

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ



В.Я. Хорольский  
М.А. Таранов

# Надежность электроснабжения

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



В.Я. Хорольский,  
М.А. Таранов

# НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Допущено  
Министерством сельского хозяйства  
Российской Федерации в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений по специальности  
140211 «Электроснабжение»*

Ростов-на-Дону  
«Терра Принт»  
2007

УДК 621.311.019.3

ББК 40.76я 73

X81

#### Рецензенты

д-р техн. наук Ю.Г. Кононов (зав. кафедрой автоматизированных электро-энергетических систем и электроснабжения Северо-Кавказского государственного технического университета);

д-р техн. наук, проф. Оськин С.В. (заведующий кафедрой электрических машин и электропривода Кубанского государственного аграрного университета)

**Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. – Ростов-на Дону «Терра Принт», 2007. – 128 с.**

ISBN

Изложены теоретические основы надежности систем электроснабжения. Приводятся показатели надежности, рассматриваются модели отказов, методы расчета надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем. Дается оценка влияния перерывов электроснабжения на ущерб, наносимый потребителям, рассмотрены рекомендации по обеспечению требуемого уровня надежности при проектировании и в процессе эксплуатации.

**ISBN**

**ББК 40.76я 73**

© В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, 2007

© Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия

## Предисловие

Обоснование необходимого уровня надежности систем электроснабжения имеет большое народнохозяйственное значение, поскольку перерывы в подаче электроэнергии могут привести к значительному материальному ущербу потребителей и другим негативным явлениям.

В настоящее время при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей методы оценки показателей надежности не нашли должного распространения, что приводит в ряде случаев к принятию неоптимальных решений.

Проблема надежности технических систем была сформулирована в начале 50-х годов применительно к радиоэлектронным устройствам и системам автоматики. Однако системы электроснабжения имеют специфические особенности построения и функционирования. Работу системы электроснабжения можно представить как непрерывный обмен энергией между системой и потребителями при невозможности ее складирования и непреднамеренных мешающих воздействиях на систему, приводящих к отказу элементов, а в некоторых случаях и системы в целом.

Взаимодействия между системой электроснабжения и внешней средой носят стохастический характер, и говорить о бесперебойной подаче электроэнергии можно только с некоторой вероятностью достижения поставленной цели.

В данном учебном пособии с единых методических позиций излагаются основы теории надежности применительно к системам электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей, влияние внешних факторов на работу электроустановок, методические рекомендации по оценке ущерба от перерывов электроснабжения, а также возможные пути повышения надежности при проектировании и эксплуатации.

Цель учебного пособия – помочь студентам в изучении накопленного опыта использования современных методов для оценки надежности.

# **1 Общие сведения о теории надежности систем электроснабжения**

## **1.1 Терминология, применяемая в теории надежности**

Для нормального функционирования систем электроснабжения необходимо обеспечить надлежащее качество изготовления, монтажа и эксплуатации установленных в них электротехнических устройств.

Качество электротехнических устройств – это совокупность свойств, характеризующих их пригодность для эксплуатации. Для оценки качества используются технико-экономические показатели. Различают технико-экономические показатели назначения, технологичности, стандартизации и унификации, надежности и др.

Таким образом, надежность является составным свойством качества продукции. Однако она имеет ряд особенностей, что приводит к необходимости введения понятий, которые применяются для данного свойства. Термины и определения, используемые в теории надежности систем электроэнергетики, даны в ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия и определения» и в документе «Надежность систем энергетики. Терминология», издательство «Наука», 2002г.

Все термины теории надежности рассматриваются применительно к объекту, под которым понимается предмет определенного целевого назначения. Под объектом можно понимать электротехническое изделие, техническую систему, комплект оборудования. Во всех случаях, когда нет необходимости конкретизировать предмет исследования, говорят об объекте и надежности объекта. Если же рассматривается задача, специфичная только для определенного вида изделия, то говорят о надежности трансформатора, изоляторов, линии электропередачи и др.

При построении теории надежности электроснабжения различают три уровня сложности изделия: элемент, устройство, система. Но обычно используется двухпозиционная структура элемент – система. Под системой в теории надежности понимается совокупность совместно действующих объектов. Элементом называется часть системы. Понятие элемента и системы в расчетах надежности относительны. Объект, считающийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается элемент большего масштаба. Например, если исследу-

ется надежность работы электрической станции, то станция представляется как система, а генераторы, выключатели, шины распределительного устройства, турбины и т.д. – отдельными элементами. Если же исследуется надежность генератора, то отдельные его части: статор, возбудитель и другие – представляются как элементы, а сам генератор – как система.

Как известно, основной функцией системы электроснабжения является обеспечение всех потребителей электрической энергией в необходимом количестве и надлежащего качества. Поэтому применительно к системе электроснабжения наиболее обоснованным является такое определение понятия надежности электроснабжения – это способность электрической системы снабжать присоединенных к ней потребителей электрической энергией заданного качества в любой интервал времени. При этом понятие надежности включает в себя как бесперебойность снабжения потребителей электроэнергией, так и качество ее – стабильность частоты и напряжения.

Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

*Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технических обслуживаний и ремонтов.

*Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения технических обслуживаний и ремонтов.

*Сохраняемость* – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для объектов являющихся потенциальным источником опасности, к которым следует относить и электроэнергетические объекты, важным понятием является также такое понятие как «безопасность». Кроме этого, для таких объектов вво-

дятся понятия «устойчивость» и «живучесть», которые также как и безопасность хотя и не входят в общее понятие надежности, но требуют их учета при проектировании и эксплуатации.

С позиций теории надежности объект может находиться в исправном состоянии, неисправном, работоспособном и неработоспособном.

*Исправное состояние* – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (НТД). Если же хотя бы по одному из требований изделие не соответствует НТД, то считается, что оно находится в *неисправном* состоянии.

*Работоспособное состояние* – состояние объекта, при котором он способен выполнять (или выполняет) заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД, называется *неработоспособным*.

Понятие «исправное состояние» шире, чем понятие «работоспособное состояние». Работоспособный объект в отличие от неисправного удовлетворяет лишь тем требованиям НТД, которые обеспечивают его нормальное функционирование. При этом он может не удовлетворять, например, требованиям, относящимся к внешнему виду изделия. Работоспособный объект может быть неисправным, однако его повреждения при этом не настолько существенны, чтобы могли препятствовать функционированию объекта.

Объект переходит в неработоспособное состояние после события, которое называется *отказом*. Понятие отказа занимает одно из центральных мест в теории надежности, поскольку теория надежности – это наука, изучающая закономерности отказов технических устройств.

Отказы относятся к мало изученным явлениям. Указанная ситуация объясняется прежде всего тем, что время возникновения отказа зависит от большого числа случайных факторов, его трудно рассчитать и еще труднее измерить. Наблюдая за внешними проявлениями отказов в электроэнергетических системах можно видеть, что они приводят к различным последствиям – полному прекращению подачи

электроэнергии, ухудшению ее параметров, временному прекращению работы системы электроснабжения с последующим ее восстановлением («сбои») и т.п.

Время восстановления отказов и время работы объекта между отказами представляют собой случайные явления, что объясняется изменением условий эксплуатации, режимами работы технологических систем, принятой системой обслуживания и ремонта электроустановок и другими факторами.

При изучении закономерностей отказов наибольший интерес представляет изучение места и времени возникновения отказа и в особенности, промежутка времени восстановления работоспособного состояния объекта.

Случайный характер процессов, характеризующих надежность, позволяет заключить, что математическим аппаратом теории надежности могут быть теория вероятностей и математическая статистика. При этом следует иметь в виду, что теория надежности является самостоятельной наукой, а не отдельным разделом теории вероятностей. Она является технической, а не математической дисциплиной, и круг решаемых ею задач не ограничивается теорией вероятностей.

Отказы можно разделить: по характеру процесса появления – на внезапные и постепенные; по связи с другими отказами – на зависимые и независимые; по физической картине процесса – на катастрофические и параметрические; по степени влияния на работоспособность – на полные и частичные.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением параметров под воздействием многих случайных факторов, связанных с дефектами элементов, с нарушениями режимов и условий работы, с ошибками обслуживающего персонала и т.п. При постепенном изменении параметров в результате старения узлов и материалов происходит постепенный отказ.

Отказ какого-либо узла относится к независимым отказам, если он не является следствием отказа других узлов.

Отказы типа пробоя изоляции, короткого замыкания относятся к катастрофическим отказам, которые приводят к полному нарушению работоспособности. Параметрические отказы являются частичными отказами и выражаются в ухудшении качества функционирования изделия.

Кроме того, отказы подразделяются на конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы.



В зависимости от условий применения электротехнические изделия могут быть восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми.

*Восстанавливаемый объект* – это объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации. *Невосстанавливаемый объект* не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации. Следует отметить, что в зависимости от условий рассмотрения один и тот же объект может быть отнесен к тому или иному виду.

Большая часть элементов систем электроснабжения, в особенности элементов силового типа (генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, коммутационная аппаратура, компенсирующие устройства и т.д.), относятся к восстанавливаемым после отказа элементам.

## **1.2 Задачи оценки надежности электроснабжения потребителей**

Расчет надежности систем электроснабжения сводится к определению одного или нескольких количественных показателей на основе исходных характеристик надежности оборудования. Однако, несмотря на кажущуюся простоту такой постановки задачи, проблемы расчета надежности систем электроснабжения связаны с решением достаточно сложных теоретических и практических задач. Для расчета надежности необходимо:

- составить математическое описание явлений, связанных с ненадежной работой оборудования;
- принять некоторые характеристики в качестве меры надежности;
- составить математическую модель для расчета;
- провести необходимые расчеты;
- показать адекватность этой модели рассматриваемым процессам.

Известно, что системы электроснабжения относятся к человеко-машинным системам, предназначенным для производства, передачи и распределения электроэнергии и имеют специфические особенности:

- непрерывное и неразрывное единство производства, распределения и потребления электроэнергии;

- многоцелевое использование электроэнергии и невозможность ее складирования;
- наличие большого количества источников и потребителей электроэнергии;
- непрерывное развитие систем электроснабжения.

Эти особенности электроэнергетических систем делает невозможным постановку в широком масштабе экспериментальных исследований, и определяют использование теоретических методов с применением исходной информации по материалам эксплуатации.

При проведении таких исследований необходимо учитывать специфику сельских электрических сетей – большую протяженность, разветвленность и малую плотность нагрузок, что усложняет задачу повышения надежности. Большое число глухих ответвлений не секционированных сетей приводит к отключению всей линии при повреждении в любой точке. Указанное обстоятельство диктует необходимость рационального размещения средств секционирования с целью локализации поврежденного участка сети.

Следует отметить также недостаточное использование в проектных и эксплуатационных организациях расчетных данных о надежности и отсутствии полной и достоверной информации о повреждаемости элементов на местах. Данные о надежности сетей напряжением до 1000 В вообще практически отсутствуют.

В настоящее время имеются технические средства для обеспечения необходимого уровня надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Однако широкое их использование сдерживается из-за больших затрат. Сетевое резервирование в условиях сельских сетей чаще всего экономически нецелесообразно и не применяется. Кольцевые перемычки между линиями соседних районных подстанций лишь отчасти решают задачу сетевого резервирования, и их строительство во многих случаях также не всегда оправдано.

Проблему повышения надежности следует рассматривать как технико-экономическую, сопоставляя затраты на проведение дополнительных мер с уменьшением ущерба от перерывов электроснабжения.

Исследование проблемы надежности систем электроснабжения связано с выбором методов расчета. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что

структура является одним из основных факторов, обуславливающих надежность современных систем.

Исследование структуры системы электроснабжения предполагает выделение в ней как в едином целом отдельных элементов, самостоятельных в смысле надежности. Такой подход к надежности предполагает применение элементных методов расчета и анализа надежности, которые получили широкое распространение не только в энергетике, но и в других областях техники. Применение элементных методов расчета связано также тем, что они отражают реальные особенности функционирования систем и позволяют решать широкий круг задач по исследованию надежности.

Особенностью функционирования систем электроснабжения является то обстоятельство, что отказ элемента системы может не локализоваться в нем самом, а может привести к отключению не отказавших элементов и коммутационных устройств. Поэтому структурная схема надежности отличается от электрической схемы и возникает самостоятельная задача по составлению расчетных схем сложных систем.

Второй составляющей надежности системы электроснабжения является функциональная надежность, обусловленная особенностями режимных реализаций в электрической схеме, ограничениями режимов и пропускных способностей элементов при изменении структуры в различных состояниях.

Деление на структурную и функциональную составляющие носит условный характер ввиду их взаимосвязи и взаимной обусловленности.

Преимущественное распространение в практике работы проектных и эксплуатационных организаций получили элементные методы расчета надежности.

Основным способом повышения надежности систем электроснабжения является введение избыточности. Этот фактор следует учитывать при расчетах надежности.

На практике избыточность электрических сетей выступает в следующих формах:

1. Резервирование, т.е. повышение надежности путем введения структурной (дублирование элементов), функциональной (дублирование функциональных свя-

зей), временной (предоставление дополнительного времени для выполнения задания), информационной избыточности.

2. Совершенствование схемно-конструктивных решений и качества применяемых электротехнических изделий.

3. Совершенствование системы планово-предупредительных ремонтов и технических обслуживаний электрооборудования.

4. Разработка и внедрение автоматизированных систем контроля и управления процессами в электроэнергетических системах.

В системах электроснабжения используется широкий спектр технических решений, обеспечивающих введение избыточности: автоматическое повторное включение (АПВ), автоматическое включение резерва (АВР), дублирование генераторных мощностей, увеличение пропускной способности межсистемных связей, использование резервных дизельных электростанций (ДЭС) и т.д.

При этом учитывается ряд особенностей построения и функционирования систем электроснабжения.

Поскольку системы электроснабжения состоят из высоконадежных элементов, отказы более двух из них при наличии избыточности являются событиями мало вероятными. Если схема выбирается с резервированием, то, как правило, дублирующий элемент (линия электропередачи, трансформатор) полностью выполняет функции другого элемента при отказе. Если это условие не выполняется, например, при значительном росте нагрузки, то предусматривается отключение части потребителей. Поэтому, в большинстве случаев полный отказ в системах электроснабжения при наличии резервирования возможен в случае выхода из строя не менее двух независимых элементов.

В электрических сетях напряжением менее 35 кВ резервирующие элементы выбирают таким образом, что при отказе одного элемента в другом обычно не возникает недопустимых изменений параметров, и он полностью обеспечивает выполнение функций обоих элементов.

Для большей части практических задач, например, при проектировании нет необходимости рассматривать показатели надежности на коротких интервалах времени, поэтому можно не учитывать начальные состояния элементов.

При расчетах структурной надежности целесообразно использовать простые вероятностные модели, приняв при этом условие, что отказы элементов независимы и поток отказов является простейшим, а время безотказной работы во много раз больше времени восстановления.

При оценке структурной надежности целесообразно ввести понятие «расчетный элемент», который может отличаться от понятия «элемент системы». Под расчетным элементом будем понимать объект или группу объектов системы электроснабжения, отказ которых снижает уровень надежности. В первую очередь к такой категории относятся такие электротехнические изделия как генераторы, трансформаторы, выключатели, отделители, короткозамыкатели, сборные шины распределительных устройств. Несколько условно к элементам относятся линии электропередач. Для упрощения расчетов элементы могут объединяться.

В проектных расчетах обычно анализируется система относительно небольшого размера, а общая система проектируется по частям. В эксплуатации чаще возникает задача оценки надежности схем большого размера, содержащих сотни, а иногда и тысячи элементов.

К настоящему времени методы расчета надежности достаточно хорошо разработаны для использования в проектной и эксплуатационной практике.

## 2 Показатели надежности электроснабжения

Показателем надежности назовем величину, характеризующую одно или несколько свойств, составляющих надежность изделия. Если показатели характеризуют одно из свойств надежности, то они называются единичными. Различают единичные показатели безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости. Если показатель характеризует одновременно два (или более) свойств надежности, то он называется комплексным. Наиболее часто комплексные показатели надежности используются для количественной оценки безотказности и ремонтпригодности.

Рассмотрим показатели надежности, рекомендуемые нормативными документами [1, 2].

### 2.1 Единичные показатели надежности

#### 2.1.1 Показатели безотказности неремонтируемых объектов

Показателями безотказности неремонтируемых объектов являются: вероятность безотказной работы  $P(t)$ , средняя наработка до первого отказа  $T_1$ , интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

*Вероятность безотказной работы* определяется в предположении, что в начальный момент времени объект находился в работоспособном состоянии. Обозначим через  $t$  заданное время наработки объекта. Возникновение отказа – случайное событие, а наработка  $\tau$  от начального момента до возникновения отказа – случайная величина. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  объекта в интервале времени от 0 до  $t$  включительно определяется как

$$P(t) = P(t > \tau). \quad (2.1)$$

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$P^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (2.2)$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени,

$n(t)$  – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до  $t$ .

При этом объем выборки должен быть достаточно велик и при большом числе изделий статистическая оценка  $P^*(t)$  практически совпадает с вероятностью  $P(t)$ .

Наряду с понятием «вероятность безотказной работы» часто используют понятие «вероятность отказа», которое характеризует вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным, в начальный момент времени. На отрезке времени от 0 до  $t$  вероятность отказа определяется по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (2.3)$$

Если функция  $Q(t)$  дифференцируемая, то безотказность можно характеризовать плотностью распределения случайной величины наработки до отказа или частотой отказов  $f(t)$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.4)$$

Достоинством рассматриваемого показателя является возможность судить по его величине о числе изделий, которые могут отказать за определенный интервал времени.

Из определения вероятности безотказной работы видно, что эта характеристика является убывающей функцией времени и изменяется в диапазоне от 1 в начальный момент времени до 0 при  $t \rightarrow \infty$ .

Такой показатель имеет смысл, если указывается интервал времени, на котором рассматривается безотказность объекта. Если, например, в технических условиях на ремонт электрической машины указывается значение вероятности безотказной работы 0,8 за 9000 ч наработки, то это значит, что из 100 отремонтированных устройств в течение 9000 ч не менее 80 проработают безотказно.

Вероятность безотказной работы входит во многие другие характеристики изделий, учитывает значительное количество факторов, влияющих на надежность, может быть сравнительно просто получена. Однако для восстанавливаемых систем она характеризует только надежность до первого отказа, по ее значению бывает трудно вычислить другие количественные характеристики надежности. Поэтому вероятность безотказной работы не может полностью характеризовать такое свойство как надежность и не может быть с ним отождествлена.

*Средней наработкой до отказа* называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа  $T_1$ . Через вероятность безотказной работы наработка до отказа вычисляется следующим образом

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.5)$$

Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяют по формуле

$$T_1^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j, \quad (2.6)$$

где  $N$  – число работоспособных объектов при  $t = 0$ ,

$\tau_j$  – наработка до первого отказа каждого из объектов.

