто выходят из строя в результате вспучивания или взрыва. Причиной разрушения конденсаторов является перегрузка их токами высших гармоник, обуславливающих возникновение в системе электроснабжения резонансного режима на частоте одной из гармоник.

5.2. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

К настоящему времени разработаны различные методы оценки надежности электрооборудования. Для практического применения этих методов необходимы статистические данные о работе отдельных видов электрооборудования. Эти данные должны содержать информацию, достаточную для анализа причин повреждений и отказов электрооборудования, а также для расчетов оценок надежности и выбора оптимального варианта системы электроснабжения.

Отказы в работе электрооборудования в зависимости от длительности перерыва и принесенного ущерба считаются авариями или браком в работе. Отказы в работе в период пуска, наладки и испытаний нового и реконструированного электрооборудования как авария или брак не регистрируются и учитываются особо. Их учет необходим, так как они характеризуют период приработки и освоения нового электрооборудования и несут важную для проектировщиков, эксплуатационников и изготовителей информацию.

Более полные сведения о надежности электрооборудования дает учет всех отказов, включая дефекты. Однако дефекты электрооборудования, обнаруженные при профилактическом обслуживании, не попадают в систему учета, в то время как их учет дает возможность получить информацию, необходимую для оптимизации систем профилактики и резервирования.

Для достоверной количественной оценки надежности требуется надлежащая организация сбора статистических данных о повреждаемости с развернутыми формами и актами, отражающими нарушения в работе данного электрооборудования. С помощью этих данных можно установить функциональную зависимость повреждаемости от внешних условий и режимов работы (нагрузки, температуры и прочих климатических условий, частоты операций, качества применяемых материалов и т.д.).

Для выбора рациональной системы электроснабжения необходимы следующие основные данные, характеризующие надежность работы электрооборудования:

периодичность повреждений, неисправностей и отказов в работе электрооборудования, периодичность отказов, ложных и неправильных действий устройств защиты и автоматики;

время ликвидации аварии данного вида электрооборудования, трудозатраты и стоимость аварийно-восстановительных работ;

периодичность проведения плановых ремонтно-эксплуатационных работ, связанных с выводом электрооборудования из работы, трудозатраты и стоимость эксплуатационно-ремонтных работ.

На основе собранного и обработанного статистического материала об электрооборудовании определяются экономически обоснованные показатели надежности. Последние являются исходными данными для решения задач повышения надежности систем электроснабжения.

Надежная работа системы электроснабжения зависит прежде всего от надежной работы электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики. Важно не только правильно выбрать указанное выше оборудование, но и надлежащим образом поддерживать его надежность в процессе эксплуатации, т.е. должны выполняться организационные меры по его хранению, ремонту и использованию; обеспечиваться технические нормы на профилактическое обслуживание с учетом характеристик износа и старения этого оборудования. Если оно обладает хорошей ремонтпригодностью и замена его изношенных деталей осуществляется проверенными и приработанными деталями, то в эксплуатации можно обеспечить высокую живучесть оборудования, рассчитанного на многократное использование.

В процессе эксплуатации существенное значение имеют субъективные факторы, т.е. степень квалификации обслуживающего персонала и уровень организации эксплуатации. Надежность, которая свойственна данному изделию, может быть и не реализована из-за этих факторов.

При выборе электрооборудования необходимо исходить из следующих основных положений: электрооборудование должно удовлетворять условиям длительной номинальной работы, режиму перегрузки (форсированный режим), режиму возможных КЗ (стойкость при сквозных КЗ) и перенапряжений и соответствовать условиям окружающей среды (открытая или закрытая установка, температура, задымленность, влажность и др.)

Одними из главных элементов в системе электроснабжения промышленных предприятий являются выключатели, от работы которых зависит надежное и безопасное функционирование как отдельных узлов, так и всей системы в целом. Поэтому высокая надежность определяет их главное достоинство, так как отказ выключателя ведет к расширению аварии и большим материальным поте-

рям. При выборе выключателей руководствуются следующими требованиями:

время отключения выключателя должно быть наименьшим, что позволяет уменьшить последствия аварийного режима, а также увеличить запас устойчивости параллельной работы подстанций и, следовательно, пропускную способность линий электропередачи;

габаритные размеры выключателя должны быть минимальными, что позволяет уменьшить размеры распределительных устройств (РУ), и, следовательно, удешевить установку;

коммутационный ресурс выключателя должен быть наибольшим, что позволяет упростить эксплуатацию и сократить расходы на ремонт.

Кроме того, при выборе выключателей необходимо учитывать влияние их на окружающую среду, пожаробезопасность, отсутствие выброса масла и др.