Для определения  $T_1$  необходимо знать время безотказной работы всех испытуемых изделий.

*Интенсивность отказов* – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, которая определяется как отношение числа отказов изделия в единицу времени к среднему числу изделий исправно работающих в данный отрезок времени

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (2.7)$$



где  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$  – среднее число изделий, исправно работающих в интервале  $\Delta t$ ,

$N_i, N_{i+1}$  – соответственно число изделий, исправно работающих в начале и в конце интервала  $\Delta t$ .

Интенсивность отказов является критерием, наиболее полно характеризующим надежность невосстанавливаемых объектов. Этот показатель характеризует надежность элемента в каждый данный момент времени, т.е. его локальную надежность. Интенсивность отказов связана однозначной зависимостью с вероятностью безотказной работы

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (2.8)$$

В теории надежности интенсивности отказов отводится особая роль, поскольку, зная интенсивность отказов отдельных элементов можно выполнять расчеты показателей надежности при проектировании.

**Пример 2.1.** На испытаниях находилось  $N = 1000$  неремонтируемых изделий. Число отказов  $n(t)$  фиксировалось через каждые 100 ч работы ( $\Delta t = 100$ ). Ниже в таблице 1.1 приведены данные об отказах.

**Таблица 2.1 – Данные об отказах неремонтируемых изделий**

$\Delta t_i, \text{ч}$	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
$n(t)$	50	40	32	25	20	16	15	14	15	14

Требуется определить  $P^*(1000)$ ,  $\lambda^*(950)$  и  $T_1^*$ .

**Р е ш е н и е.**

1. Вероятность безотказной работы  $P^*(1000) = \frac{1000 - 241}{1000} = 0,759$ .

2. Интенсивность отказов  $\lambda^*(950) = \frac{14}{100(773 + 759)/2} = 1,82 \cdot 10^{-4}$ .

3. Нарabотка до отказа

$$T_1^* = \frac{50 \cdot 50 + 150 \cdot 40 + 250 \cdot 32 + 350 \cdot 25 + 450 \cdot 20 + 550 \cdot 16 + \dots + 950 \cdot 14}{241} = 371 \text{ч}.$$

## 2.1.2 Показатели безотказности ремонтируемых объектов

Понятие надежности, введенное при рассмотрении неремонтируемых объектов, является в данном случае неполным, т.к. оно не отражает свойство восстанавливаемости.

Процесс эксплуатации ремонтируемых изделий можно представить как последовательное чередование интервалов времени работоспособного и неработоспособного состояний (рисунок 2.1). Появление отказов в таких системах имеет смысл потока требований на ремонт.

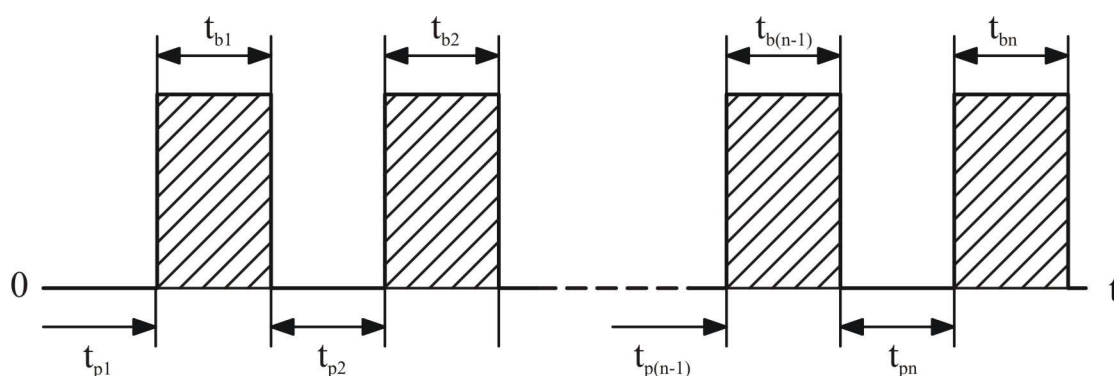


Рисунок 2.1 – Процесс эксплуатации ремонтируемого изделия

Показателями безотказности ремонтируемых объектов являются: вероятность безотказной работы  $P(t)$ , параметр потока отказов  $\omega(t)$ , средняя наработка на отказ  $T$ .

*Вероятность безотказной работы* для нового оборудования рассматривается до первого отказа, а для оборудования, находящегося в эксплуатации, – до отказа после восстановления работоспособного состояния.

*Параметр потока отказов* представляет собой отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки. При этом число элементов в процессе опыта остается неизменным (отказавшие элементы заменяются новыми), что соответствует реальному процессу эксплуатации. Параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t) - r(t)]}{\Delta t}, \quad (2.9)$$

где  $\Delta t$  – малый отрезок наработки;

$r(t)$  – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки  $t$ . Разность  $r(t + \Delta t) - r(t)$  представляет собой число отказов на отрезке  $\Delta t$ .

В практических расчетах обычно используется среднее значение параметра потока отказов, которое называется иногда частотой отказов или средней повреждаемостью.

Статистическая оценка для параметра потока отказов  $\omega^*(t)$  вычисляется по формуле

$$\omega^*(t) = \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad t_1 < t < t_2, \quad (2.10)$$

где  $(t_2 - t_1)$  – конечный отрезок времени.

Получение интенсивности отказов непосредственно из статистических данных в общем случае затруднительно, так как необходима информация о предыстории каждого элемента. Однако, если  $\omega(t) = \omega^* = \text{const}$ , то  $\lambda(t) = \lambda^* = \omega^*$ .

Указанный показатель ( $\omega^*$ ) широко используется для оценки эффективности работы энергоснабжающих организаций. В результате обработки статистических данных устанавливается число плановых и аварийных отключений питания, исходя из количества и длительности которых, можно определить ущерб от перерывов электроснабжения.

Для ремонтируемого объекта, при эксплуатации которого допускается многократное восстановление работоспособности оборудования, удобным показателем надежности является также среднее число часов работы между двумя соседними отказами  $T$ .

Статистическую оценку средней наработки на отказ  $T^*$  вычисляют по формуле

$$T^* = \frac{t}{r(t)}, \quad (2.11)$$

где  $t$  – суммарная наработка;

$r(t)$  – число отказов, наступивших во время этой наработки.

Для получения количественных оценок этого и других показателей надежности статистическими методами необходим сбор соответствующих статистических материалов в процессе эксплуатации или специально проводимый эксперимент с группой однотипных объектов.

**Пример 2.2.** В процессе эксплуатации фиксировалась работа трех комплектов высоковольтной аппаратуры. Установлено, что за период наблюдения первый комплект отказал 4 раза, второй – 8 раз, третий – 6 раз. Наработка первого комплекта составила 8600 ч, второго – 12 300 ч, третьего – 14 500 ч. Определить наработку на отказ.

**Р е ш е н и е.**

1. Определяем суммарную наработку  $t = 8600 + 12\,300 + 14\,500 = 35\,400$  ч.
2. Рассчитываем число отказов за время наработки  $r(t) = 4 + 8 + 6 = 18$ .
3. Находим среднюю наработку на отказ  $T^* = t/[r(t)] = 35\,400/18 = 1966$  ч.

### 2.1.3 Ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость

*Ремонтпригодность.* Показатели ремонтпригодности необходимы для ремонтируемых объектов. Время ремонта является случайной величиной. Она складывается из времени, затрачиваемого на обнаружение отказа, времени поиска отказавших элементов и устранения последствий отказа.

Для количественной оценки ремонтпригодности наиболее часто применяются:  $P(t_b)$  – вероятность того, что среднее время восстановления объекта не превысит заданное значение, и среднее время восстановления  $T_b$  – математическое ожидание времени ремонта отказавшего объекта

$$T_b = \int_0^{\infty} t_{bi} f(t_b) dt, \quad (2.12)$$

где  $t_{bi}$  – время текущего ремонта  $i$ -го объекта;

$f(t_b)$  – плотность распределения случайной величины времени ремонта. Если в процессе эксплуатации электрооборудования ведется учет отказов и фиксируется время выполнения ремонтных работ, среднее время восстановления можно определить на основе статистических данных по формуле

$$T_b^* = \left( \sum_{i=1}^n T_{bi} \right) / n, \quad (2.13)$$

где  $n$  – количество отказов за время  $t$ .

**Пример 2.3.** При эксплуатации линии электропередачи зарегистрировано 20 отказов: из них изоляторов – 8, опор – 2, проводов – 4, предохранителей – 6. На ремонт затрачивалось: опор 1,5 ч, изоляторов 25 мин, предохранителей 10 мин, проводов 50 мин. Найти среднее время восстановления.

**Решение.**

1. Определяем вес отказавших элементов по группам  $m = n_i/n$

$$m_1 = \frac{8}{20} = 0,32; \quad m_2 = \frac{2}{20} = 0,1; \quad m_3 = \frac{4}{20} = 0,2; \quad m_4 = \frac{6}{20} = 0,3;$$

2. Находим среднее время восстановления

$$T_b^* = \sum_{i=1}^4 t_{bi} m_i = 90 \cdot 0,1 + 25 \cdot 0,32 + 10 \cdot 0,3 + 50 \cdot 0,2 = 30 \text{ мин.}$$

Термин «ремонтпригодность» традиционно трактуется в широком смысле слова как приспособленность к поддержанию работоспособного состояния, т.е. помимо приспособленности к ремонту и приспособленности к техническому обслуживанию.

Для комплексной оценки ремонтпригодности допускается использовать показатели, характеризующие удельную трудоемкость текущего ремонта и технического обслуживания.

*Долговечность.* Под долговечностью понимается свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технических обслуживаний и ремонтов. Предельное состояние наступает, когда дальнейшая эксплуатация электрооборудования невозможна или нецелесообразна.

Для количественной оценки долговечности используются такие показатели

как ресурс и срок службы. Они указываются в эксплуатационной документации. Известно, что ресурс (срок службы) может быть доремонтный, межремонтный, послеремонтный (до списания). Доремонтный ресурс исчисляют до первого капитального ремонта, межремонтный – между ремонтами, послеремонтный – после последнего капитального ремонта. Полный ресурс отсчитывают от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации.

При рассмотрении вопросов надежности обычно оперируют полным ресурсом (сроком службы). Для ремонтируемых и неремонтируемых объектов различают средний срок службы (средний ресурс) и гамма – процентный срок службы (ресурс).

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы от начала эксплуатации до наступления предельного состояния

$$T_{\text{сл.}i} = \int_0^{\infty} t_{\text{сл.}i} f(t_{\text{сл.}i}) dt, \quad (2.14)$$

где  $t_{\text{сл.}i}$  – срок службы  $i$ -го объекта;

$f(t_{\text{сл.}})$  – функция плотности распределения времени срока службы.

Используя статистические данные, величину  $T_{\text{сл.}}^*$  можно определить по выражению

$$T_{\text{сл.}}^* = \left( \sum_{i=1}^N T_{\text{сл.}i} \right) / N, \quad (2.15)$$

где  $T_{\text{сл.}i}$  – срок службы  $i$ -го объекта;

$N$  – число объектов.

Гамма – процентный срок службы ( $T_{\text{сл.}\gamma}$ ) – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Так, например, если  $\gamma = 90 \%$  (90-процентный срок службы), то 90 % объектов данной партии не достигнут предельного состояния. Гамма – процентный срок службы определяется из выражения

$$1 - Q(T_{\text{сл.}\gamma}) = P(T_{\text{сл.}\gamma}) = \gamma/100, \quad (2.16)$$

где  $Q(T_{\text{сл.}\gamma})$  – функция распределения срока службы.

Средний и гамма – процентный ресурсы определяются по формулам, аналогичным (2.15) и (2.16).

В любом случае при использовании показателей долговечности следует указывать начало и конец отсчета.

*Сохраняемость* важна для изделий с длительными сроками хранения, например, для резервного электрооборудования, средств защиты от поражения электрическим током и др. В процессе хранения в элементах оборудования происходят естественные физико-химические процессы, вызывающие старение. Различные факторы внешней среды ускоряют этот процесс. В результате изменяются технические и эксплуатационные характеристики электрооборудования, и после хранения оно может оказаться в неработоспособном или предельном состоянии.

Сохраняемость электрооборудования характеризует его способность противостоять отрицательному влиянию этих условий и продолжительности его хранения и транспортирования. В качестве единичных показателей сохраняемости используются: средний срок сохраняемости и гамма – процентный срок сохраняемости.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости

$$T_c = \int_0^{\infty} t_{ci} f(t_c) dt, \quad (2.17)$$

где  $t_{ci}$  – сохраняемость  $i$ -го вида электрооборудования;

$f(t_c)$  – плотность распределения случайной величины  $t_c$ .

По статистическим данным величина  $T_c^*$  определяется по формуле

$$T_c^* = \left( \sum_{i=1}^N T_{ci} \right) / N, \quad (2.18)$$

где  $N$  – количество объектов;

$T_c$  – срок сохраняемости  $i$ -го объекта.

Гамма – процентный срок сохраняемости  $T_{c\gamma}$  – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах

$$1 - Q(T_{c\gamma}) = P(T_{c\gamma}) = \gamma/100, \quad (2.19)$$

где  $Q(T_{c\gamma})$  – функция распределения срока сохраняемости.

Следует различать сохраняемость электрооборудования до ввода в эксплуатацию и сохраняемость оборудования в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае сохраняемость входит составной частью в срок службы.

## 2.2 Комплексные показатели надежности

Помимо единичных показателей надежности для оценки эксплуатационных характеристик электроэнергетического оборудования часто используются обобщенные (комплексные) показатели, которые характеризуют одновременно несколько свойств. В качестве таких показателей обычно рассматриваются: коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования.

Готовность – сложное комплексное понятие, характеризующее состояние объекта, которое зависит от надежности самого объекта и действий обслуживающего персонала. Готовность систем электроснабжения определяется следующими факторами:

- надежностью электрооборудования;
- квалификацией обслуживающего персонала;
- принятой системой технических обслуживаний и текущих ремонтов электрооборудования;
- укомплектованностью предприятий электрических сетей обслуживающим персоналом;
- обеспеченностью эксплуатационных подразделений материально-техническими ресурсами.

Показатели готовности электрооборудования носят вероятностно-



статистический характер, т.к. зависят от большого числа различных факторов.

Для оценки степени использования электрооборудования при возникновении неплановых режимов используется коэффициент готовности. *Коэффициент готовности* – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение его по назначению не предусмотрено (плановые профилактические мероприятия).

Для систем электроснабжения, как правило, выполняется условие  $T > T_{\text{в}}$ , и обычно восстановление начинается сразу после возникновения отказа. При таких условиях стационарное значение коэффициента готовности определяется по формуле

$$k_{\text{г}} = T / (T + T_{\text{в}}), \quad (2.20)$$

где  $T$  – наработка на отказ;

$T_{\text{в}}$  – среднее время восстановления.

Следовательно, коэффициент готовности показывает относительное время нахождения электрооборудования в исправном состоянии (в состоянии готовности к применению) в установившемся (стационарном) процессе эксплуатации.

Из формулы (2.20) видно, что коэффициент готовности может быть повышен как за счет увеличения наработки на отказ, так и за счет сокращения средней продолжительности ремонта  $T_{\text{в}}$ .

Коэффициент готовности характеризует одновременно два свойства электрооборудования – его безотказность и ремонтпригодность. С его помощью можно оценить вероятность нахождения электрооборудования в исправном состоянии при включении его в произвольный момент времени. Однако следует отметить ту особенность этого показателя, что он не учитывает простои электрооборудования при проведении плановых мероприятий по эксплуатации энергоустановок.

Коэффициент вынужденного простоя  $k_{\text{п}}$  – вероятность того, что в произвольный момент времени  $t$  объект окажется в неработоспособном состоянии

$$k_{\text{п}}(t) = 1 - k_{\text{г}}(t). \quad (2.21)$$

Установившееся значение коэффициента простоя

$$k_{\Pi} = 1 - \frac{T^*}{T^* + T_B^*} = \frac{T_B^*}{T^* + T_B^*}. \quad (2.22)$$

Степень выполнения задачи оборудованием, находящимся в режиме ожидания, может быть оценена коэффициентом оперативной готовности. Под режимом ожидания понимается нахождение оборудования при полной или облегченной нагрузке, без выполнения основных рабочих функций.

*Коэффициент оперативной готовности* – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и, начиная с этого момента времени, будет работать безотказно в течение заданного интервала. Вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии в произвольный момент времени характеризуется коэффициентом готовности, а работоспособность в течение заданного интервала времени – вероятностью безотказной работы. Следовательно

$$k_{o.g} = k_r P(t). \quad (2.23)$$

Входящие в выражение (2.23) сомножители определяются по ранее приведенным формулам (2.20) и (2.2).

Для комплексной оценки надежности работы электрооборудования в процессе эксплуатации применяется коэффициент технического использования. *Коэффициент технического использования* – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническими обслуживаниями и ремонтами за тот же период. На основании статистических данных коэффициент технического использования определяется следующим образом

$$k_{г. и} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma} + T_{p\Sigma} + T_{т.о\Sigma}}, \quad (2.24)$$

где  $T_{\Sigma}$  – суммарная наработка объекта;

$T_{p\Sigma}$  – суммарное время простоев из-за плановых и неплановых ремонтов;

$T_{т.о\Sigma}$  – суммарное время простоев из-за плановых и неплановых технических обслуживаний.

По сравнению с коэффициентом готовности коэффициент технического использования является более общим и универсальным показателем, поскольку учитывает все простои объекта.

**Пример 2.4.** Интенсивность отказов ремонтируемого электроприемника подчиняется экспоненциальному закону с интенсивностью отказов  $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . Среднее время ремонта  $T_{в} = 17,6 \text{ ч}$ . Определить коэффициент готовности.

**Р е ш е н и е.**

1. Наработка на отказ при экспоненциальном распределении

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-2}} = 500 \text{ ч.}$$

2. Коэффициент готовности

$$k_{г} = \frac{T}{T + T_{в}} = \frac{500}{500 + 17,6} = 0,966.$$

**Пример 2.5.** Участок городской электрической сети к началу наблюдений проработал 458 ч. К концу наблюдений наработка составила 2783ч. Всего зарегистрировано 5 отказов. Среднее время ремонта составило 1,5 ч. Определить наработку на отказ и коэффициент готовности.

**Р е ш е н и е.**

1. Наработка на отказ  $T^* = \frac{(2783 - 458)}{5} = 465 \text{ ч.}$

2. Коэффициент готовности  $k_{г} = \frac{465}{465 + 1,5} = 0,997.$

**Пример 2.6.** При эксплуатации электрических распределительных сетей района их суммарная наработка за год составила  $T_{\Sigma} = 7400$  ч, суммарное время ремонта  $T_{p\Sigma} = 480$  ч и суммарное время технического обслуживания  $T_{т.о} = 880$  ч. Определить коэффициент технического использования.