В настоящее время наиболее надежными выключателями считаются вакуумные, достоинствами которых считаются: небольшие габариты, простота конструкции, отсутствие сжатого воздуха или трансформаторного масла, взрывобезопасность, малое время отключения (0,05 – 0,075 с), высокая скорость восстановления прочности дугогасительного промежутка, бесшумность работы, отсутствие выброса в атмосферу, герметизация дугогасительного устройства, значительный коммутационный ресурс (50 000 – 100 000 при $I_{ном}$: 100 при отключении КЗ), отсутствие ударной нагрузки на фундамент, возможность применения в малогабаритных КРУ, пожаробезопасность, малые эксплуатационные расходы, большой срок службы (25 лет), широкий диапазон температуры окружающей среды (от –70 °С до +200 °С), повышенная устойчивость к ударным и вибрационным нагрузкам, удобство обслуживания и др.

Для правильной эксплуатации коммутационного электрооборудования необходимо учитывать их назначение, область применения и особенности работы. Так, например, разъединители, предназначенные для отключения и включения цепей без тока и для создания видимого разрыва цепи в воздухе, можно использовать при следующих отключениях:

намагничивающего тока силовых трансформаторов (не более 3,5 А при 6 кВ; не более 3 А при 10 кВ);

зарядного тока шин, оборудования, воздушных и кабельных линий (не более 2 А при 10 кВ; не более 2,5 А при 6 кВ);

тока замыкания на землю (не более 4 А при 6 кВ; не более 3 А при 10 кВ).

Между силовыми выключателем и разъединителем должны предусматриваться механическая и электромагнитная блокировки, не допускающие отключения разъединителя при включенном выключателе, когда в цепи протекает ток нагрузки.

Для менее ответственных потребителей с целью снижения стоимости РУ 6 – 10 кВ подстанции вместо силовых выключателей небольшой и средней мощности применяют выключатели нагрузки, способные отключать рабочие токи линий, трансформаторов и других приемников электроэнергии. Для отключения токов КЗ, превышающих допустимые значения для выключателей нагрузки, последние комплектуются кварцевыми предохранителями ПК. При эксплуатации такого комплекса (ВНП) необходимо учитывать, что при каждом отключении выключателя нагрузки происходит износ газогенерирующих дугогасящих вкладышей, ограничивающих число допустимых отключений КЗ.

Широкое применение в системах электроснабжения промышленных предприятий находят измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые являются основными источниками информации для устройств релейной защиты и автоматики. Точная работа ТТ и ТН обеспечивает надежное и быстрое отключение КЗ и своевременное сообщение об опасных перегрузках электрооборудования.

От исправности и точности работы ТТ зависят не только правильный повседневный учет электроэнергии, отпускаемой потребителям, но и бесперебойность их электроснабжения, сохранность самой электроустановки, особенно при КЗ.

В ПУЭ приведены требования к точности ТТ, которая в одинаковой степени важна и необходима как для традиционных электро-механических и статических аналоговых реле, так и для цифровых реле и терминалов релейной защиты, в особенности при использовании цифровых токовых защит с обратно зависимыми время-токовыми характеристиками. Это объясняется тем, что большинство устройств РЗ, в том числе и цифровые защиты, получают основную информацию от традиционных электромагнитных ТТ.

При сильном искажении формы вторичного тока ТТ может произойти отказ защиты из-за ненадежного замыкания контактов некоторых реле (ЭТ-520, ИМБ, РМБ, РТ-40).

Говоря о надежности устройств РЗА, различают аппаратную надежность и надежность функционирования. *Аппаратная надеж-*

Таблица 5.1. Средние оценки показателей надежности устройств РЗА

Тип устройства РЗА	Интенсивность срабатывавшей, 1/год			Интенсивность отказов в срабатывании, $\times 10^{-3}$ 1/год	Вероятность отказа при одном срабатывании, $\times 10^{-3}$
	требуемых	ложных, $\times 10^{-3}$	неселективных, $\times 10^{-3}$		
ДФЗ-2	1,3	10	19	3,2	2,4
ПЗ-162, ПЗ-164, ПЗ-164А	1,0	3,9	18	7,9	7,8
ПЗ-158, ПВБ-158	0,77	6,8	27	4,5	5,9
ПЗ-157, ПЗ-158, ПЗ-159	0,7	7,7	7,3	4,0	5,7
ПЗ-151, ПЗ-152, ПЗ-153	0,30	0,74	1,8	2,4	8,0
ДЗШ	0,16	4,2	11	4,7	29
УРОВ	0,044	2,8	2,8	2,8	63
ДЗТ	0,032	1,4	5,6	0,7	22
Газовая	0,014	4,4	0,93	0,042	3,0
МТЗ	—	1,4	2,6	—	0,6
АПВ	1,3	—	—	9,5	7,2
АВР	0,11	7,0	—	12	117
АЧР	0,18	1,7	2,5	0,28	1,6

ность — надежность устройства, не зависящая от характеристик объекта, на котором установлено данное устройство; *надежность функционирования* связана с выполнением функций, которые возложены на данное устройство, и зависит от свойств защищаемого или автоматизируемого объекта. В отличие от элементов систем электроснабжения, отказы которых приводят к выводу их из работы, последствием отказа устройств РЗА может быть либо излишнее действие, либо несрабатывание, когда оно необходимо. Излишнее действие может быть как в момент отказа устройства — ложное срабатывание, так и при возмущении в системе, на которое устройство не должно реагировать — неселективное срабатывание.

Надежность подстанций как элемента системы электроснабжения зависит от быстроты и безотказности действия устройств РЗА линий и трансформаторов.

В табл. 5.1 приведены средние оценки показателей надежности основных видов устройств РЗА.

Во время работы системы электроснабжения возникают кратковременные переходные процессы, вызванные изменениями перетоков мощности, аварийными режимами, действиями средств противоаварийной автоматики. Эти процессы могут отразиться на режи-

ме работы потребителей электроэнергии, особенно промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения показал, что значительная часть автоматических отключений линий электропередачи вызывается неустойчивыми самоустраняющимися повреждениями. Устройство АПВ позволяет в большинстве отключений восстановить нормальную схему электроснабжения. Также успешно может быть использовано АПВ, если отключение линии произошло из-за ложной или неселективной работы РЗ.

Неустойчивые повреждения могут возникать также на выводах трансформаторов, шинах подстанций, шинных сборках и др.

Применение устройств АПВ питающих кабельных линий 6 – 10 кВ в системах электроснабжения промышленных предприятий не всегда целесообразно, так как повреждения в этих случаях, как правило, являются устойчивыми. Действия АПВ при устойчивом КЗ на кабельных линиях могут вызвать развитие аварии и еще большие повреждения.

Успешное действие АПВ имеет место на воздушных линиях электропередачи; в этих случаях электроснабжение можно восстановить за время, менее 1 с, что позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей.

Другим эффективным средством повышения надежности электроснабжения является восстановление питания потребителей с помощью АВР источников взамен поврежденных или ошибочно отключенных источников питания.

На предприятиях разных отраслей промышленности широко используются СД мощностью до 5000 кВт (например для привода насосов, компрессоров); на их долю иногда приходится до 75 % всей потребляемой предприятием электроэнергии. Кратковременное (0,15 – 0,2 с) снижение напряжения до $0,6U_{ном}$ приводит к выпадению из синхронизма этих двигателей, остановке компрессоров и расстройству технологического процесса. Успешное действие АПВ и АВР в этих схемах не обеспечит бесперебойность работы. С целью повышения надежности системы электроснабжения с синхронной нагрузкой применяются быстродействующие АВР (БАВР), сведения об одном из них приведены в § 5.3.

Основными приемниками электроэнергии на промышленных предприятиях являются АД, которые в силу специфики своей работы отрицательно влияют на значение коэффициента реактивной мощности $\lg \phi$. Для повышения последнего применяют различные

способы компенсации реактивной мощности, в том числе и с помощью батарей конденсаторов. Опыт эксплуатации показал, что целесообразнее заменять, где это возможно, АД на СД, так как СД в режиме перевозбуждения может работать источником реактивной мощности и приводным двигателем одновременно. При этом повышается надежность систем электроснабжения, так как вместо АД с батареей конденсаторов (БК) будет работать только СД. Кроме того, БК имеют недостатки, понижающие надежность системы электроснабжения, а именно:

генерируемая или реактивная мощность существенно зависит от напряжения;

могут выходить из строя при наличии в сети высших гармоник; имеют недостаточную прочность, особенно при КЗ и перенапряжениях.

5.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Не следует беспредельно добиваться повышения надежности систем электроснабжения. Так, например, усложнение системы за счет введения многократного резервирования приводит лишь к относительно небольшому снижению времени аварийного простоя, причем незначительный рост надежности обычно связан с весьма существенными затратами. Следовательно, не всегда более дорогостоящая система электроснабжения обладает более высокой надежностью.

Основные пути повышения надежности можно свести к следующему.

1. Рациональное резервирование:

в цеховых сетях по высокому (ВН) или низкому (НН) напряжению в трансформаторных подстанциях (ТП);

за счет отдельной или параллельной работы линий, трансформаторов в зависимости от условий и требований;

за счет выбора числа независимых источников питания с учетом категории потребителей.