**Р е ш е н и е.**

Коэффициент технического использования

$$k_{т.и} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma} + T_{p\Sigma} + T_{т.о\Sigma}} = \frac{7400}{7400 + 480 + 880} = 0,844.$$

## **2.3 Особенности использования показателей надежности для оценки систем электроснабжения**

К потребительским качествам электроснабжения относится способность системы к обеспечению надежного питания потребителей.

Система электроснабжения в любой рассматриваемый период времени может находиться в одном из следующих состояний: рабочем, плановом ремонте, аварийном простое и резерве. Отключения в электрических сетях можно подразделять на аварийные (неустойчивые и длительные) и преднамеренные (плановые и неплановые ремонты, профилактические осмотры, технические обслуживания и т.п.). Преднамеренные отключения обычно планируются так, чтобы вызываемое ими снижение надежности электроснабжения потребителей было наименьшим.

В качестве наиболее общей оценки надежности можно принять ожидаемую вероятность обеспечения электроснабжения в рассматриваемой точке сети. Указанный показатель идентичен вероятности безотказной работы. Для радиальных сетей с односторонним питанием с некоторыми допущениями можно принять, что отказы являются событиями случайными и не зависимыми и отказ любого элемента системы приводит к нарушению электроснабжения потребителей. В рассматриваемом случае, для того чтобы в расчетный промежуток времени потребители получали электроэнергию, необходима безотказная работа всех узлов. Вероятность такого события можно вычислить по формуле

$$P(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t), \quad (2.25)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность исправной работы  $i$ -го узла (элемента),  
 $k$  – количество узлов (элементов системы).

С точки зрения потребителя надежность электроснабжения определяется длительностью и частотой перерывов в подаче электроэнергии. Для отдельного потребителя, питающегося по радиальной линии, плановые и неплановые ремонты также как и аварийные связаны с перерывом электроснабжения, поэтому длительность плановых ремонтов служит одним из показателей надежности.

Для потребителей, у которых ущерб меняется в зависимости от длительности простоя, необходимо, чтобы время восстановления питания не превышало заданное. Не случайно, в число показателей безотказности для электроэнергетических систем введен такой показатель, как максимально допустимое время перерыва электроснабжения, под которым подразумевается допустимое время нарушения энергоснабжения потребителей еще не приведшее к срыву его технологического процесса.

При оценке надежности электрических сетей необходимо учитывать следующие показатели

- удельное количество отключенных линий;
- среднюю длительность восстановления питания с учетом аварийных, плановых и неплановых отключений;
- вероятность того, что среднее время восстановления не превысит заданное время.

Элементы электрических систем относятся к восстанавливаемым элементам при отказах и повреждениях, поэтому при оценке надежности следует рассматривать показатели для восстанавливаемых объектов.

Таким образом, для систем электроснабжения целесообразно использовать следующие показатели: параметр потока отказов (плановых, неплановых и аварийных отключений), т.е. среднее количество отказов в единицу времени (обычно год), отнесенному к одному элементу 1/год, а для линий электропередачи параметр потока отказов на 1км, 1/(км·год);

среднее время восстановления (аварийных и преднамеренных отключений);  
с учетом определенных допущений (простейший поток отказов) – коэффициент готовности и коэффициент технического использования, а для резервных источников электроснабжения – коэффициент оперативной готовности.

При этом следует помнить, что наиболее общим и универсальным показателем является коэффициент технического использования, поскольку он характеризует относительное время пребывания объекта в работоспособном состоянии.

**Пример 2.7.** Проведено обследование статистических данных по надежности работы электрических сетей трех административных районов Ставропольского края, оценка проводилась по коэффициенту технического использования. Получены следующие данные: Кочубеевский район  $k_{т.и} = 0,89$ , Грачевский район  $k_{т.и} = 0,79$ , Шпаковский район  $k_{т.и} = 0,63$ . Дайте оценку технического состояния районных электрических сетей.

**Р е ш е н и е.**

Самый низкий уровень технического состояния электрических сетей наблюдается в Шпаковском районе, поскольку 37 % времени в году электрические сети находятся в режиме аварийного или преднамеренного отключения.

## 3 Модели отказов элементов систем электроснабжения

### 3.1 Виды моделей отказов

Отказы, происходящие в системах электроснабжения, подразделяются: на внезапные, происходящие в результате резкого изменения параметров под воздействием одного или нескольких случайных факторов (нагрузки, внешней среды, режима работы и т.д.), и на постепенные, при которых наблюдается плавное постепенное изменение параметров в результате износа отдельных частей или всего изделия в целом. Статистика отказов электрооборудования показывает, что отказы, вызываемые износом, составляют 15 ... 20 % их общего количества.

Каждый из видов отказов характеризуется собственной моделью. Одной из основных характеристик отказов является функция распределения времени безотказной работы. Все остальные показатели, связанные с отказами, могут быть получены на основе этой зависимости.

Время между соседними отказами является непрерывной случайной величиной. Случайные величины в зависимости от их физического смысла могут иметь различные законы распределения. В теории вероятностей известно большое число таких законов. Однако рассматривать количественные характеристики надежности имеет смысл только для ограниченного их числа. Для электротехнических изделий наиболее часто применяются экспоненциальный (показательный) и нормальный законы распределения, а также распределение Вейбулла-Гнеденко. Для описания дискретных случайных величин используется распределение Пуассона. Указанная ситуация применительно к различным видам отказов объясняется следующими соображениями.

*Модели внезапных отказов.* Короткие замыкания в электрических сетях, обрыв проводов воздушных линий электропередачи, механические нагрузки на кабельные линии и другие повреждения являются случайными событиями, и связи между ними не наблюдается. Такие отказы возникают не как следствие постепенного старения элементов конструкции, а в результате внешних случайных воздействий, не зависящих друг от друга и возникающих в случайные моменты времени, которые однозначно трудно предсказать. При этом капитальные ремонты и профи-

лактические мероприятия в электрических сетях проводятся своевременно. В этом случае, аналитически доказано, что плотность вероятности случайной величины времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону распределения.

*Модели постепенных отказов.* Материалы, из которых изготавливается электрооборудование, со временем претерпевают необратимые изменения. Они возникают вследствие теплового и вибрационного старения изоляции кабельных линий, генераторов, электродвигателей; коррозии металлических частей; износа дугогасящих камер, а также вследствие деформации контактов и т.д.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что приемлемой моделью, описывающей постепенные отказы, является нормальный закон распределения [13,17].

*Модель отказов изоляции электротехнических изделий.* Известно, что до 80 % выходов из строя электрических машин происходит из-за отказа изоляции.

Основной характеристикой изоляции электротехнических изделий является ее электрическая прочность, которая в зависимости от условий эксплуатации и вида изделия определяется ее механической прочностью, эластичностью, остаточной деформацией, расслоением под воздействием электрических и механических нагрузок.

Одним из основных факторов, определяющим срок службы изоляции, является тепловое старение. Механические нагрузки, в особенности, обусловленные электродинамическими процессами при резких изменениях тока, также способствуют интенсивному старению изоляции. Наиболее полно и точно закон распределения времени безотказной работы изоляции описывается распределением Вейбулла-Гнеденко.

Модель Вейбулла-Гнеденко является универсальной и ее можно использовать для различных электротехнических изделий. При соответствующем подборе параметров можно с помощью закона Вейбулла-Гнеденко можно описывать надежность и стареющих элементов, у которых  $\lambda(t)$  возрастает и надежность элементов, имеющих скрытые дефекты, у которых  $\lambda(t)$  убывает с течением времени. Закон Вейбулла-Гнеденко удобен для вычислений, но связан с эмпирическим подбо-



ром параметров  $\lambda_0$  и  $b$  и необходимостью иметь соответствующие статистические данные.

### 3.2 Показатели надежности для различных моделей отказов

Поскольку момент появления отказа электрооборудования носит случайный характер, следовательно, и время безотказной работы есть случайная величина, для описания которой используются различные законы: экспоненциальный, Вейбулла-Гнеденко, нормальный, Пуассона и др.

*Распределение Вейбулла-Гнеденко.*

Вероятность безотказной работы в интервале  $0 - t$  при этом распределении определяется по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^b), t \geq 0, \lambda_0 > 0, b > 0, \quad (3.1)$$

где  $\lambda_0$  и  $b$  – параметры распределения ( $\lambda_0$  – параметр масштаба,  $b$  – параметр формы кривой). Отсюда, плотность распределения

$$f(t) = -P'(t) = \lambda_0 b t^{b-1} \exp(-\lambda_0 t^b), \quad (3.2)$$

среднее время безотказной работы

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_0 t^b) dt = \lambda_0^{-1/b} \Gamma(1 + 1/b), \quad (3.3)$$

где  $\Gamma(1 + 1/b)$  – табулированная гамма-функция;

$\lambda_0$  – интенсивность отказов;

При этом интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda_0 b t^{b-1}. \quad (3.4)$$

Модель Вейбулла-Гнеденко является универсальной моделью надежности электрооборудования (кривые рисунка 3.1). Надежность электрооборудования на участке приработки во многих случаях описывается таким законом с  $b < 1$ , период старения с  $b > 1$ , а период эксплуатации с  $b = 1$ .

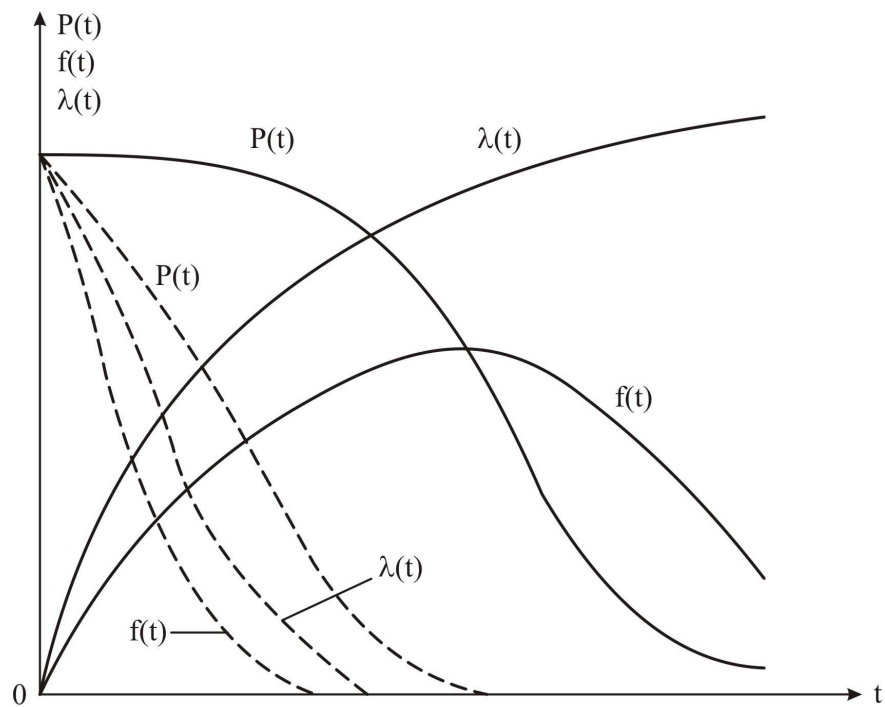


Рисунок 3.1 – Показатели надежности при использовании закона Вейбулла-Гнеденко:  
 —————  $b > 1$ , —————  $b < 1$

Обработка статистических данных по отказам асинхронных электродвигателей показала, что на участке  $0 \dots 4000$  ч время наработки на отказ подчиняется закону Вейбулла-Гнеденко, при этом вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp - (t^{0,217}/54,7),$$

а на участке эксплуатации от 4000 ч до 20 000 ч время наработки на отказ подчиняется экспоненциальному закону, являющемуся частным случаем закона Вейбулла-Гнеденко при  $b = 1$ .

**Пример 3.1.** Время безотказной работы асинхронного электродвигателя подчинено закону Вейбулла-Гнеденко с параметрами  $b = 2$ ,  $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ , время работы равно 100 ч. Определить  $P(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_1$ .

**Решение.**

$$1. P(100) = e^{-\lambda_0 t^b} = e^{-2 \cdot 10^{-5} \cdot 100^2} = 0,82.$$

$$2. f(100) = \lambda_0 b t^{b-1} e^{-\lambda_0 t^b} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot e^{-2 \cdot 10^{-5} \cdot 100^2} = 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

$$3. \lambda(100) = \lambda_0 b t^{b-1} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 100 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

$$4. T_1 = \lambda_0^{-1/b} \Gamma(1 + 1/b) = (2 \cdot 10^{-5})^{-1/2} \Gamma(1 + 1/2) = \frac{0,88}{4,47 \cdot 10^{-3}} = 197 \text{ ч}.$$

*Экспоненциальное распределение.*

Наиболее распространенным в теории надежности является экспоненциальный (показательный) закон распределения наработки до отказа. Его можно рассматривать как частный случай распределения Вейбулла-Гнеденко при  $b = 1$ . С учетом этого:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (3.5)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.6)$$

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = \lambda = \text{const}, \quad (3.7)$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt. \quad (3.8)$$

При экспоненциальном распределении (рисунок 3.2) вероятность безотказной работы объекта в интервале  $T, T + t$  не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от интервала  $t$ .

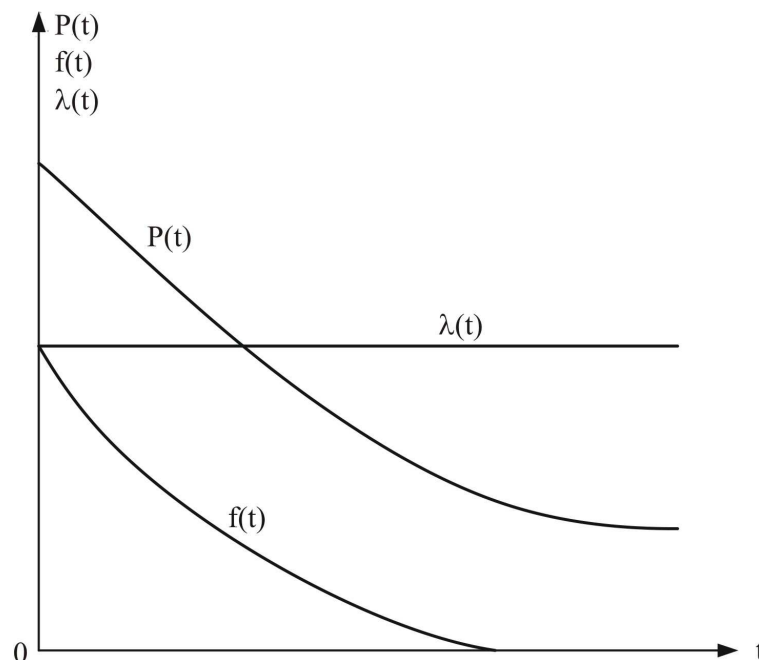


Рисунок 3.2 – Зависимости  $P(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  при распределении наработки до отказа по экспоненциальному закону

Экспоненциальная модель надежности описывает надежность не стареющих элементов. Этот закон определяется всего лишь одним параметром  $\lambda(t) = \lambda$ , то значительно упрощает определение вероятности безотказной работы опытным путем. Интенсивность отказов в этом случае – величина постоянная  $\lambda = \text{const}$  и совпадает с параметром закона распределения. Экспоненциальное распределение типично для электрооборудования электрических сетей, эксплуатируемого в длительном режиме.

**Пример 3.2.** Автоматический выключатель имеет экспоненциальный закон распределения наработки до отказа. Определить вероятность безотказной работы электротехнического изделия в течение наработки  $t$ , равной середине времени до отказа.

*Решение.*

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении  $P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/m_t}$ , при  $t = m_t$  имеем  $P(m_t) = e^{-1} \approx 0,37$ .

*Нормальное распределение.*

Указанный закон распределения случайных величин получил широкое распространение в теории вероятностей. Применительно к эксплуатации электрооборудования с использованием его удобно описывать надежность изделий на этапе износа. В отдельных случаях нормальному закону подчиняется наработка оборудования до текущего и капитального ремонтов.

Нормальный закон характеризуется двумя параметрами – математическим ожиданием  $m_t$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma_t$ . Зависимости показателей безотказности для нормального распределения приведены на рисунке 3.3, при этом вероятность отказа описывается формулой

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(1 - m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right] dt. \quad (3.9)$$

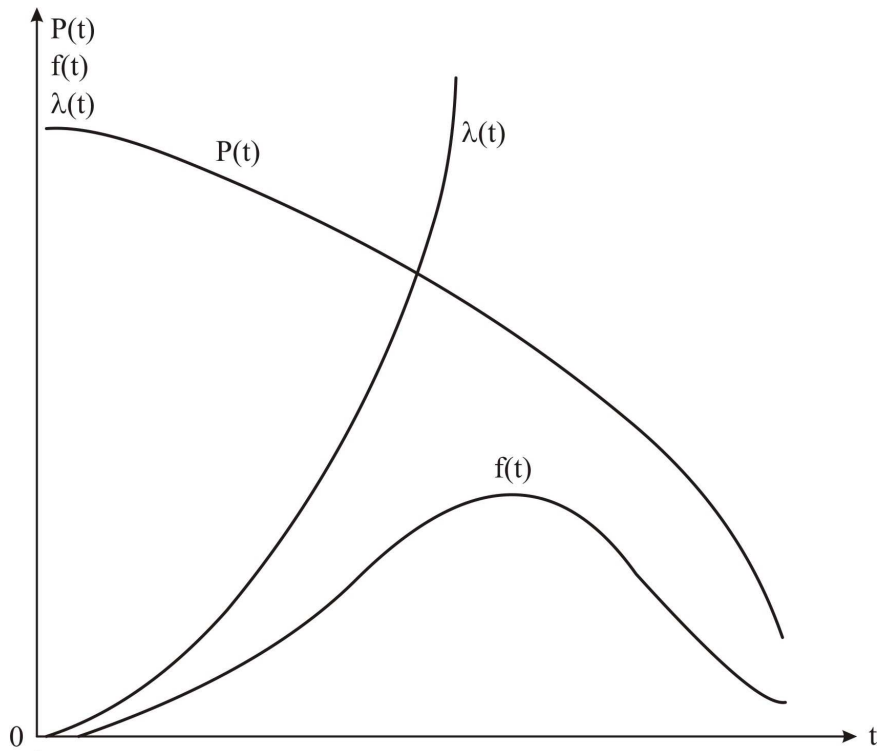


Рисунок 3.3 – Зависимости  $P(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  для нормального закона распределения

Для выполнения расчетов с использованием нормального закона вводится функция Лапласа  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ , которая табулирована, что значительно упрощает расчеты. С использованием  $\Phi(x)$  показатели надежности при усеченном нормальном распределении ( $t > 0$ ) определяются по формулам

$$P(t) = \Phi[(m_t - t)/\sigma_t] / \Phi(m_t/\sigma_t), \quad (3.10)$$

$$f(t) = \exp\left[-(t - m_t)^2 / 2\sigma_t^2\right] / [\sigma_t \sqrt{2\pi} \Phi(m_t/\sigma_t)], \quad (3.11)$$

$$\lambda(t) = \exp\left[-(t - m_t)^2 / 2\sigma_t^2\right] / [\sigma_t \sqrt{2\pi} \Phi(m_t - t/\sigma_t)]. \quad (3.12)$$

Если используется центрированная и нормированная функция Лапласа  $\Phi(z)$  с заменой переменных  $Z = (t - m_t)/\sigma_t$ , то расчет вероятности безотказной работы во времени проводится по формуле

$$P(t) = 0,5 - \Phi[(t - m_t)/\sigma_t]. \quad (3.13)$$

**Пример 3.3.** Время работы разрядников подчиняется нормальному закону с параметрами  $m_t = 600$  ч,  $\sigma_t = 200$  ч. Требуется найти  $P(t)$  для  $t = 500$  ч.

**Решение.**

$$1. P(500) = \Phi \left[ \frac{600 - 500}{200} \right] / \Phi \left[ \frac{600}{200} \right] = \frac{\Phi(0,5)}{\Phi(3)}.$$

2. Значения  $\Phi(0,5)$  и  $\Phi(3)$  найдем по таблице Приложения А [8], в результате  $P(500) = \frac{\Phi(0,5)}{\Phi(3)} = \frac{0,69}{0,999} = 0,63$ .

#### *Распределение Пуассона.*

В теории надежности указанное распределение используется для описания дискретных случайных величин. Потoki отказов, подчиняющиеся этому закону, называются пуассоновскими.

Согласно закону Пуассона вероятность того, что случайная величина примет вполне определенное значение  $k$ , вычисляется по формуле

$$P_k = (a^k / k!) e^{-a}, \quad (3.14)$$

где  $a$  – математическое ожидание случайной величины (параметр закона Пуассона). От значения  $a$  зависит вид кривых распределения (рисунок 3.4).

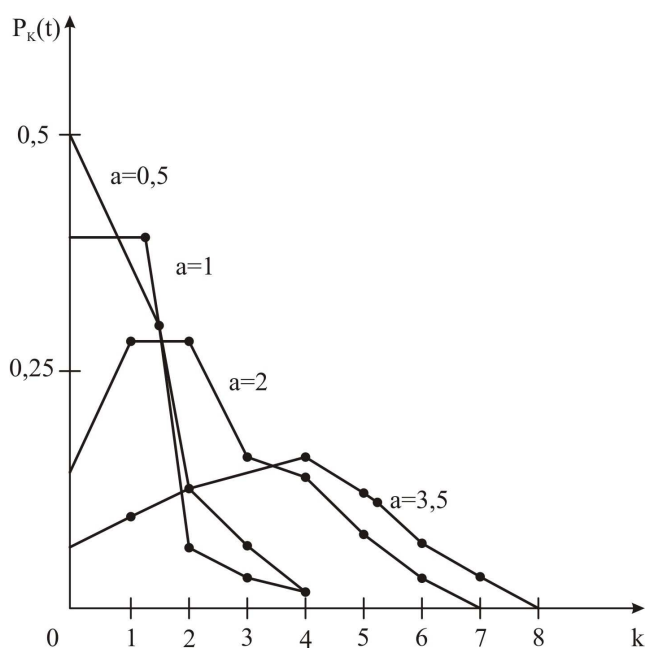


Рисунок 3.4 – Вид кривых распределения Пуассона

Дисперсия случайной величины  $t$  для указанного распределения равна мате-

математическому ожиданию  $D_t = a$ .

Среднее число отказов  $a = \lambda t$ , а интенсивность пуассоновского потока  $\mu(t) = k$ .

Интервалы времени для такого потока распределены по экспоненциальному закону. Распределение Пуассона применимо для оценки надежности ремонтируемых систем с простейшим потоком отказов.

**Пример 3.4.** Среднее число отказов ремонтируемого изделия за время  $t = 5000$  ч равно 10. Какова вероятность того, что за время  $\Delta t = 1000$  ч возникнет 3 отказа?

**Р е ш е н и е.**

Математическое ожидание числа отказов за время  $\Delta t = 1000$  ч

$$a = \frac{10}{5000} 1000 = 2, \text{ с учетом этого } P_{k=3} = [2^3 / (1 \cdot 2 \cdot 3)] e^{-2} = 0,18.$$

Рассмотренные выше законы распределения времени безотказной работы в значительной мере идеализированы. На практике при обработке результатов наблюдений закон распределения зачастую является композицией нескольких законов. Поэтому аппроксимацию законов распределения по статистическим данным следует производить лишь после тщательного анализа причин отказов с учетом физического состояния элементов.

## **4 Факторы, нарушающие надежность электроснабжения потребителей**

### **4.1 Влияние различных факторов на показатели надежности электрооборудования**

Чтобы решить проблему повышения надежности систем электроснабжения, необходимо каждый случай преждевременного отказа рассматривать как недопустимое событие и устанавливать истинную причину нарушения работоспособности. При проведении анализа отказов следует учитывать все факторы, приводящие к тому или иному виду отказа электрооборудования.

Все причины отказов могут быть сведены в три основные группы:

- ошибки при проектировании и изготовлении;
- ошибки эксплуатации;
- внешние причины, не зависящие от данного электротехнического изделия.

Типовыми дефектами проектирования являются:

- недостаточная защита узлов и механизмов от внешних воздействий;
- неправильный выбор режимов работы электрооборудования;
- ошибки в учете распределения токов и напряжений в узлах нагрузки;
- неправильный расчет несущей способности конструкций;
- неправильный выбор материалов;
- ошибки в моделировании и учете эксплуатационных нагрузок;
- дефекты из-за неправильного состава материалов, дефекты при сварке, обработке поверхностей, сборке.

Основными недостатками эксплуатации являются:

- нарушение условий применения электрооборудования;
- отсутствие четкой стратегии проведения мероприятий по поддержанию работоспособного состояния электрооборудования;
- несвоевременное и некачественное проведение эксплуатационно-технических мероприятий по обслуживанию электрооборудования;
- неправильные действия или бездействие электротехнического персонала в аварийных ситуациях;



- низкая квалификация обслуживающего персонала;
- недостаточное обеспечение ЗИП;
- несоблюдение правил технической эксплуатации электрооборудования.

При рассмотрении причин выхода из строя электрооборудования особое место занимают те воздействия, которые не зависят от самого электрооборудования и работы эксплуатационных подразделений, т.е. от внешних воздействия. Рассмотрим их более подробно.

Внешние воздействия связаны с влиянием на электрооборудование температуры, влажности, механических нагрузок.

Существенное влияние на температуру внутри электротехнических аппаратов оказывает *температура окружающей среды*. Сезонные колебания температуры достигают 60 ... 80 °С, а суточные 20 ... 40 °С. При воздействии солнечных лучей возможно повышение температуры до 40 °С, что приводит к повышению температуры отдельных электротехнических изделий и к повышению коэффициента нагрузки.

Немаловажным фактором является скорость и цикличность изменения температуры в аппаратах. Неблагоприятное воздействие на надежность оказывают как отрицательные, так и положительные изменения температуры. Особенно заметно возрастание интенсивности отказов при положительных температурах. Так, например, при увеличении температуры с 20 до 85 °С увеличивается интенсивность отказов полупроводниковых элементов в 2–3 раза.

Повышение температуры способствует распаду органических материалов, ухудшению изоляционных свойств различного рода заливок, обмоток, ухудшению механических свойств полимеров, что приводит к деформации деталей и выходу их из строя. Периодические смены низких и высоких температур особенно быстро приводят к разрушению обмоток трансформаторов, двигателей и другого электрооборудования.

При отрицательных температурах пластмассы теряют прочность, резиновые изделия становятся хрупкими, металлические изделия делаются ломкими. В образовавшиеся трещины изоляции попадает влага, снижая электрическую прочность изоляции.

*Повышенная влажность* является одним из факторов, оказывающим наибольшее отрицательное влияние на электротехнические изделия. Влажность характеризуется отношением влажности, представляющей собой измеряемое в процентах отношение фактически содержащихся в воздухе водяных паров к максимально возможному их содержанию к их данной температуре. Нормальной считается относительная влажность 60 ... 65 %. При влажности 80 % воздух считается сырым.

Воздействие влаги и атмосферных осадков на электрооборудование возможно путем поглощения водяных паров из воздуха, конденсации водяных паров на поверхностях аппаратов, смачивания брызгами дождя или снега, налипанием снега и льда на провода.

Повышенная влажность приводит к ухудшению электрических характеристик диэлектриков, падает удельное объемное и поверхностное сопротивление, уменьшается электрическая прочность. При воздействии влаги окисляются контакты, уменьшается сопротивление между выводами. Под влиянием влаги ускоряется разрушение лакокрасочных покрытий, нарушается герметизация и целостность заливок. Повышенная влажность приводит к коррозии металлических деталей, ухудшаются изоляционные свойства материалов.

Для учета влияния температуры и влажности на надежность оборудования вводится поправочный коэффициент, который в зависимости от их величины может находиться в диапазоне от 1 до 2,5.

Воздействие атмосферных осадков на провода воздушных линий электропередачи приводит к налипанию снега и льда на них, резко возрастают механические нагрузки на провода, сокращается стрела провеса, не исключается обрыв проводов. Для защиты линий электропередачи от этого неблагоприятного явления проводится плавка гололеда.

Для защиты электротехнических изделий от влаги применяются различные способы. Наиболее эффективным является разработка герметичной аппаратуры с резиновыми уплотнителями. В ряде случаев применяются влагозащитные изоляционные материалы (покрытие деталей лаком, заливка эпоксидной смолой и т.п.). Широко применяется пропитка, особенно при изготовлении моточных изделий. В

ряде случаев используют опрессовку – покрытие слоем изоляционного материала, образующегося из пластмасс в специальных формах.

Выбор того или другого метода обеспечения влагозащиты определяют исходя из конкретных условий эксплуатации электрооборудования. При этом необходимо помнить, что любой метод не устраняет в полной мере влияния влажности на надежность электротехнических изделий.

На надежность электрооборудования существенное влияние оказывает также загрязнение механическими и химическими примесями. Находящаяся в воздухе пыль представляет собой мельчайшие частицы горных пород, дыма промышленных предприятий, остатки растительных и животных организмов. В воздухе в зависимости от степени его загрязнения может находиться до 60 мг/м<sup>3</sup> пыли.

Находящаяся в воздухе пыль легко проникает в негерметизированные изделия, во вращающиеся электрические машины и механизмы. При этом снижается поверхностное сопротивление, забиваются вентиляционные каналы и ухудшаются условия охлаждения электрических машин, ускоряется износ подвижных частей и контактов, в ряде случаев изменяются параметры элементов. Особенно опасна пыль для устройств содержащие печатные платы и не защищенных специальным покрытием из-за возможности образования дополнительных токопроводящих цепочек.

Кроме пыли в атмосфере могут находиться сильнодействующие химические примеси, выбрасываемые промышленными предприятиями и автомобилями. Они увеличивают коррозию металлов, ускоряют процесс старения в пластмассах и органических диэлектриках. На морском побережье на надежность электротехнических изделий сильное влияние оказывают соли и соляные туманы. Для уменьшения влияния этого фактора необходимо применять герметизацию элементов и отдельных электротехнических изделий в целом, специальные влагостойкие и солестойкие покрытия.

*Механические нагрузки.* Механические перегрузки в проводах и других элементах линий электропередачи возникают в результате смещения опор. Устраняются путем проведения специальных эксплуатационных мероприятий по правке опор.

Для электрических машин, используемых в системах электроснабжения, характерно появление вибраций при нарушении соосности электрической машины и исполнительного механизма. Вибрации представляют собой сложные механические колебания. Характеристиками вибраций являются их продолжительность, диапазон частот и значение относительного ускорения (по отношению к ускорению свободного падения). Практика показывает, что наиболее опасными являются вибрации с частотой 100 ...150 Гц и 175 ... 500 Гц. Величина вибрации проверяется специальным прибором виброметром при вводе электрической машины в эксплуатацию, а также в процессе эксплуатации при осмотрах, текущих и капитальных ремонтах. Устраняются вибрации путем обеспечения соосности электрической машины и приводимого в действие механизма путем подкладки под лапы электрической машины специальных прокладок. При использовании стационарных резервных ДЭС и для отдельных электротехнических изделий с целью исключения повышенных вибраций применяются специальные амортизаторы.

Помимо объективных факторов, связанных с различными неблагоприятными для электротехнических изделий влияниями внешней среды, необходимо учитывать субъективные факторы, в той или иной мере зависящие от деятельности человека. К ним относятся все мероприятия, связанные с выбором схемных и конструктивных решений при проектировании, выбором элементов и материалов, обеспечение нормальных рабочих режимов, организации технических обслуживаний и ремонтов электрооборудования.

*Время эксплуатации и деятельность обслуживающего персонала.* Время эксплуатации является одним из основных факторов, определяющих надежность электрооборудования на всех этапах.

Технологические и конструктивные недоделки чаще всего возникают в первый период эксплуатации, т.к. в этот период выявляются многие явные и скрытые дефекты электроустановок и их элементов. Этот период для различного оборудования может колебаться от 1 до 10 % длительности периода нормальной эксплуатации.

После достаточно длительной эксплуатации (второй период), когда интенсивность отказов остается примерно постоянной, наступает последний, третий период, характеризующийся значительным возрастанием интенсивности отказов из-за

старения и износа элементов. Возрастание интенсивности отказов объясняется необратимыми изменениями параметров и характеристик элементов. Процессы старения идут непрерывно, но могут ускоряться под влиянием различных факторов (тепло, влага, свет, давление и т.п.).

Причиной старения являются сложные физико-химические процессы, происходящие в элементах электрооборудования в течение всего времени эксплуатации. К ним относятся: структурные изменения в диэлектриках и проводниках, химические превращения в связывающих и пропиточных материалах, нарушение электрической и механической прочности материалов и элементов конструкции, нарушение герметизации и т.д. Скорость старения также определяется режимами работы и интенсивностью воздействия различных факторов.

Значительное влияние на надежность электрооборудования в процессе его эксплуатации оказывают факторы субъективного характера, связанные с деятельностью обслуживающего персонала. Основными из них являются: квалификация обслуживающего персонала, соблюдение им правил технической эксплуатации, объем и качество проводимых эксплуатационных мероприятий.

Одним из важных факторов является квалификация обслуживающего персонала. Она сказывается на качестве подготовки электрооборудования к работе, на оперативности и правильности принятия решения по выводу электрооборудования в ремонт в аварийных ситуациях, на интенсивности процесса восстановления его работоспособности.

Строгое соблюдение правил технической эксплуатации способствует содержанию электроустановок в исправном состоянии, т.к. эти правила предусматривают действия обслуживающего персонала, которые обеспечивают качественную эксплуатацию электрооборудования.

Степень организованности системы технического обслуживания предполагает выбор правильной стратегии обслуживания электрооборудования и рационализация ее в процессе эксплуатации.

Следует отметить, что повышению эффективности эксплуатации способствуют также сбор, систематизация и обработка статистических данных по надежности электрооборудования. Полученные статистические данные и их анализ помогают лучше организовать систему технического обслуживания, обеспечение ЗИП.

Эти результаты также полезны и при разработке новых электротехнических изделий, т.к. помогают заранее учесть особенности эксплуатации и недостатки предыдущих разработок.

*Режимы работы электрооборудования.* Все электрооборудование, используемое в электрических сетях, характеризуется допустимой нагрузкой по мощности, току, напряжению. Работа элементов при предельно допустимой нагрузке сокращает срок их службы и не гарантирует надежной работы. Уменьшение нагрузки до оптимального значения увеличивает надежность работы элементов.

О значениях реальной нагрузки судят по статистическим данным эксплуатации и замерам режимов работы элементов. Для оценки режимов работы обычно используют коэффициент нагрузки по мощности (току) и по напряжению.

Коэффициент нагрузки по мощности

$$k_p = P_p / P_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

где  $P_p$  – фактическое значение мощности,

$P_{\text{ном}}$  – номинальное значение мощности.

Аналогично определяются коэффициенты по другим параметрам. При проектировании обычно принимается коэффициент электрических нагрузок 0,4 ... 0,6.

## **4.2 Статистика отказов и причины выхода из строя отдельных элементов систем электроснабжения**

Основным звеном в цепи электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей являются сети 0,38 ... 35 кВ, которые по протяженности составляют более 90 % сетей всех напряжений.

Имеющиеся в технической литературе результаты обработки статистических данных по надежности распределительных электрических сетей [17, 21, 23] показывают, что причины возникновения аварийных ситуаций можно разделить следующим образом:

- воздействие ветра и гололеда и последующее падение опор и обрыв проводов – 27%;

- грозовые перенапряжения, оказывающие влияние почти на все элементы сети – 24%;
- повреждение электрических сетей людьми и автотранспортом – 14%;
- неправильные действия персонала – 12%;
- дефекты изготовления и монтажа – 9%.

Остальные дефекты приходятся на загнивание опор, неудовлетворительное состояние трассы и другие причины.

Самым ненадежным звеном электрических сетей 10 кВ являются линии электропередачи, а наибольшей надежностью обладают ТП 35/10 и 10/0,4 кВ. При этом преднамеренные отключения составляют 45, а аварийные 55% от общего числа.

Сточки зрения распределения причин отключений сети 0,38 кВ значительно отличаются от сетей 10 (6) кВ, поскольку повреждения алюминиевых проводов в 6...7 раз больше, чем сталеалюминиевых.

Для многих сельскохозяйственных потребителей, в отличие от промышленных, характерен периодический и эпизодический характер протекания рабочих процессов не только на протяжении года, но и в течение суток. Установлено, что для таких потребителей наибольшее число отключений приходится на весну и лето, что объясняется большим объемом ремонтно-профилактических работ, проводимых перед летней эксплуатацией.

Анализ распределения отключений по часам суток показал, основная часть преднамеренных отключений происходит с 9 до 12 часов. Аварийные отключения распределяются в течение суток более равномерно.

*Надежность воздушных линий электропередачи (ВЛ).* Воздушные линии электропередачи и установленное на них оборудование (разъединители, разрядники, предохранители) в значительной мере определяют надежность электроснабжения. Их повреждения дают до 80 % аварий и плановых отключений потребителей. Причины и количество повреждений ВЛ обусловлены случайным характером внешних нагрузок, качеством и длительностью эксплуатации элементов ВЛ, а также имеющимися на предприятии материальными и трудовыми ресурсами для проведения профилактических мероприятий.