На рис. 5.1 приведен фрагмент схемы электроснабжения с резервированием по ВН и НН (наличие резервной перемычки, отдельное питание секций шин). На рис. 5.2 приведены схемы радиального питания с резервированием. На рис. 5.3 приведена двойная магистральная схема с односторонним питанием при отсутствии сборных шин на цеховых ТП. В случае аварии на одной из магистра-

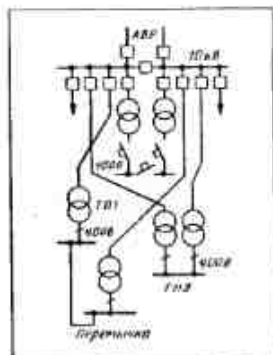


Рис. 5.1. Фрагмент схемы электроснабжения с резервированием по ВН и НН

лей цеховые ТП переключаются на магистраль, оставшуюся в работе. При необходимости это может быть сделано с помощью АВР на секционном автоматическом выключателе (резервирование по НН).

2. *Использование перегрузочной способности элементов системы электроснабжения*, что обеспечивает надежное питание потребителей при эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Режимы перегрузки особенно важны при повреждениях или отключениях линий, трансформаторов, секций шин, отдельных аппаратов.

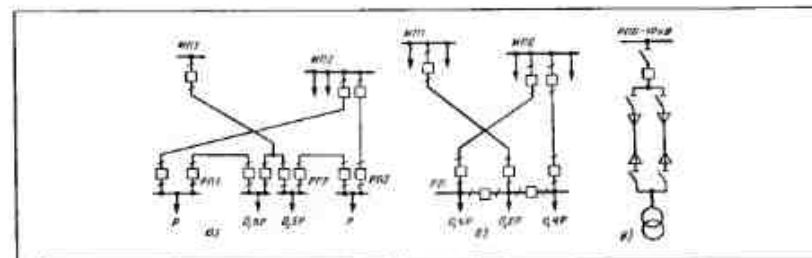


Рис. 5.2. Схема радиального питания:

а — группы РП с резервированием от второго источника; б — одного РП от двух источников; в — обособленной однострансформаторной подстанции по одной линии (по двухкабельной линии)

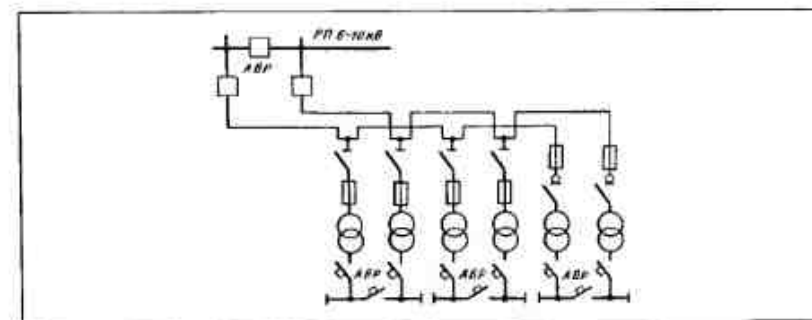


Рис. 5.3. Двойная магистральная схема с односторонним питанием при отсутствии сборных шин на цеховых ТП

Исследования, проведенные различными организациями, по допустимой перегрузке электрооборудования показали следующее:

а) кратковременная (до 2 — 2,5 ч) перегрузочная способность выключателей ВН может быть принята равной 125 % номинальной;

б) для выключателей нагрузки (ВНП) допустимы такие же перегрузки, как для силовых масляных и сухих трансформаторов;

в) для проходных изоляторов, работающих в диапазоне температур от -50 до $+60$ °С, допустимая перегрузка составляет $(0,85 - 1,73)I_{ном}$;

г) перегрузка воздушных линий возможна практически всегда при сохранении нормального габарита до земли и составляет 30 — 35 %;

д) допустимая перегрузка кабельных линий напряжением до 10 кВ зависит от значения и длительности максимума нагрузки линии в нормальном режиме и от способа их прокладки (табл. 5.2).

3. *Совершенствование технического обслуживания*: оптимизация периодичности и глубины капитальных ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов.

4. *Повышение качества ремонта оборудования*, что увеличивает межремонтные сроки, снижает затраты труда и материальных средств. Такой ремонт должен производиться квалифицированным персоналом, хорошо знающим конструкцию оборудования, современную технологию ремонта, а также обладающим высокой профессиональной подготовкой и практическими навыками.

Допустимую перегрузку кабельных линий, находящихся в эксплуатации более 15 лет, принимают на 10 % ниже, чем указано в табл. 5.2.

5. *Применение, правильный выбор и компоновка современного оборудования*. Выбранное оборудование должно быть устойчиво к действию токов КЗ. Что касается компоновки, то при особенно высоких требованиях к надежности электроснабжения, секции РУ располагают в разных помещениях.

6. *Внедрение автоматизации и телемеханизации*, что позволяет повысить еще и безопасность обслуживания, эффективность управления объектами электроснабжения и избежать ошибочных действий персонала.

При наличии СД целесообразно в качестве пускового органа устройств АВР применять реле минимального напряжения совместно с реле минимальной частоты или устройство БАВР, выпускаемое, например, Истринским ВНИЦ ВЭИ. У этих устройств БАВР

Таблица 5. 2. Допустимая перегрузка кабельных линий

Коэффициент нагрузки в нормальном режиме	Вид прокладки	Коэффициент допустимой перегрузки в зависимости от напряжения и длительности максимума, ч					
		до 10 кВ			20 – 35 кВ		
		1	2	6	1,5	2	3
0,6	В земле	1,5	1,35	1,25	1,35	1,3	1,15
	В воздухе	1,35	1,25	1,25	1,25	1,15	1,1
	В трубах в земле	1,3	1,2	1,15	1,2	1,1	1,0
0,8	В земле	1,35	1,25	1,2	1,2	1,15	1,1
	В воздухе	1,3	1,25	1,25	1,2	1,15	1,1
	В трубах в земле	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1

суммарное время переключения аварийной секции на резервную не превышает 0,12 с при всех видах нарушения электроснабжения на подстанциях с СД напряжением 6 – 10 кВ. Такое быстродействие достигнуто за счет применения быстродействующих вакуумных выключателей с электродинамическим устройством управления приводом и быстродействующего пускового органа (ПО).

Пусковой орган устройства БАВР представляет собой многоэлементное устройство релейной защиты и противоаварийной автоматики и может обеспечить двухстороннее действие на отключение выключателей двух вводов и на включение секционного выключателя резервного питания. Логика ПО устройства БАВР обеспечивает адантируемое БАВР: в зависимости от вида аварии обеспечивается или опережающее БАВР (при потерях питания, вызываемых неоперативными отключениями питающих вводов), или одновременное БАВР, или БАВР с контролем от вспомогательных контактов отключаемого вводного выключателя (при потерях питания, вызванных КЗ в питающей линии). На рис. 5.4 приведены алгоритмы работы ПО устройства БАВР.

7. Повышение надежности релейной защиты и автоматики за счет применения микропроцессорной элементной базы, правильной эксплуатации и технического обслуживания.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий показал, что возможности повышения надежности функционирования находящихся в эксплуатации аналоговых устройств РЗА исчерпаны. Применение микропроцессорных устройств и систем РЗА открывает широкие возможности качественного повышения надежности их функционирования.

Опыт эксплуатации микропроцессорных устройств РЗА за рубежом показал, что эти устройства имеют равные или лучшие показатели надежности и значительно меньшие трудозатраты на техобслуживание по сравнению с традиционными системами.

При применении микропроцессорных устройств РЗА в системах электроснабжения наравне с релейно-контактными устройствами особое внимание необходимо обращать на готовность этой системы по обеспечению электромагнитной совместимости.

На рис. 5.5 показана простая схема защиты параллельных линий одностороннего питания на традиционной элементной базе, которую целесообразно использовать вместо сложной и дорогой дифференциальной защиты. Схема позволяет отключать любую из двух параллельных линий в зависимости от места КЗ.

При эксплуатации газовой защиты трансформаторов возможна ее ложная работа, которая может иметь место при попадании воздуха в бак трансформатора (например, при доливке масла, после ремонта системы охлаждения).