*Надежность проводов ВЛ 0,38 ... 35 кВ.* Провода и арматура являются наиболее повреждаемыми элементами ВЛ. Распределение обрывов проводов в течение

года, что большинство из них происходит в зимние месяцы. Основной причиной обрывов является некачественный монтаж ВЛ, перетяжка проводов при монтаже и проведении эксплуатационных мероприятий, некачественная вязка. Натяжение проводов со стрелами провеса более 10 % приводит к схлестыванию проводов, особенно если линия расположена поперек направления господствующих ветров. При этом если нет автоматического повторного включения, то из-за короткого замыкания линия отключается.

Повреждения проводов при пробоях или перекрытиях изоляторов характерны для ВЛ 6...35 кВ на железобетонных опорах, когда проволоки оплавляются и пережигаются от протекания емкостных токов или токов короткого замыкания при одновременном повреждении изоляторов в разных местах. При этом в 80 % случаев повреждения изоляторов приводят к ремонту проводов и в 40 % случаев к замене проводов.

Пережимы и истирания жил при пляске проводов, а также усталостные повреждения от вибраций возникают из-за конструктивных дефектов и ошибок при проектировании. Пляска проводов возникает при скорости ветра от 5 до 20 м/с и односторонних отложениях гололеда. При пляске проводов разрушаются в ослабленных местах провода, опоры или траверсы, выпадают и ломаются крюки (штыри), срываются изоляторы.

Механические повреждения проводов ВЛ приводят к обрывам и пережогам проволок и происходят при наездах транспорта на опоры, набросах на провода, перекрытии проводов на деревьях при ветре и дожде. На ВЛ 6 ... 35 кВ эти причины дают до 20, а в сетях 0,38 кВ – до 80 % повреждений проводов.

Основными причинами повреждения контактных зажимов являются их неправильный монтаж, применение нестандартных зажимов и способов соединения проводов. Однако такие элементы работают длительно и отличаются высокой надежностью.

*Надежность изоляторов.* На ВЛ до 35 кВ, как правило, применяются штыревые изоляторы. Подвесные изоляторы используются в целях повышения надежности ВЛ, в особо гололедных условиях и на анкерных опорах ответственных переходов.



Эксплуатационная надежность изоляторов зависит от соответствия их характеристик условиям работы, качества изготовления и монтажа. На железобетонных опорах ВЛ 10 (6) кВ в среднем повреждается до 1 %, а на деревянных 0,5 % изоляторов.

Основная причина повреждения изоляторов – их пробой и перекрытие от воздействия коммутационных и атмосферных перенапряжений и высокой температуры, которая возникает при перекрытии изоляторов электрической дугой. Дуга однофазного короткого замыкания может гореть при токах порядка 5 А, вызывая полное разрушения изолятора за время 1 мин. При междуфазных коротких замыканиях разрушение изоляторов происходит за 1,5 ... 2 с. Пробои изоляторов чаще всего происходят при грозе и наличии скрытых заводских дефектов, приводящих к появлению трещин, в которые попадает вода и изолятор становится токопроводящим.

Дефектами монтажа изоляторов чаще всего является несоответствие наружных размеров штырей и размеров полиэтиленовых гильз, монтаж изоляторов в полевых условиях без подогрева гильз в горячей воде и др.

Имеющиеся материалы выхода из строя изоляторов свидетельствуют о том, что количество повреждений изоляторов на железобетонных опорах в 4 ... 5 раз больше, чем на деревянных опорах.

*Надежность опор ВЛ.* Основные причины повреждения деревянных опор ориентировочно распределяются следующим образом: удары молнии – 40 %, воздействие ветра – 20 %, загнивание опор – 15 %, наезд автотранспорта – 3 %, некачественный монтаж – 6 %.

Загнивание деревянных опор обусловлено в основном отступлениями от технологии заготовки опор. При загнивании древесины не исключено возгорание опор из-за увеличения токов утечки в местах крепления изоляторов, а также выпадение крючьев. Другими причинами, приводящими к выпадению крючьев, являются пробой изоляторов и действие сильного ветра.

Железобетонные опоры чаще всего повреждаются из-за нарушения технологии их изготовления, что приводит к плохому сцеплению бетона с металлической арматурой, появляются трещины, неравномерность толщин стенок бетонной трубы, односторонний сдвиг арматурного каркаса относительно ствола опоры. В про-

цессе эксплуатации под воздействием знакопеременных нагрузок, периодического увлажнения и промерзания развиваются дефекты, которые не были выявлены ранее и возникают новые дефекты у таких опор.

Другой причиной снижения прочности железобетонных опор являются повреждения от протекания по телу опоры емкостных токов замыкания на землю в сети 6 ... 35 кВ. Случаи разрушения железобетонных опор при однофазных коротких замыканиях наблюдались при пробоях или повреждениях изоляторов, перекрытии их птицами, обрыве вязок проводов, падении проводов на металлические траверсы. При этом емкостной ток замыкания на землю, протекая по заземлению опоры, высушивает грунт. Из-за большого омического сопротивления зона бетон – грунт превращается в диэлектрик, который пробивается электрическими разрядами. В результате, разрушается железобетон, образуются раковины и трещины, опора становится не пригодной для дальнейшей эксплуатации. Кроме этого, может появиться опасное для жизни человека напряжение прикосновения к опоре и шаговое напряжение при приближении к ней.

*Надежность трансформаторных подстанций.* Процент распределения повреждений основных элементов трансформаторных подстанций можно представить следующим образом: трансформаторы – 77 %, низковольтные щиты и внутренняя коммутационная аппаратура – 12 %, разрядники – 11 %.

Надежность *трансформаторов* определяется показателями безотказности и ремонтпригодности. Средняя интенсивность отказов составляет  $\lambda_{\text{ср}} = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Среднее время текущего ремонта 2,4 ч, капитального ремонта – 7 ... 24 суток.

Характерными неисправностями трансформаторов являются случайные повреждения изоляции, магнитопроводов, обмоток, выводов, переключателей и других элементов.

Основной причиной повреждения проходных изоляторов являются атмосферные и внутренние перенапряжения. Большинство перенапряжений происходит из-за перекрытия изоляции при сырой погоде и попадании влаги через неплотности, из-за конденсации влаги и образования изморози на изоляторах. Пробой при внутренних перенапряжениях обусловлен в основном витковыми замыканиями высоковольтной обмотки.

Основной причиной повреждения изоляции обмоток трансформатора от перенапряжений является недостаточная импульсная прочность продольной изоляции (междувитковой, междукатушечной) и неудовлетворительным выравнивание импульсных потенциалов вдоль обмоток. Междувитковые замыкания и пробой изоляции обмоток на корпус происходят из-за того, что при заводских испытаниях не полностью учитываются климатические условия в период эксплуатации, а из-за воздействия внешней среды происходит ухудшение изоляции обмоток относительно корпуса.

Зарегистрированы случаи повреждения трансформаторов из-за сильной перегрузки, а также некомпетентных действий персонала при ликвидации аварий. Систематические перегрузки сверх допустимых значений приводят к ускоренной потере механической прочности и последующим повреждениям обмоток. В процессе эксплуатации у магнитопровода трансформатора может ослабляться прессовка стали и нарушаться изоляция стяжных болтов. Другой причиной ускоренного старения изоляции и повреждения трансформаторов несовершенство защиты на стороне 0,4 кВ. Предохранители и автоматические выключатели при коротких замыканиях в ВЛ 0,38 кВ длительно не отключают трансформаторы малых мощностей, что приводит к их повреждениям. К ускоренному старению изоляции может приводить также длительная эксплуатация трансформатора с температурой масла превышающей 75 °С, когда на поверхности обмоток и магнитопроводов образуется шлам.

Нарушения контактов выводов высокого и низкого напряжения, выводов переключателей, ответвлений и их контактов дают около 15 % повреждений. Они связаны с несовершенством конструкции соединений и ошибками эксплуатационного персонала.

Анализ повреждений оборудования комплектных трансформаторных подстанций (КТП) показывает, что независимо от конструкции, времени и условий эксплуатации наибольшее количество повреждений связано с отказами разъединителей 10 кВ и автоматических выключателей, установленных на стороне 0,4 кВ.

Показатели надежности разъединителей КТП изменяются в широких пределах. Около 90 % случаев повреждения разъединителей связано с перекрытием или пробоем при перенапряжениях, разрушением изоляторов при включениях и отклю-

чениях, а также нарушением контактов. Перекрытия опорных изоляторов при грозовых перенапряжениях являются основным видом повреждений разъединителей КТП, присоединяемых к ВЛ на деревянных опорах. На ВЛ с железобетонными опорами ослабленным местом является линейная изоляция, которая перекрывается и шунтирует опорные изоляторы разъединителей. Доля перекрытий опорных изоляторов КТП для линий электропередачи с железобетонными опорами составляет 15 %, для ВЛ с деревянными опорами – 80 %. Пробои и разрушения изоляторов связаны с недостаточной расчетной прочностью, неправильной армировкой, низким качеством фарфора и дефектами изготовления. Разрушения изоляторов при включениях, как правило, приводят к коротким замыканиям и представляют опасность для персонала.

Проходные изоляторы КТП повреждаются из-за тех же причин, но их удельная повреждаемость значительно меньше.

По причине повреждения *разрядников* происходит до 10 % всех отключений потребителей ТП. При этом, следует иметь ввиду, что сельские электрические сети имеют большую протяженность и малую передаваемую мощность, поэтому ток короткого замыкания в них изменяется в пределах 30 ... 1000 А. В силу этого, трубчатые разрядники типа РТ 6 (10) практически не пригодны, т.к. гасят сопровождающий ток 500 А и выше, а защитные промежутки – 170 ... 300 А. Вентильные разрядники типа РВП–10 гасят токи более 70 А, т.е. имеют приемлемые характеристики, но отличаются большой стоимостью. Условиям работы в сельских распределительных сетях в наибольшей степени отвечают вентильные разрядники РС–10, имеющие более низкие значения отключающих токов.

Анализ надежности низковольтных щитов и внутренней коммутационной аппаратуры КТП показал, что основной причиной выхода их из строя являются повреждения автоматических выключателей. Отказ их вызывает отключение низковольтных, а в отдельных случаях и высоковольтных линий электропередачи. Повреждениям подвержено до 15 % от всех установленных автоматических выключателей.

На ряде КТП установлены автоматические выключатели, не предназначенные для работы в условиях повышенной влажности и широкого диапазона температур. Неудовлетворительное уплотнение дверок в шкафах приводит к загрязне-

нию и ускоренному увлажнению аппаратуры. Пластмассовые детали при увлажнении и высыхании коробятся, в них образуются трещины. Ток, проходящий по влажной пластмассе, разрушает и пластмассу и контакты. Повреждения автоматических выключателей носят характер пробоя или перекрытия пластмассы. Другими причинами выхода из строя автоматических выключателей являются коррозия деталей и отказы механизма расцепления из-за разрегулировки, а также износ контактов.

## **5 Расчеты надежности**

При проектировании развития электрических систем и их эксплуатации возникают задачи оценки показателей надежности таких объектов по показателям надежности отдельных элементов, которые обычно известны из статистических данных. Конечной целью расчетов надежности системы электроснабжения является количественная оценка показателей надежности либо относительно конкретных узлов нагрузки, либо системы в целом и разработка на их основе мероприятий по повышению надежности.

Различают расчеты надежности при проектировании, они выполняются обычно с использованием аналитических методов и расчеты надежности по статистическим данным, полученным в процессе эксплуатации. Исследование надежности может также проводиться методом моделирования на ЭВМ.

### **5.1 Расчет надежности неремонтируемых систем при проектировании**

Общие требования к надежности изделия устанавливаются в зависимости от условий работы, назначения устройства, ущерба от отказов и других условий. Задаются они в разделе технического задания «Требования к надежности». Получив от главного конструктора установки требования к надежности отдельной подсистемы, например, электротехнического аппарата, разработчик проектирует его с учетом поставленных требований, komponуя аппарат из таких элементов и выполняя такие конструктивные мероприятия, которые обеспечат заданный уровень надежности.

Для определения показателей надежности объекта, состоящего из нескольких элементов, составляется структурная схема надежности. Структурная схема надежности – условная схема, которая учитывает влияние отказов отдельных элементов и связей между ними на работоспособность системы в целом. Трансформатор в структурной схеме надежности может быть представлен корпусом, обмотками высокого и низкого напряжений, магнитопроводом, изоляторами. Допустима и более мелкая градация элементов.

Различают два основных способа соединения элементов в систему в структурной схеме надежности – последовательное (основное) и параллельное (резервное).

Соединение элементов называется последовательным (рисунок 5.1), если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Система работоспособна, если исправны все элементы.

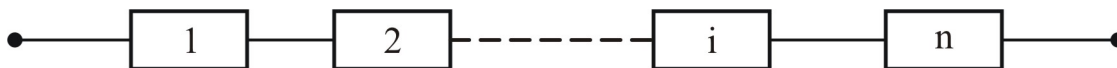


Рисунок 5.1 – Структурная схема надежности при последовательном соединении элементов

Соединение элементов называется параллельным (рисунок 5.2), если отказ в системе наступает только после отказа всех элементов.

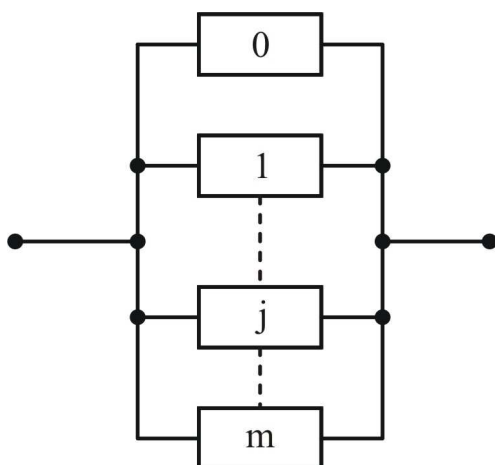


Рисунок 5.2 – Структурная схема надежности при параллельном соединении элементов

Параллельное включение элементов является эффективным средством повышения надежности объекта, позволяющим создавать электротехнические изделия, надежность которых будет выше надежности входящих в них элементов. Однако при резервировании оборудование усложняется, возрастают его габариты и масса, потребляемая мощность, стоимость. В системах электроснабжения резервирование используется достаточно часто. Устанавливаются резервные трансформаторы на трансформаторных подстанциях, применяются резервные дизельные электростанции, создается резервный запас оборудования.

Основным параметром резервирования является его кратность – отношение числа резервных элементов к числу основных.

Итак, для проведения расчетов по надежности на первом этапе необходимо составить структурную схему надежности.

Сущность самого расчета состоит в определении числовых значений показателей надежности  $P(t)$ ,  $T_1$  по известным значениям интенсивности отказов элементов, входящих в данное изделие. Интенсивности отказов электротехнического оборудования приводятся в справочной литературе.

**Пример 5.1.** Составить структурную схему надежности участка электрической сети состоящей из низковольтной, высоковольтной линий электропередачи и потребительской трансформаторной подстанции.

**Решение.**

1. Определяем основные функциональные узлы, влияющие на надежность работы участка сети. Такими узлами являются: провода высоковольтной линии (1), опоры этой линии (2), масляные выключатели (3), два трансформатора (4), секционированное низковольтное распределительное устройство (5) низковольтная линия электропередачи (6).

2. Составляем структурную схему надежности.

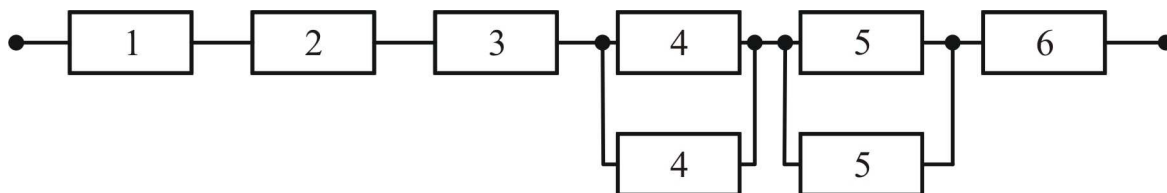


Рисунок 5.3 – Структурная схема надежности

*Расчет надежности при последовательном соединении элементов.*

Зависимость между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов элемента определяется по выражению (2.8). При этом предполагается, что время безотказной работы распределено по произвольному закону. Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов равна

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (5.1)$$

где  $n$  – число элементов в системе;

$P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.



Подставив в формулу (5.1) значение  $P_i(t)$  из (2.8), получим

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] = \exp \left[ - \int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt \right] = \exp \left[ - \int_0^t \Lambda_0(t) dt \right], \quad (5.2)$$

где  $\sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = \Lambda_0(t)$ .

В частном случае, когда интенсивность отказов можно считать постоянной (для экспоненциального закона)

$$\Lambda_0(t) = \Lambda = \text{const}, \quad P(t) = e^{-\Lambda t}. \quad (5.3)$$

**Пример 5.2.** Электрическая сеть, питающая насосную станцию, включает: высоковольтную линию  $P_{\text{ВВ}}(t) = 0,92$ , трансформатор  $P_{\text{Т}}(t) = 0,99$ , разъединитель  $P_{\text{Р}}(t) = 0,95$ , низковольтный фидер  $P_{\text{НВ}}(t) = 0,99$ . Вероятность безотказной работы определена за 5000 ч наработки. Вычислить вероятность безотказной работы электрической сети.

**Р е ш е н и е.**

$$P_c(t) = P_{\text{ВВ}}(t) \cdot P_{\text{Т}}(t) \cdot P_{\text{Р}}(t) \cdot P_{\text{НВ}}(t) = 0,92 \cdot 0,99 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 0,856.$$

*Расчет надежности при параллельном соединении элементов.*

Существует несколько способов резервирования. Резервирование называется общим, если резервируется вся система. Резервирование называется отдельным, если резервируются отдельные элементы системы. Реальные системы могут иметь также смешанное резервирование.

По способу включения резервных элементов различают постоянное резервирование и резервирование замещением. При постоянном резервировании резервный элемент подключается к основному в течение всего времени работы и находится с ним в одинаковом режиме. Например, таким способом могут включаться трансформаторы на двух трансформаторных подстанциях. При резервировании замещением резервный элемент подключается на место основного только после его отказа и принимает его функции.

При включении резерва замещением резервный элемент может находиться в нагруженном режиме, когда условия его работы и основного элемента совпадают, и ненагруженного резерва, когда ресурс начинает использоваться только после выхода из строя основного. Работа АВР сельских электрических сетей и использование резервных дизельных электростанций удачно демонстрируют указанный способ резервирования. При резервировании замещением обязательно наличие коммутирующих устройств для подключения резервных элементов взамен отказавших.

Если объект содержит несколько однотипных устройств, то нет необходимости иметь столько же резервных, можно использовать один или несколько элементов, которые будут подключаться на место вышедших из строя. Такое резервирование замещением называется скользящим.

Рассмотрим определение количественных характеристик надежности при общем резервировании. Структурная схема надежности для этого случая показана на рисунке 5.4.

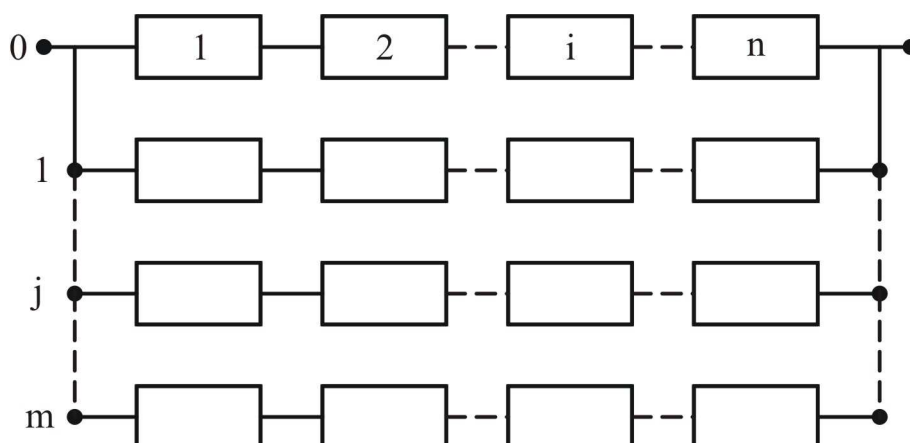


Рисунок 5.4 – Схема общего резервирования

Система с постоянным включением резерва будет нормально функционировать при сохранении работоспособности хотя бы одной из цепей. На основании теоремы умножения вероятностей вероятность отказа такой системы

$$Q(t) = \prod_{j=0}^m Q_j(t) = \prod_{j=0}^m [1 - P_j(t)]. \quad (5.4)$$

В свою очередь вероятность безотказной работы  $j$ -й резервной цепи, содержащей  $n$  элементов

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n p_{ij}(t). \quad (5.5)$$

После подстановки получим

$$P(t) = 1 - \prod_{j=0}^m \left[ 1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}(t) \right]. \quad (5.6)$$

Наработка до первого отказа может быть вычислена по формуле

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.7)$$

В том случае когда основная и резервные цепи имеют одинаковую надежность

$$P(t) = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}. \quad (5.8)$$

При экспоненциальном законе надежности, когда основная и все резервные цепи равно надежны и время наработки до первого отказа всех элементов подчинено экспоненциальному закону распределения

$$P(t) = 1 - \left[ 1 - e^{-\Lambda t} \right]^{m+1}, \quad (5.9)$$

где  $\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  – интенсивность отказов последовательной цепи.

Недостаток общего резервирования с постоянным включением резервной системы заключается в значительном увеличении объема используемого оборудования. Его рекомендуется применять при небольшой кратности резервирования (наибольший выигрыш имеет место при  $m = 1$ ). Основные достоинства способа – простота и экономичность.

При включении резерва замещением необходимо учитывать режимы работы резервных элементов, которые могут быть различными. Аналитические методы

расчета показателей надежности в этом случае достаточно громоздки. Поэтому на практике обычно ограничиваются случаем, когда наработка до первого отказа элементов в системе подчиняется экспоненциальному закону распределения. При этом случайный процесс, происходящий в системе, является марковским и для расчета надежности можно воспользоваться математическим аппаратом марковских цепей.

При ненагруженном общем резерве вероятность безотказной работы системы, состоящей из  $m$  резервных цепей, определяется по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t} \sum_{j=0}^m \frac{(\Lambda t)^j}{j!}, \quad (5.10)$$

где  $\Lambda$  – интенсивность отказов нерезервированной цепи;

$m$  – число резервных цепей.

Наработка до отказа равна  $T_1 = T_{10} (m + 1)$ , где  $T_{10}$  – наработка до отказа основной (нерезервированной) цепи.

Помимо общего, часто используется отдельное резервирование. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 5.5.

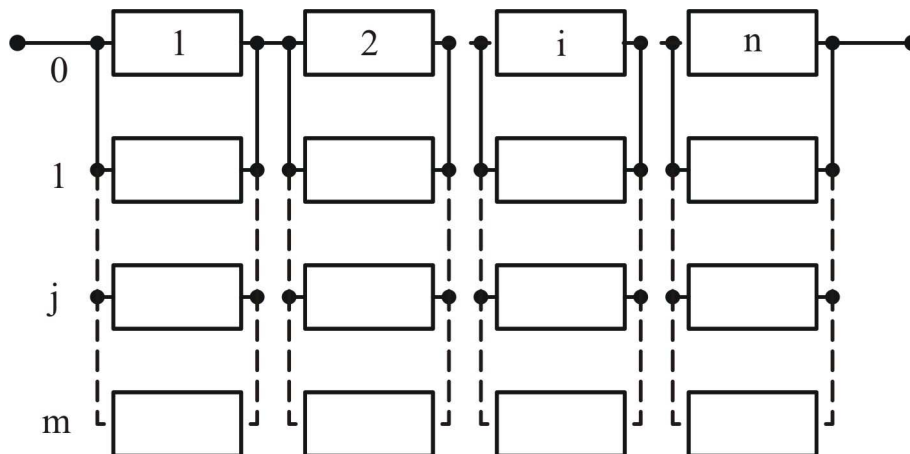


Рисунок 5.5 – Структурная схема с отдельным резервированием

В данном случае объект может быть представлен в виде последовательного соединения  $n$  секций, каждая из которых содержит  $m + 1$  параллельно включенных элементов. Система находится в состоянии работоспособности, если исправно работают все  $n$  секций. В свою очередь, отказ любой из секций наступает в том случае, если откажут все  $m + 1$  элементов секций.

Вероятность безотказной работы системы

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (5.11)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы секции.

В свою очередь вероятность безотказной работы секции

$$P_i(t) = 1 - \prod_{j=0}^m [1 - p_{ij}(t)]. \quad (5.12)$$

После подстановки получим

$$P_i(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=0}^m [1 - p_{ij}(t)] \right\}. \quad (5.13)$$

Так как основной и резервирующий его элементы могут быть равно надежны, то можно записать

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1} \right\}. \quad (5.14)$$

При экспоненциальном законе наработки до первого отказа и при равной надежности элементов, входящих в одну секцию

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m+1} \right\}. \quad (5.15)$$

При включении резерва замещением целесообразно определить вероятность безотказной работы секции  $P_i(t)$  рассмотренными выше методами, а затем определить вероятность безотказной работы последовательной системы

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (5.16)$$

Вероятность безотказной работы при отдельном резервировании выше вероятности безотказной работы системы с общим резервированием при прочих равных условиях.

При отдельном резервировании замещением в схему вводят переключающие устройства. Система усложняется, и при большом количестве и низкой надежности переключающих устройств надежность резервированной системы может оказаться ниже системы с общим резервированием и даже нерезервированных систем. Отсюда возникает задача создания высоконадежных переключающих устройств.

**Пример 5.3.** Электроустановка состоит из высоковольтной линии 10 кВ, трансформатора, распределительного устройства, низковольтной сети. Интенсивности отказов узлов  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ . Закон распределения наработки до отказа экспоненциальный. Определить вероятность безотказной работы и наработку до отказа электроустановки при общем и отдельном резервировании. Рассмотреть варианты нагруженного и ненагруженного резерва с  $m = 1$ . Контрольная аппаратура и система коммутации идеально надежны.

**Решение.**

1. Определим характеристики надежности основной нерезервированной электроустановки, состоящей из четырех элементов

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^4 \lambda_i = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t} = e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t}.$$

$$T_{11} = \int_0^{\infty} P_1(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} dt = 1250 \text{ ч}.$$

2. Вычислим характеристики надежности для общего резервирования.

*Нагруженное резервирование*

$$P_2(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^2 = 1 - [1 - e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t}]^2 = 2e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} - e^{-1,6 \cdot 10^{-3} t}.$$

$$T_{12} = \int_0^{\infty} P_2(t) dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} dt - \int_0^{\infty} e^{-1,6 \cdot 10^{-3} t} dt = 2500 - 625 = 1875 \text{ ч}.$$

### *Ненагруженное резервирование*

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} \sum_{j=0}^1 \frac{(\lambda_1 t)^j}{j!} = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) = e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} (1 + 0,8 \cdot 10^{-3} t).$$

$$T_{13} = (m+1)/\lambda_1 = 2/(0,8 \cdot 10^{-3}) = 2500 \text{ ч}.$$

3. Рассчитаем количественные характеристики надежности при отдельном резервировании.

### *Нагруженное резервирование*

$$P_4(t) = \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - e^{\lambda_i t})^2].$$

После подстановки соответствующих значений интенсивностей отказов подсистем получим

$$P_4(t) = [1 - (1 - e^{-0,3 \cdot 10^{-3} t})^2]^2 \cdot [1 - (1 - e^{-0,1 \cdot 10^{-3} t})^2]^2.$$

Среднее время безотказной работы

$$T_{14} = \int_0^{\infty} P_4(t) dt = 2748 \text{ ч}.$$

### *Ненагруженное резервирование*

Для расчета вероятности безотказной работы системы  $P_5(t)$  определяется вначале вероятность безотказной работы секции  $P_i(t)$ , содержащей один однократно резервированный узел

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} (1 + \lambda_i t).$$

Система состоит из четырех последовательно соединенных секций, в связи с чем

$$P_5(t) = \prod_{i=1}^4 P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^4 \lambda_i t} \cdot \prod_{i=1}^4 (1 + \lambda_i t) = e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} (1 + 0,3 \cdot 10^{-3} t)^2 \cdot (1 + 0,1 \cdot 10^{-3} t)^2.$$

Среднее время безотказной работы

$$T_{15} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-0,8 \cdot 10^{-3} t} (1 + 0,3 \cdot 10^{-3} t)^2 (1 + 0,1 \cdot 10^{-3} t)^2 dt = 3776 \text{ ч}.$$

## **5.2 Расчет надежности восстанавливаемых систем**

### **5.2.1 Элементы теории массового обслуживания**

Электрооборудование электрических сетей в процессе эксплуатации, как правило, после возникновения отказа восстанавливается. Процесс возникновения отказов, оценка показателей надежности ремонтируемых объектов, организация и проведение технических обслуживаний и ремонтов, снабжение запасными частями и многие другие вопросы теории и практики эксплуатации электроустановок могут быть решены с использованием теории массового обслуживания.

Теория массового обслуживания – раздел теории вероятностей. Системой массового обслуживания (СМО) называется система, состоящая из определенного числа обслуживаемых единиц, которые называются каналами обслуживания. Основными элементами системы массового обслуживания являются поток событий, число каналов и быстродействие каждого из них. Типичной системой массового обслуживания является система электроснабжения. В ней поток заявок на обслуживание представляет поток отказов электрооборудования, каналами являются ремонтные бригады, восстанавливающие работоспособность. При ограниченном числе ремонтных бригад, обслуживающих систему, может образоваться очередь на обслуживание отказавших участков сети.

Одно из основных понятий теории массового обслуживания – поток событий, который представляет собой последовательность однородных событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени. Поток событий называется простейшим, если он обладает свойством ординарности, стационарности и отсутствием последствия.

Ординарность потока означает, что вероятность появления двух событий и более в один и тот же момент времени практически отсутствует.

Стационарность потока означает, что вероятность попадания того или иного события на участок длиной  $t + \Delta t$  не зависит от  $t$ , а зависит от длины участка  $\Delta t$ .

Отсутствие последствия заключается в том, что для двух отрезков времени  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  число событий, попадающих в один из них, не зависит от числа событий, попадающих в другой.

Простейший поток играет особую роль при исследовании надежности ремонтируемых систем. Установлено, что при наложении нескольких простейших потоков результирующий поток также будет простейшим, и кроме того известно, что для простейшего потока промежутки времени между событиями распределены



по показательному закону. Существуют и другие потоки событий – поток Пальма (поток с ограниченным последствием), поток Эрланга (получается путем прореживания простейшего потока) и др.

Системы массового обслуживания делятся на два типа: системы с отказами и системы с ожиданием. В системах с отказами заявка, поступившая в момент, когда все каналы заняты, получает отказ, покидает систему и в обслуживании не участвует. В системах с ожиданием при поступлении заявки и всех занятых каналах она становится в очередь и ожидает, пока не освободится какой-либо канал. Для процесса эксплуатации электрооборудования систем электроснабжения характерно именно использование систем массового обслуживания с ожиданием, причем ожидание неограниченное.

Работа СМО определяется следующими параметрами:

- числом каналов  $n$ ,
- плотностью потока заявок  $\lambda$ ,
- плотностью потока обслуживания одного канала  $\mu$ ,
- числом состояний системы  $k$ .

При этом

$$\mu = 1/T_0, \quad (5.17)$$

где  $T_0$  – среднее время обслуживания одной заявки.

*СМО с отказами*

Вероятность состояния СМО с отказами определяется по формуле Эрланга [12]

$$P_k = \frac{\alpha^k/k!}{\sum_{k=0}^n \alpha^k/k!}, \quad (0 \leq k \leq n), \quad (5.18)$$

где  $\alpha = \lambda/\mu = \lambda T_0$  – приведенная плотность потока заявок.

Вероятность отказа (вероятность того, что поступившая заявка найдет все каналы занятыми)

$$P_{\text{отк}} = \frac{\alpha^n/n!}{\sum_{k=0}^n \alpha^k/k!}, \quad (0 \leq k \leq n). \quad (5.19)$$

Для одноканальной системы

$$P_{\text{отк}} = \alpha/(1+\alpha). \quad (5.20)$$

*СМО с ожиданием*

В практике работы эксплуатационных подразделений электрических сетей такие системы встречаются наиболее часто. Для СМО с ожиданием обычно определяют вероятности состояний, среднюю длину очереди, среднее время пребывания в очереди.

Вероятности состояний СМО с ожиданием при установившемся режиме работы рассчитывают по формуле

$$P_k = \frac{a^k/k!}{\sum_{k=0}^n a^k/k! + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}}, \quad (0 \leq k \leq n). \quad (5.21)$$

Вероятность наличия очереди

$$R_0 = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n). \quad (5.22)$$

Средняя длина очереди

$$m_0 = \frac{\frac{a^{n+1}}{n \cdot n! (1 - a/n)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n! (n-a)}}. \quad (5.23)$$

Среднее время пребывания в очереди

$$t_0 = m_0/\lambda. \quad (5.24)$$

**Пример 5.4.** Система диспетчерской связи энергосистемы имеет 5 каналов. В систему поступает простейший поток заявок с плотностью  $\lambda = 4$  вызова в минуту. Средняя продолжительность разговора 3 минуты. Определить вероятность заставить систему диспетчерской связи занятой.

**Решение.**

1. Определяем приведенную плотность потока заявок  $\lambda/\mu = \lambda T_0 = 4 \cdot 3 = 12$ .

2. По формуле  $P_{\text{отк}} = \frac{\alpha^n/n!}{\sum_{k=0}^n \alpha^k/k!}$  определяем

$$P_{\text{отк.}} = 12^5/[5! (1 + 12/1 + 12^2/2! + 12^3/3! + 12^4/4! + 12^5/5!)] = 0,63.$$

### 5.2.2 Определение показателей надежности восстанавливаемых систем

Количественные характеристики показателей надежности зависят от состояния системы в каждый момент времени. Процессы изменения состояний системы, на которые в основном влияют случайные отказы отдельных элементов, описываются с использованием пуассоновских случайных процессов (редкие случайные явления). При экспоненциальном распределении времени между отказами и экспоненциальном распределении времени продолжительностей состояний отказов создаются возможности применения хорошо разработанного аппарата теории массового обслуживания и, в частности, аппарата так называемых марковских случайных процессов

Математический аппарат, применяемый при анализе надежности восстанавливаемых систем, базируется на марковской модели с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Для этого необходимо, чтобы потоки, переводящие систему из состояния в состояние, были пуассоновскими, а законы распределения наработки до отказа и времени восстановления были экспоненциальными. Метод сочетается с представлением структуры системы в виде состояний и переходов.

Процесс называется марковским, если для каждого момента времени вероятность любого состояния элемента или системы в будущем зависит только от состояния в настоящий момент, и не зависит от того, каким образом элемент пришел

в это состояние. Возможность использования марковских случайных процессов применительно к системам электроснабжения обусловлена следующими соображениями.

В системах электроснабжения в большинстве случаев каждый элемент является достаточно надежным и отказывает сравнительно редко. Поток отказов каждого элемента образуется из суммы потоков его отдельных частей (конструктивных элементов). Эти потоки обычно независимы. Например, надежность линии электропередачи определяется надежностью опор, проводов, гирлянд изоляторов и т.д. Аналогичное заключение можно сделать относительно системы электроснабжения в целом и ее подсистем. Появление отказа элемента на одном интервале времени почти не влияет на появление отказов в другое время, если не рассматривать каскадное развитие аварии. Поэтому поток отказов таких элементов, подсистемы и системы в целом можно рассматривать как пуассоновский.

Это условие может быть нарушено, если в состав подсистемы входят отдельные мало надежные элементы.

Следует отметить, что в период приработки элемента и в период интенсивного старения и износа поток отказов элементов не обладает марковским свойством. На практике эти периоды стремятся по возможности сократить предварительными испытаниями ряда элементов системы электроснабжения до начала эксплуатации и своевременной заменой устаревшего, изношенного оборудования. Поэтому далее будут рассмотрены математические модели, соответствующие нормальным условиям работы элементов (подсистем), как представляющие наибольший интерес для практики.

Решение различных задач по оценке надежности с использованием марковского метода предполагает применение единого методического подхода.

Процесс исследования системы в этом случае разворачивается в следующей последовательности.

1. Вводится понятие состояния системы. При расчетах надежности системы электроснабжения это будет чередующийся процесс отказов и восстановлений системы.

2. Описываются все состояния системы, в которых она может находиться. Множество состояний системы представляется в виде вектора  $\vec{\psi} = \langle 0, 1, \dots, b \rangle$ . При этом  $N = b + 1$  – общее число состояний системы.

3. Составляется граф состояний системы в следующем виде (рисунок 5.6)

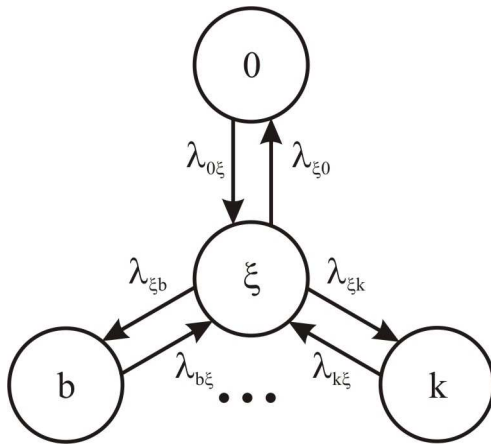


Рисунок 5.6 - Граф состояний системы

4. Определяется вектор начальных условий

$$\vec{P}(0) = \vec{P}_0 = \langle P_0(0), P_1(0), \dots, P_b(0) \rangle.$$

5. Для каждого возможного перехода указывается интенсивность  $\lambda_{\xi k}$ . Составляется матрица переходов  $\Lambda = \|\lambda_{\xi k}\|_{NN}$ .