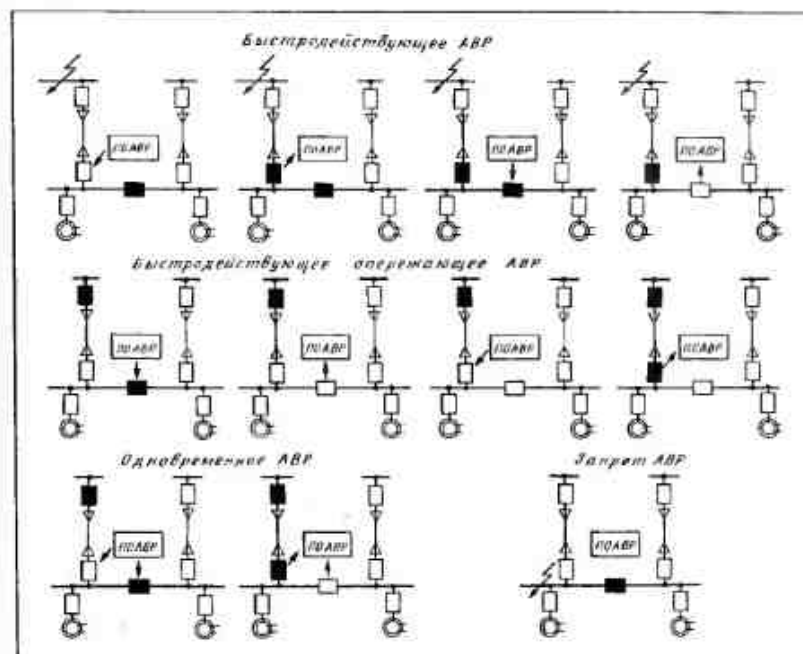


Рис. 5.4. Алгоритмы работы ПО БАВР

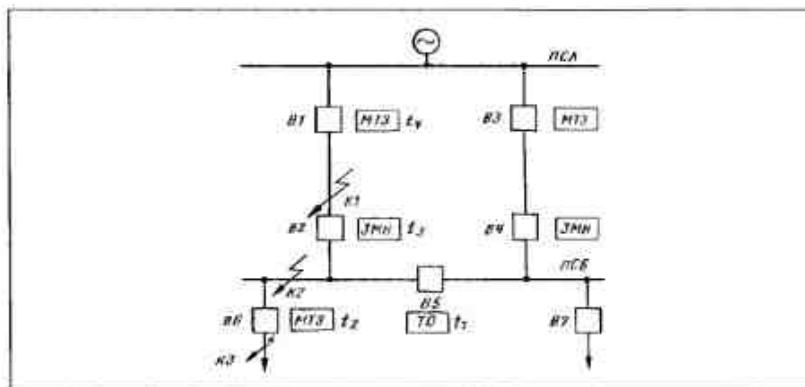


Рис. 5.5. Защита параллельных линий одностороннего питания в системах промышленного электроснабжения:

MTЗ — максимальная токовая защита; ЗМН — защита минимального напряжения; ТО — токовая отсечка без выдержки времени; $t_1 = 0$; $t_2 = 0,5$ с; $t_3 = 1,0$ с; $t_4 = 1,5$ с; в исходном положении В5 включен

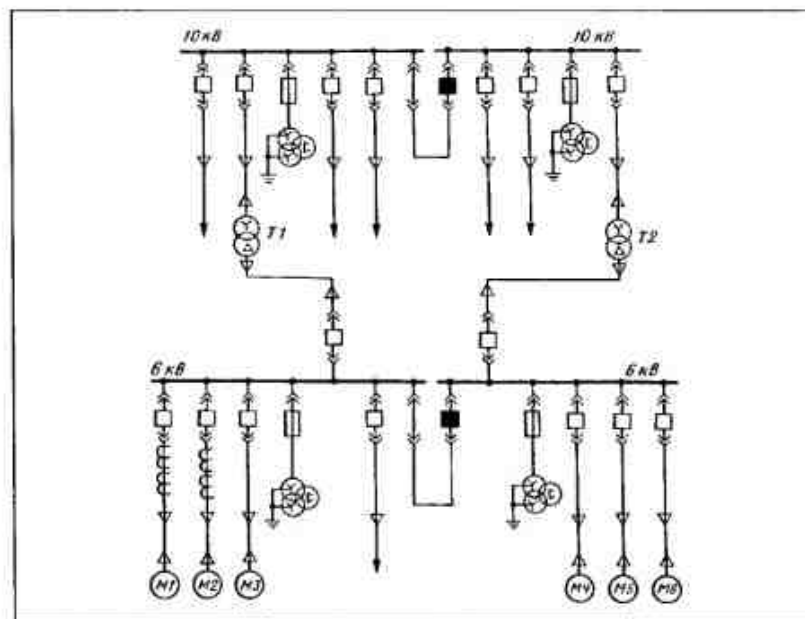


Рис. 5.6. Фрагмент принципиальной схемы электроснабжения насосной станции: T1, T2 — трансформаторы 10/6 кВ; M1 — M6 — синхронные двигатели на 6 кВ

Во избежание ложного срабатывания земляной защиты (максимальной токовой защиты нулевой последовательности) необходимо воронку, броню и оболочку кабеля на участке от воронки до ТТ нулевой последовательности (ТНП) изолировать от земли, а заземляющий провод присоединить к воронке кабеля и пропустить через отверстие магнитопровода ТНП в направлении кабеля.

При применении интегральной и цифровой защит необходимо строго выполнять указания по ее эксплуатации. Так, например, если не применять специальных мер (экранирование и пр.), то возникающие по разным причинам помехи могут вызвать ложное срабатывание защиты.

8. Выбор наиболее целесообразного времени вывода оборудования в ремонт, а именно совмещение ППР электрооборудования с ППР технологического оборудования, заблаговременный перевод электроснабжения на временное питание от резервных источников и др. Например, плановый ремонт одного из двух трансформаторов двухтрансформаторной ТП целесообразнее проводить в период работы со сниженной нагрузкой потребителя.