6. Вводится вектор вероятности состояния:  $\vec{P}(t) = \langle P_0(t), P_1(t), \dots, P_b(t) \rangle$ , где  $P_\xi$  – вероятность пребывания системы в  $\xi$ -м состоянии в момент времени  $t$ . Поскольку события, отображающие вероятности  $P_\xi(t)$ , образуют полную группу, то  $\sum_{\xi=1}^b P_\xi(t) = 1$  рассматривается как нормировочное условие. Задача сводится к определению вектора переходных вероятностей, который позволяет определить необходимые показатели надежности.

7. Составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова

$$\frac{dP_\xi(t)}{dt} = -P_\xi(t) \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq \xi}}^b \lambda_{\xi k} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq \xi}}^b \lambda_{k\xi} P_k(t), \quad (5.25)$$

$$k = 1, 2, \dots, b; \quad P_\xi(0) = P_{\xi 0}.$$

Указанную систему дифференциальных уравнений можно построить формально по графу состояний с соблюдением определенных правил.

В матричной форме уравнение Колмогорова записывается в следующем виде

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha P(t), P(0) = P_0, \quad (5.26)$$

$$\text{где } \alpha = \|\alpha_{\xi k}\|_{NN}, \alpha_{\xi k} = \begin{cases} \lambda_{k\xi} & \text{при } \xi \neq k \\ -\sum_{l=0}^b \lambda_{\xi l} & \text{при } \xi = k \end{cases},$$

или используя условие нормировки, после преобразования, получим

$$\frac{dP(t)}{dt} = \beta P(t) = C, \quad (5.27)$$

$$\text{где } \beta = \|\beta_{\xi k}\|_{bb}, \beta_{\xi k} = \begin{cases} -\lambda_{0\xi} - \lambda_{k\xi} & \text{при } \xi \neq k \\ -\lambda_{0\xi} - \sum_{l=0}^b \lambda_{\xi l} & \text{при } \xi = k \end{cases},$$

$$C = \langle \lambda_{01}, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0b} \rangle.$$

8. Решается система уравнений, или задача упрощается путем перехода к предельным вероятностям и сведения рассматриваемой системы уравнений к системе алгебраических уравнений. Уравнение Колмогорова представляет собой систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, записанных в форме уравнений состояния. Численное решение такой системы уравнений может быть осуществлено с использованием стандартных программ, реализуемых на ЭВМ.

Для практических целей во многих случаях оказывается весьма удобным выполнить решение системы дифференциальных уравнений на основе преобразования Лапласа (в том числе и реализуемого на ЭВМ). После операторного преобразования Лапласа уравнение Колмогорова примет вид

$$sP(s) = \beta P(s) - P(0), \quad (5.28)$$

где  $P(s)$  – матрица-столбец искомых вероятностей;

$\beta$  – матрица коэффициентов переходов;  $P(0)$  – матрица-столбец начальных значений вероятностей.

Решая уравнение (5.28), получаем

$$P(s) = [sI - \beta]^{-1} P(0), \quad (5.29)$$

где  $I$  – единичная матрица.

9. Поскольку процесс функционирования системы электроснабжения рассматривается на длительном отрезке времени (в течение нескольких лет), закономерен переход к предельным вероятностям. При существовании предельного стационарного режима система электроснабжения случайным образом меняет свои состояния, но вероятность каждого из них уже не зависит от времени, то есть каждое из состояний осуществляется с некоторой постоянной вероятностью, представляющей не что иное, как среднее относительное время пребывания системы в данном состоянии. Вектор финальных вероятностей, характеризующих стационарный режим,

$$\vec{P}_{\infty} = \langle P_{1\infty}, P_{2\infty}, \dots, P_{b\infty} \rangle, \quad (5.30)$$

где  $P_{\xi\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{\xi}(t)$ ,  $\xi = 1, 2, \dots, b$  определяется укороченным уравнением Колмогорова.

$$\beta P_{\infty} = -C. \quad (5.31)$$

Это уравнение с учетом того, что  $\sum_{\xi=1}^b P_{\xi\infty} = 1$  позволяет найти вероятности всех состояний.

10. Используя вероятности состояний, определяем требуемые показатели надежности.

Уравнения марковских процессов дают возможность получать как вероятности состояний (например, коэффициент готовности), так и вероятность наступле-

ния тех или иных событий (вероятность безотказной работы или отказа). В последнем случае искомое событие связывают с попаданием в поглощающее состояние.

Используя приведенный подход, рассмотрим вопрос оценки надежности восстанавливаемых систем электроснабжения с учетом специфики их построения.

*Электротехническое изделие без резервирования* может находиться в двух состояниях:  $E_0$  – работоспособное,  $E_1$  – неработоспособное. Если  $\lambda$  – интенсивность отказов, а  $\mu$  – интенсивность восстановления, то граф состояний будет иметь вид, показанный на рисунке 5.7.

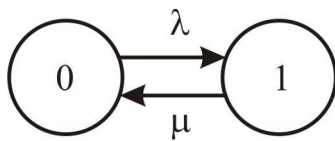


Рисунок 5.7 – Граф состояний установки

Систему дифференциальных уравнений относительно вероятностей переходов можно представить следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0' = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1' = -P_1(t) + P_0(t). \end{array} \right. \quad (5.32)$$

При начальных условиях  $P_0(0) = 1$ ,  $P_1(0) = 0$  и предположении, что события  $E_0$  и  $E_1$  представляют полную группу событий, система уравнений (5.32) решается следующим путем. На основании преобразования Лапласа можно записать

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon P_0(\varepsilon) = -\lambda P_0(\varepsilon) + \mu P_1(\varepsilon), \\ \varepsilon P_1(\varepsilon) = \mu P_1(\varepsilon) + \lambda P_0(\varepsilon). \end{array} \right. \quad (5.33)$$

Методом подстановки определяем

$$P_0(\varepsilon) = (\varepsilon + \mu)/(\varepsilon + \lambda + \mu)\varepsilon. \quad (5.34)$$

Коэффициент готовности, как вероятность нахождения установки в работоспособном состоянии, можно определить обратным преобразованием Лапласа



$$k_r(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (5.35)$$

При значениях  $t$ , стремящихся к бесконечности, устанавливается стационарный режим и  $P_0$  перестает зависеть от времени. В этом случае

$$k_r = \mu / (\lambda + \mu). \quad (5.36)$$

Поскольку для простейшего потока  $\lambda = 1/T$ , а  $\mu = 1/T_B$ , то

$$k_r = T / (T + T_B). \quad (5.37)$$

**Пример 5.5.** В системе электроснабжения потребителя включено два предохранителя. Интенсивность отказов каждого из них  $\lambda = 5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ , интенсивность восстановления  $\mu = 2 \text{ ч}^{-1}$ . При отказе любого из предохранителей электроустановка не работоспособна. При этом исправный предохранитель не отключается, и в нем могут происходить отказы. Необходимо определить коэффициент готовности.

**Решение.**

Система электроснабжения может находиться в одном из трех состояний:

0 – оба предохранителя исправны,

1 – вышел из строя один предохранитель,

2 – вышли из строя оба предохранителя.

Потребитель получает питание только в состоянии 0 и не получает его в состояниях 1 и 2.

Граф состояний системы показан на рисунке 5.8.

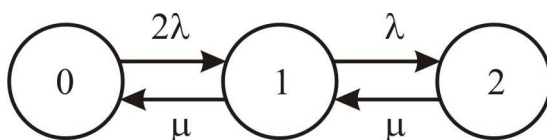


Рисунок 5.8 – Граф состояний системы питания с двумя предохранителями

Для данной схемы можно составить систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} P_0'(t) = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1'(t) = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t) + \mu P_2, \\ P_2'(t) = \lambda P_1 + \mu P_2. \end{cases}$$

При значении  $t \rightarrow \infty$ , получим систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 2\lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + \mu P_2 = 0, \\ \lambda P_1 + \mu P_2 = 0. \end{cases}$$

Используя нормировочное условие  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ , и заменяя им любое уравнение системы, получим систему уравнений, которую можно решить либо подстановкой, либо с помощью правила Крамера. В результате получим

$$P_0 = \mu^2 / (\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2);$$

$$P_1 = 2\lambda\mu / (\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2); P_2 = 2\lambda^2 / (\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2).$$

$$\begin{aligned} \text{Коэффициент готовности системы равен } k_r = P_0 = \mu^2 / (\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2) = \\ = 2^2 / [2^2 + 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2] = 0,995. \end{aligned}$$

*Система, состоящая из последовательных восстанавливаемых элементов.*

Система, состоящая из нескольких последовательно соединенных элементов, прекращает свою работу всякий раз, как только повреждается любой из этих элементов. На практике потоки отказов элементов систем электроснабжения обладают свойством ординарности, которое позволяет пренебречь одновременным отказом более одного элемента.

Система, состоящая из  $n$  одинаковых последовательно соединенных элементов, имеет два состояния (рисунок 5.9) «0» – все элементы находятся в работоспособном состоянии, «1» – один из элементов отказал.

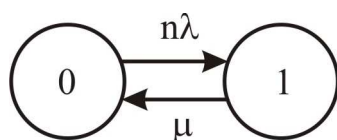


Рисунок 5.9 – Граф состояний системы из  $n$  последовательно соединенных элементов

Система уравнений состояния при различных начальных условиях будет иметь вид

$$\begin{cases} P_0' = -n\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1' = -P_1(t) + nP_0(t). \end{cases} \quad (5.38)$$

Решая систему полученных дифференциальных уравнений при начальных условиях  $P_0(0) = 1$ ,  $P_1(0) = 0$ , получаем

$$k_r(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{n\lambda + \mu} + \frac{n\lambda}{\mu + n\lambda} e^{-(n\lambda + \mu)t}. \quad (5.39)$$

Для стационарного состояния ( $t \rightarrow \infty$ ) коэффициент готовности

$$k_{r.c} = \mu / (n\lambda + \mu) = \frac{1}{n\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + n \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{T}{nT_v + T}. \quad (5.40)$$

Если элементы системы имеют различные показатели надежности, т.е. различные значения  $\lambda_i$  и  $\mu_i$ , то система может находиться в  $n$  различных состояниях по продолжительности с вероятностями

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} P_0 = \frac{\lambda_i}{\mu_i} k_{r.c}. \quad (5.41)$$

Стационарный коэффициент готовности в этом случае определяется по формуле

$$k_{r.c} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{k_{r,i}} - 1 \right)}. \quad (5.42)$$

Для высоконадежных элементов систем электроснабжения при относительно небольшом значении  $n$  в практических расчетах используется приближенная формула

$$k_{г.с} \cong \prod_{i=1}^n k_{г.i}. \quad (5.43)$$

Сложнее решается задача определения показателей надежности *ремонтимруемых объектов при наличии резервирования*. Но методический подход остается тем же, т.е. составляется граф состояний системы, записывается система дифференциальных уравнений Колмогорова, представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, записанных в форме уравнений состояния. Если рассматривается стационарный режим, то осуществляется переход к системе алгебраических уравнений. Дополнительно используется условие нормировки, базирующееся на том, что состояния системы составляют полную группу событий. Решается система алгебраических уравнений либо методом подстановки, либо с использованием правила Крамера. Определяются показатели надежности. При этом, помимо коэффициента готовности и коэффициента простоя, рассматриваемых в качестве основных показателей для таких устройств, используется функция надежности, (вероятность того, что в интервале времени  $0, t$  не произойдет отказа), а также наработка до отказа (в этом случае имеется «поглощающее» состояние и необходимо решить полную систему дифференциальных уравнений при соответствующих начальных условиях). В отдельных задачах определяется также средний период ремонтов.

Поскольку определяющее значение при разработке таких систем отводится однократному резервированию, целесообразно вначале рассматривать дублирование многократно используемого электротехнического агрегата с одной ремонтной бригадой при ненагруженном и нагруженном резервировании. В этом случае будет три состояния системы:

- 0 – оба агрегата работоспособны;
- 1 – один агрегат восстанавливается, а другой работает;
- 2 – оба агрегата восстанавливаются.

Структурная схема состояний системы для рассматриваемого случая приведена на рисунке 5.10.

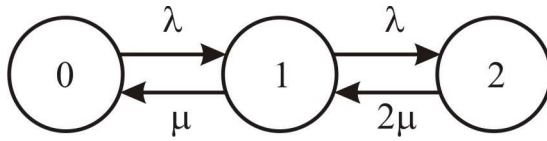


Рисунок 5.10 – Граф переходов дублированной системы

Решение уравнения Колмогорова при рассмотрении предельного стационарного режима (при  $t \rightarrow \infty$ ) дает следующие формулы для вероятностей состояния

$$P_0 = 1 - \frac{(v+1)\lambda(\lambda + \mu)}{(v+1)\lambda^2 + (v+1)\lambda\mu + \mu^2}, \quad (5.44)$$

$$P_1 = 1 - \frac{(v+1)\lambda\mu}{(v+1)\lambda^2 + (v+1)\lambda\mu + \mu^2}, \quad (5.45)$$

$$P_2 = 1 - \frac{(v+1)\lambda^2}{(v+1)\lambda^2 + (v+1)\lambda\mu + \mu^2}, \quad (5.46)$$

где  $v = 1$  – соответствует нагруженному резерву,  $v = 0$  – ненагруженному резерву.

Коэффициент готовности определяется по формуле

$$k_r = 1 - P_2 = \frac{(v+1)\lambda\mu + \mu^2}{(v+1)\lambda^2 + (v+1)\lambda\mu + \mu^2}. \quad (5.47)$$

Сопоставление коэффициентов готовности дублированной системы при нагруженном и ненагруженном резерве (рисунок 5.11) показало, что существенного выигрыша в надежности в этом случае не происходит.

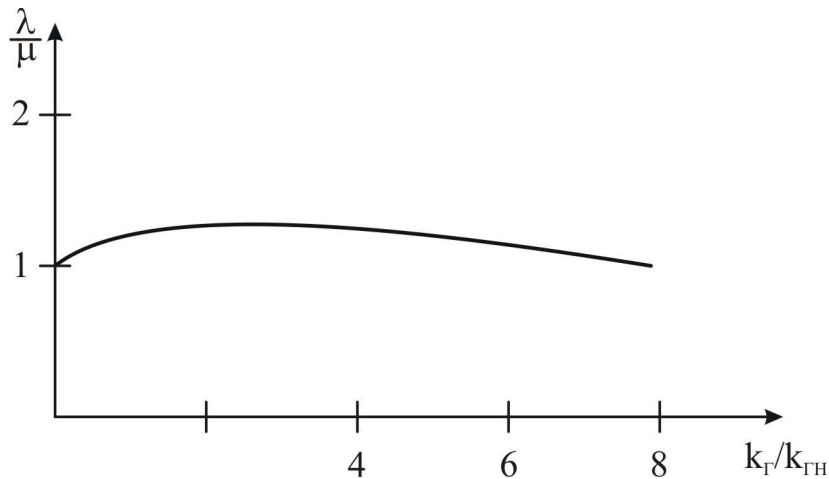


Рисунок 5.11 – Отношение коэффициентов готовности дублированной системы при различных значениях  $\lambda/\mu$

**Пример 5.6.** На трансформаторной подстанции установлены рабочий и резервный трансформаторы, находящиеся в нагруженном резерве. Интенсивность отказов каждого трансформатора  $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ , а интенсивность восстановления  $\mu = 0,5 \text{ ч}^{-1}$ . Определить коэффициент простоя.

**Решение.**

Трансформаторная подстанция в любой момент времени может находиться в одном из следующих состояний:

- 0 – оба трансформатора работоспособны,
- 1 – отказал один трансформатор,
- 2 – отказали оба трансформатора.

При нахождении в состоянии 0 и 1 электроустановка работоспособна, в состоянии 2 – неработоспособна. Схема состояний для нее показана на рисунке 5.12.

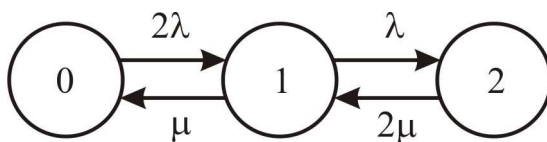


Рисунок 5.12 – Граф состояний трансформаторов ТП

Система дифференциальных уравнений для этой схемы имеет вид

$$\begin{cases} P_0'(t) = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1'(t) = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t) + 2\mu P_2 = 0, \\ P_2'(t) = \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t) = 0. \end{cases}$$

Решим полученную систему при начальных условиях  $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = 0$ .  
Переходя к изображениям, получим следующую систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} (\varepsilon + 2\lambda) P_0(\varepsilon) - \mu P_1(\varepsilon) = 1, \\ -2\lambda P_0(\varepsilon) + (\varepsilon + \lambda + \mu) P_1(\varepsilon) - 2\mu P_2(\varepsilon) = 0, \\ -\lambda P_1(\varepsilon) + (\varepsilon + 2\mu) P_2(\varepsilon) = 0. \end{cases}$$

Для получения величины  $P_i(\varepsilon)$  используем правило Крамера. При этом,  $P_i(\varepsilon) = D_i/D$ , где  $D$  – определитель, элементами которого являются коэффициенты при  $P_0(\varepsilon), P_1(\varepsilon), P_2(\varepsilon)$ ;  $D_i$  – определитель, который образуется путем замены  $i$ -го столбца коэффициентами правой части уравнения.

В рассматриваемом случае необходимо определить функцию простоя, равную  $P_2(t)$ . Для этого запишем определители  $D$  и  $D_2$ .

$$D = \begin{vmatrix} (\varepsilon + 2\lambda) & -\mu & 0 \\ -2\lambda & (\varepsilon + \lambda + \mu) & -2\mu \\ 0 & -\lambda & (\varepsilon + 2\mu) \end{vmatrix} \quad D_2 = \begin{vmatrix} (\varepsilon + 2\lambda) & -\mu & 1 \\ -2\lambda & (\varepsilon + \lambda + \mu) & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 \end{vmatrix}$$

В результате получим:

$$P_2(\varepsilon) = 2\lambda^2/\varepsilon [\varepsilon^2 + 3(\lambda + \mu)\varepsilon + 2\lambda^2 + 4\lambda\mu + 2\mu^2].$$

Переходя от изображения к оригиналу, получим:

$$k_{\pi}(t) = P_2(t) = \lambda^2/(\lambda + \mu)^2 \{1 - 2 \exp [-(\lambda + \mu)t] + \exp [-2(\lambda + \mu)t]\}.$$

При  $t \rightarrow \infty$  имеем:

$$k_{\pi} = \lambda/(\lambda + \mu)^2 = (4 \cdot 10^{-3})/(4 \cdot 10^{-3} + 0,5)^2 = 1,57 \cdot 10^{-2}.$$

**Пример 5.7.** Написать выражение для определения коэффициента простоя системы электроснабжения объекта, имеющего ненагруженный резерв (дизельную электростанцию). Рассмотреть установившийся режим.