9. Уменьшение числа трансформаций, где это возможно, и в первую очередь трансформаций 10/6 кВ, что повышает также экономичность системы электроснабжения за счет уменьшения потерь электроэнергии.

На рис. 5.6 приведен фрагмент схемы электроснабжения насосной станции, где имеет место трансформация 10/6 кВ, которую в принципе можно было бы сократить, заменив СД 6 кВ на СД 10 кВ.

10. Применение самозапуска ответственных двигателей (АД и СД).

Самозапуск необходим для обеспечения устойчивости технологических процессов непрерывных производств при КЗ, отключении выключателя в цепи питания узла нагрузки и т.д. Самозапуск возникает после кратковременного перерыва и автоматического восстановления электроснабжения. Двигатели, участвующие в самозапуске, при кратковременных перерывах электроснабжения от сети не отключаются.

11. Обеспечение пожарной безопасности электротехнических сооружений (подстанций, кабельных туннелей и др.), внедрение устройств телесигнализации и локализации пожаров.

12. Использование гарантированных источников питания (дизель-генераторов, аккумуляторных батарей и т.п.).

13. Внедрение ремонтов под напряжением.

14. *Снижение насыщения сетей автоматической коммутационной аппаратуры*, так как сами аппараты могут быть источником аварий.

15. *Компенсация реактивной мощности (КРМ)*. За счет КРМ по НН можно разгрузить цеховой трансформатор ТП и при росте нагрузки загрузить его дополнительно активной мощностью.

Пример 5.1. Полностью загруженный цеховой трансформатор имеет мощность $S_{\text{т.ном}} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, причем $P_{\text{т}} = 1000 \text{ кВт}$, $Q_{\text{т}} = 1250 \text{ квар}$ ($S_{\text{т}} = \sqrt{P_{\text{т}}^2 + Q_{\text{т}}^2} = \sqrt{1000^2 + 1250^2} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$). После установки батареи конденсаторов, реактивная мощность трансформатора снизилась до 500 квар, т.е. $Q_{\text{кв}} = 1250 - 500 = 750 \text{ квар}$. Полная нагрузка трансформатора составила $S'_{\text{т}} = \sqrt{P_{\text{т}}^2 + (Q_{\text{т}} - Q_{\text{кв}})^2} = \sqrt{1000^2 + (1250 - 750)^2} = 1120 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, т.е. коэффициент загрузки трансформатора снизился с 1 до 0,7 ($k_{\text{т}} = S'_{\text{т}} / S_{\text{т.ном}} = 1120 / 1600 = 0,7$). Эксплуатация трансформатора с $k_{\text{т}} = 0,7$ соответствует более экономичному режиму его работы, так как потери активной мощности в нем меньше, чем с $k_{\text{т}} = 1,0$. При росте нагрузки этот трансформатор можно дополнительно нагрузить активной мощностью, равной

$$P_{\text{доп}} = \sqrt{S_{\text{т.ном}}^2 - (Q'_{\text{т}})^2} - P_{\text{т}} = \sqrt{1600^2 + 500^2} - 1000 = 520 \text{ кВт}.$$

Если бы КРМ не было, то для присоединения такой мощности потребовался еще один трансформатор мощностью 630 кВ · А.

16. *Повышение статической и динамической устойчивости системы электроснабжения*. Наиболее приемлемым средством достижения этой цели является уменьшение времени действия устройств РЗА.

17. *Повышение качества электроэнергии*. Снижения несимметрии напряжений можно достичь, как показывает опыт эксплуатации систем электроснабжения, в основном двумя путями:

рациональным пофазным распределением однофазных нагрузок;

применением симметрирующих устройств.

Для снижения несинусоидальности напряжений (уменьшения высших гармоник) применяют следующие средства:

раздельное питание приемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и обычных общепромышленных приемников, которое осуществляют от разных секций шин подстанций;

увеличение числа фаз выпрямления; так, при переходе от 6-фазной схемы к 12-фазной схеме выпрямления несинусоидальность напряжений сети уменьшается примерно в 1,4 раза;

фильтры высших гармоник, которые одновременно являются и источниками реактивной мощности, т.е. могут использоваться для КРМ.

18. *Совершенствование конструкций и материалов*, из которых изготавливают электрооборудование для систем электроснабжения.

19. *Повышение качества и уровня эксплуатации электрооборудования* (правильное применение смазочных материалов, своевременная чистка светильников, правильная замена изношенных деталей и др.).

Список литературы

1. **Кудрин Б. И.** Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат. 1995.
2. **Фокин Ю. А.** Надежность и эффективность сетей электрических систем. — М.: Высш.шк. 1989.
3. **Фокин Ю. А., Туфанов В. А.** Оценка надежности систем электроснабжения. — М.: Энергоиздат. 1981.
4. **Гук Ю. Б., Лосев Э. А., Мясников А. В.** Оценка надежности электроустановок. — М.: Энергия. 1974.
5. **Розанов М. Н.** Надежность энергетических систем. — М.: Энергия. 1974.
6. **Михайлов В. В.** Надежность электроэнергетических систем. — М.: Энергия. 1974.
7. **Гук Ю. Б., Казак Н. А., Мясников А. В.** Теория и расчет надежности систем электроснабжения. — М.: Энергия. 1970.
8. **Дудин В. А.** Методы исследования надежности низковольтных аппаратов. — М.: Энергия. 1970.
9. **Ермилов А. А.** Основы электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергоатомиздат. 1983.

Содержание

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Краткие сведения о системах электроснабжения промышленных предприятий	4
1.1. Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения	4
1.2. Основные проблемы в электроснабжении промышленных предприятий	9
ГЛАВА ВТОРАЯ. Возможные нарушения нормального режима электроснабжения промышленных предприятий	14
2.1. Общие понятия	14
2.2. Нарушения нормального режима электроснабжения	17
2.3. Отказы электрооборудования в системах электроснабжения	21
2.4. Причины повреждений основного оборудования систем электроснабжения	30
2.5. Минимально допустимое время перерывов электроснабжения	32
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Статистические показатели надежности электрооборудования в системах электроснабжения промышленных предприятий	36
3.1. Основные понятия	36
3.2. Показатели надежности элементов и их краткая характеристика	38
3.3. Эксплуатационные показатели надежности и плановых ремонтов электрооборудования	44
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Простейшие модели надежности групп элементов	54
4.1. Модели надежности без учета восстановления	54
4.2. Последовательное соединение нескольких элементов	56
4.3. Параллельное соединение нескольких элементов	58
4.4. Учет плановых ремонтов при оценке надежности	59
4.5. Составление логических схем надежности по схемам электрических соединений	60
4.6. Расчеты показателей надежности систем электроснабжения	67
ГЛАВА ПЯТАЯ. Повышение надежности систем электроснабжения промышленных предприятий при эксплуатации	71
5.1. Влияние качества электроэнергии на надежность систем электроснабжения	71
5.2. Повышение надежности работы электрооборудования	75
5.3. Практические рекомендации по повышению надежности систем электроснабжения	81
Список литературы	90

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

**КОНОХОВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА
КИРЕЕВА ЭЛЬВИРА АЛЕКСАНДРОВНА**

Надежность электроснабжения промышленных предприятий

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23
Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Корректор З. Б. Драновская

Сдано в набор 29.10.2001 г. Подписано в печать 10.12.2001 г.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 5,75. Тираж 1100 экз. Заказ БЭТ/12(36)-2001

Макет выполнен издательством "Фоллиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фоллиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Вниманию специалистов

В редакции журнала "Энергетик" можно приобрести следующие вышедшие в свет выпуски

"Библиотечки электротехника":

Алексеев Б. А., Борозинец Б. В. **Определение местных перегревов в турбогенераторах по продуктам пиролиза в охлаждающем газе.**

Бажанов С. А. **Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств.**

Удрис А. П. **Панель релейной защиты типа ЭПЗ-1636 для ВЛ 110 – 220 кВ (часть 1 — устройство защиты, часть 2 — обслуживание защиты).**

Торопцев Н. Д. **Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.**

Курбангалиев У. К. **Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.**

Овчинников В. В. **Автоматическое повторное включение.**

Шабад М. А. **Защита генераторов малой и средней мощности.**

Иноземцев Е. К. **Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (части 1 и 2).**

Шкарин Ю. П. **Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи (части 1 и 2).**

Овчаренко Н. И. **Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики.**

Безчастнов Г. А. и др. **Контроль состояния изоляции электрических машин в эксплуатации.**

**Адрес редакции
журнала "Энергетик":**

109280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06

E-mail: pni@mail.magelan.ru

Об авторах



Елена Александровна Конюхова — доктор технических наук, профессор Московского энергетического института (технического университета), крупный специалист в области электроснабжения промышленных предприятий.

В течение 35 лет Е. А. Конюхова успешно сочетает научную деятельность с педагогической работой. Написанные ею учебные и методические пособия пользуются неизменной популярностью не только среди студентов и преподавателей, но и у специалистов-электриков промышленных предприятий.



Эльвира Александровна Киреева — кандидат технических наук, опытный специалист по электроснабжению промышленных предприятий, отличник энергетики и электрификации.

Доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Московского энергетического института; автор книг "Автоматизация управления промышленным энергоснабжением" (1990 г.), "Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения" (1998 г.) и еще более 50 печатных работ.

Главная проблема в системах электроснабжения — обеспечение оптимальной надежности этих систем, при которой приведенные ежегодные затраты, включая ущерб от перерывов электропитания, минимальны.