**Р е ш е н и е.**

Схема состояний для данной системы электрооборудования имеет вид (рисунке 5.13).

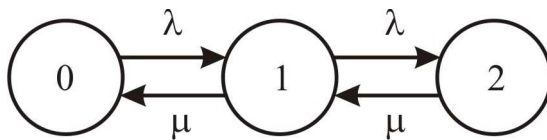


Рисунок 5.13 – Граф состояний системы электроснабжения

Система дифференциальных уравнений для установившегося режима с учетом условия нормировки имеет вид

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ \lambda P_0 + \mu P_2 - (\lambda + \mu) P_1 = 0, \\ \lambda P_1 - \mu P_2 = 0, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Решив уравнение методом подстановки, получим

$$k_{\pi} = P_0 + P_1 = (\mu^2 + \lambda\mu)/(\mu^2 + \lambda\mu + \lambda^2).$$

При многократном резервировании получаемый набор агрегатов следует рассматривать как систему массового обслуживания, в которой поток заявок на обслуживание представляет собой поток отказов, а каналами являются ремонтные



бригады, восстанавливающие работоспособность [25]. Граф состояний такой системы показан на рисунке 5.14.

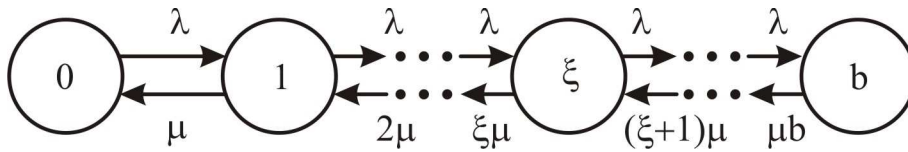


Рисунок 5.14 – Граф состояний многократно резервируемого электротехнического агрегата

Значение коэффициента готовности определяется по следующим аналитическим зависимостям:

при ненагруженном резерве

$$k_r = 1 - \left[ \sum_{\xi=0}^m \frac{m!}{(m-\xi)!} \frac{\lambda^\xi}{\mu^\xi} \right]^{-1} \frac{m! \lambda^m}{\mu^m}, \quad (5.48)$$

при нагруженном резерве

$$k_r = 1 - \left[ \sum_{\xi=0}^m \frac{\lambda^\xi}{\xi! \mu^\xi} \right]^{-1} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n}. \quad (5.49)$$

Для оценки надежности при скользящем резервировании рассмотрим систему из  $n$  независимых однотипных элементов и  $m$  незакрепленных резервных элементов. В этой ситуации может быть сформулировано несколько задач определения надежности, однако для нас наибольший интерес представляет определение коэффициента готовности системы многократного использования с нагруженным или ненагруженным резервом и одной ремонтной бригадой. Возможные состояния такой системы  $\psi = 0, 1, \dots, n + m$ . Решение системы уравнений Колмогорова для стационарного режима позволило определить аналитические зависимости для коэффициента готовности:

при нагруженном резерве

$$k_r = \sum_{\xi=0}^m \frac{(\lambda/\mu)^\xi}{(n+\mu-\xi)!} \left[ \sum_{k=0}^{n+m} \frac{(\lambda/\mu)^k}{(n+m-k)!} \right]^{-1}, \quad (5.50)$$

при ненагруженном резерве

$$k_r = \sum_{\xi=0}^m \left( \frac{n\lambda}{\mu} \right)^{\xi} \left[ \sum_{\xi=0}^m \left( \frac{n\lambda}{\mu} \right)^{\xi} + n^m \sum_{s=m+1}^{m+n} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{\xi} \prod_{k=1}^{\xi-m} (n-k) \right]^{-1}. \quad (5.51)$$

Помимо резервирования однотипными элементами, имеющими одинаковые значения  $\lambda$  и  $\mu$ , при электроснабжении промышленных и сельскохозяйственных потребителей широко применяется общее резервирование, а также параллельное включение агрегатов различной физической природы, например, госсеть резервируется дизельной электростанцией или аккумуляторной батареей, или тем и другим. Указанное обстоятельство приводит к необходимости рассмотрения на основе марковского метода различных ситуаций.

Рассмотрим типовые случаи резервирования.

1. Электроснабжение осуществляется от госсети с показателями надежности  $\lambda_1$  и  $\mu_1$ , в качестве резервного источника используется дизельная электростанция в ненагруженном резерве (имеющая в рабочем состоянии показатели надежности  $\lambda_2$  и  $\mu_2$ ), при этом  $\lambda_1 > \lambda_2$  и  $\mu_1 < \mu_2$ . Восстановление неограниченное.

Схема состояний представлена на рисунке 5.15.

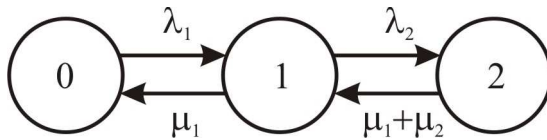


Рисунок 5.15 – Схема состояний источников питания системы электроснабжения

Матрица вероятностей переходов из состояния 0 в 1 и из 1 в 2 имеет вид (при  $t \rightarrow \infty$ )

$$P_{\infty} = \begin{bmatrix} 1-\lambda_1 & \lambda_1 & 0 \\ \mu_1 & 1-(\lambda_2 + \mu_1) & \lambda_2 \\ 0 & \mu_1 + \mu_2 & 1-(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}.$$

Для определения функции готовности системы электроснабжения решим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1, \\ 0 = \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \mu_1) P_1 + (\mu_1 + \mu_2) P_2, \\ 0 = \lambda_2 P_1 - (\mu_1 + \mu_2) P_2. \end{cases} \quad (5.52)$$

При начальных условиях  $P_0(0) = 1$ , то есть оба источника исправны, с учетом нормировочного условия  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ , решая систему уравнений (5.52), получим

$$k_r(\infty) = \frac{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \mu_1)}{(\mu_2 + \mu_1)\mu_1 + (\mu_2 + \mu_1)\lambda_1 + \lambda_1\lambda_2}. \quad (5.53)$$

При использовании источников питания в нагруженном резерве матрица вероятностей переходов примет следующий вид (при  $t \rightarrow \infty$ )

$$P_\infty = \begin{bmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & 0 \\ \mu_1 & 1 - (\lambda_2 + \mu_1) & \lambda_2 \\ 0 & \mu_1 + \mu_2 & 1 - (\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}.$$

Переходя к системе алгебраических уравнений, получим

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_2) P_0 + \mu_1 P_1, \\ 0 = (\lambda_1 + \lambda_2) P_0 - (\lambda_2 + \mu_1) P_1 + (\mu_1 + \mu_2) P_2, \\ 0 = \lambda_2 P_1 - (\mu_1 + \mu_2) P_2. \end{cases} \quad (5.54)$$

Заменяв одно из уравнений нормировочным условием  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ , в результате решения системы уравнений определяем коэффициент готовности

$$k_{r\infty} = \frac{1 + \rho}{1 + \rho \left( 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_1 + \mu_2} \right)}, \quad (5.55)$$

$$\text{где } \rho = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu_1}.$$

**Пример 5.8.** Резервированная система состоит из основного элемента  $\mathcal{E}_1$  и двух резервных элементов  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$ . При отказе основного элемента в работу включается элемент  $\mathcal{E}_2$ , при отказе  $\mathcal{E}_2$  –  $\mathcal{E}_3$ . В выключенном состоянии резервный элемент отказать не может. Интенсивность потока отключений основного элемента  $\lambda_1$ , резервных элементов в рабочем состоянии –  $\lambda_2$ . Поток отказов простейший. Определить надежность системы в различных состояниях.

**Р е ш е н и е.**

Процесс, протекающий в системе, будем рассматривать марковским с непрерывным временем и дискретными состояниями. Система имеет 4 состояния:

- 1 – работает резервный элемент  $\mathcal{E}_2$ ,
- 2 – работает резервный элемент  $\mathcal{E}_3$ ,
- 3 – не работает ни один элемент.

Граф состояний системы показан на рисунке 5.16.

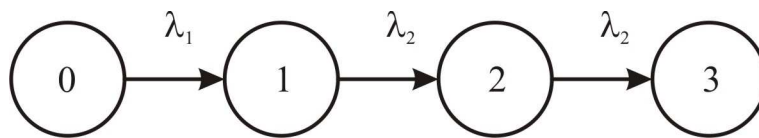


Рисунок 5.16 – Граф состояний системы

Так как восстановление элементов не происходит, все стрелки на графе направлены в одну сторону.

Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний имеет вид

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda_1 P_0(t), \\ P_1'(t) = -\lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_0(t), \\ P_2'(t) = -\lambda_2 P_2(t) + \lambda_2 P_1(t), \\ P_3'(t) = \lambda_2 P_2(t). \end{cases}$$

Нормировочное условие  $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$ .

Из первого выражения определим  $P_0(t)$  как функцию  $t$   $P_0(t) = e^{-\lambda_1 t}$ .

При этом начальное условие интегрирования  $P_0(0) = 1$ .

Подставляя полученное выражение во второе уравнение, получим

$$P_1'(t) = -\lambda_2 P_1 + \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}.$$

Проинтегрируем это уравнение с начальным условием  $P_1(0) = 0$ .

В результате получим

$$P_1(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}.$$

Эту функцию подставим в третье уравнение, получим

$$P_2'(t) = -\lambda_2 P_2 + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}.$$

В результате интегрирования последнего выражения при начальном условии  $P_2(0) = 0$  имеем

$$P_2(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 t}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}.$$

Функцию  $P_3(t)$  можно найти используя общее нормировочное условие  $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$

$$P_3(t) = 1 - P_0(t) - P_1(t) - P_2(t) = 1 - \frac{\lambda_2^2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} e^{-\lambda_1 t} - \left[ \frac{\lambda_1^2 - 2\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} - \frac{\lambda_1 \lambda_2 t}{\lambda_2 - \lambda_1} \right] e^{-\lambda_2 t}.$$

Для систем электроснабжения отдельных объектов характерно также применение более сложных вариантов использования электроустановок (основной источник питания и дублированный резервный источник в ненагруженном резерве). При выходе из строя основного источника питания включается первый, а при выходе его из строя включается второй резервный источник питания. Такая схема с использованием внешней сети и дизельной электростанции с двумя агрегатами в режиме ненагруженного резерва широко применяется на узлах связи.

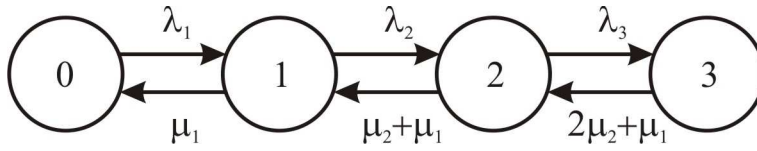


Рисунок 5.17 – Схема состояний источников питания

Схема состояний источников питания (рисунок 5.17) представляет непрерывную марковскую цепь, именуемую схемой «гибели и размножения».

Матрица вероятностей переходов такой схемы может быть представлена в следующем виде:

$$P_{\infty} = \begin{bmatrix} 1-\lambda_1 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 1-(\lambda_2+\mu_1) & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu_1+\mu_2 & 1-(\lambda_2+\mu_1+\mu_2) & \lambda_2 \\ 0 & 0 & \mu_1+2\mu_2 & 1+\mu_1-2\mu_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}.$$

Используя ее, можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1, \\ 0 = \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \mu_1) P_1 + (\mu_1 + \mu_2) P_2, \\ 0 = \lambda_2 P_1 - (\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2) P_2 + (2\mu_2 + \mu_1) P_3, \\ 0 = \lambda_2 P_2 - (2\mu_2 - \mu_1) P_3. \end{cases} \quad (5.56)$$

На основании известных зависимостей, описывающих решение задачи «гибели и размножения» в общем виде [25], найдем решение для частного случая, определив коэффициент готовности источника питания по формуле

$$k_{Г\infty} = P_0 + P_1 + P_2 = \frac{(\mu_1 + \mu_2) \mu_1 + \lambda_1 (\mu_1 + \mu_2) + \lambda_2 \lambda_1}{(\mu_1 + \mu_2) (\mu_1 + \lambda_1) + \lambda_2 \lambda_1 + \frac{\lambda_2^2 \lambda_1}{2\mu_2 + \mu_1}}. \quad (5.57)$$

Для некоторых типов систем электроснабжения характерно другое сочетание элементов (дублированный основной источник питания и резервный источник в ненагруженном резерве).

Схема состояний для этого случая показана на рисунке 5.18.

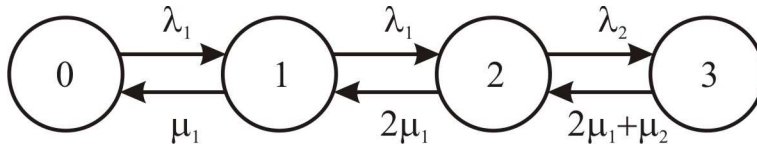


Рисунок 5.18 – Схема состояний системы, состоящей из дублированного основного и резервного источников питания

Возможными состояниями системы являются следующие:

0 – все три источника исправны;

1 – отказал один основной источник, включился равно надежный источник из ненагруженного резерва, первый источник восстанавливается;

2 – отказал второй основной источник питания, работает резервный с характеристиками, два первых источника восстанавливаются;

3 – все три источника восстанавливаются.

Матрица вероятности переходов для такой системы будет выглядеть следующим образом (при  $t \rightarrow \infty$ )

$$P_{\infty} = \begin{bmatrix} 1-\lambda_1 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 1-(\lambda_1+\mu_1) & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 2\mu_2 & 1-(\lambda_2+2\mu_1) & \lambda_2 \\ 0 & 0 & 2\mu_1+\mu_2 & 1-(2\mu_1-\mu_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}.$$

Система уравнений (при  $t \rightarrow \infty$ )

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1, \\ 0 = \lambda_1 P_0 + 2\mu_1 P_2 - (\mu_1 + \lambda_1) P_1, \\ 0 = \lambda_1 P_1 + (2\mu_1 + \mu_2) P_3 - (2\mu_1 + \lambda_2) P_2, \\ 0 = \lambda_2 P_2 - (2\mu_1 + \mu_2) P_3. \end{cases} \quad (5.58)$$

Решение данной системы уравнений позволяет определить коэффициент готовности

$$k_{r\infty} = \frac{2\mu_1^2 + 2\lambda_1\mu_1 + \lambda_1^2}{2\mu_1^2 + \lambda_1^2\mu_1 + \lambda_1^2 + \frac{\lambda_2^2\lambda_1^2}{2\mu_1 + \mu_2}}. \quad (5.59)$$

Для электроснабжения ответственных потребителей в составе системы электроснабжения могут применяться установки гарантированного питания (УГП). В этом случае после включения система электроснабжения должна проработать безотказно заданное время, которое обычно определяется промежутком между профилактическими проверками. Для такой системы возникает задача определения вероятности того, что в пределах заданной наработки отказ не возникает, то есть определение вероятности безотказной работы (для рассматриваемых систем неработоспособное состояние является поглощающим).

Определим надежность системы, состоящей из основного источника и установки гарантированного питания, находящейся в ненагруженном резерве. Возможные состояния для такой группы источников следующие:

- 0 – оба источника работоспособны;
- 1 – неработоспособен основной источник;
- 2 – неработоспособны оба источника.

Схема состояний показана на рисунке 5.19.

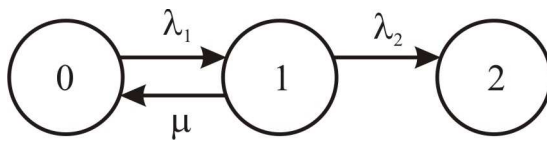


Рисунок 5.19 – Схема состояний системы из основного источника питания и УГП

Работоспособным являются состояния 0 и 1, неработоспособным – состояние 2. Следовательно, вероятность непопадания в поглощающее состояние за время  $t$  определится следующим образом

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) = 1 - P_2(t). \quad (5.60)$$

Для вычисления  $R(t)$  по схеме состояний составим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda_1 P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1'(t) = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda_2 + \mu) P_1(t), \\ P_2'(t) = \lambda_2 P_1(t). \end{cases} \quad (5.61)$$



Начальные условия  $P_0(0) = 1$ ,  $P_1(0) = 0$ ,  $P_2(0) = 0$ .

Выполнив преобразование Лапласа, получим систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} (s + \lambda_1) P_0(s) - \mu P_1(s) = 1, \\ -\lambda_1 P_0(s) + (\lambda_2 + \mu + s) P_1(s) = 0, \\ sP_2(s) - \lambda_2 P_1(s) = 0. \end{cases} \quad (5.62)$$

Для определения  $R(t)$  необходимо знать  $P_0(s)$  и  $P_1(s)$ . Задачу будем решать, используя правило Крамера

$$P_0(s) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -\mu \\ 0 & \lambda_2 + \mu + s \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} s + \lambda_1 & -\mu \\ -\lambda_1 & \lambda_2 + \mu + s \end{vmatrix}} = \frac{\lambda_2 + \mu + s}{(s + \lambda_1)(\lambda_2 + \mu + s) - \lambda_1 \mu} = \frac{s + \mu + \lambda_2}{(s - \rho_1)(s - \rho_2)}, \quad (5.63)$$

где  $\rho_{1,2} = \frac{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) \pm \sqrt{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)^2 - 4\lambda_1 \lambda_2}}{2}$  – корни характеристического уравнения.

Соответственно для  $P_1(s)$  имеем

$$P_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} s + \lambda_1 & 1 \\ -\lambda_1 & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{\lambda_1}{(s - \rho_1)(s - \rho_2)}. \quad (5.64)$$

Раскладывая  $P_0(s)$  и  $P_1(s)$  на элементарные дроби и производя обратное преобразование Лапласа, получим

$$\begin{cases} P_0(t) = \frac{\mu + \lambda_2}{\rho_1 + \rho_2} [\exp(-\rho_1 t) - \exp(-\rho_2 t)] + \\ + \frac{1}{\rho_1 - \rho_2} [\rho_1 \exp(-\rho_1 t) - \rho_2 \exp(-\rho_2 t)], \\ P_1(t) = \frac{\lambda_1}{\rho_1 - \rho_2} [\exp(-\rho_1 t) - \exp(-\rho_2 t)]. \end{cases} \quad (5.65)$$

Вероятность непопадания в поглощающее состояние  $R(t) = P_0(t) + P_1(t)$ .

$$R(t) = \frac{[(\lambda_2 + \mu) + \rho_1] \exp(-\rho_1 t) - [(\lambda_2 + \mu) + \rho_2] \exp(-\rho_2 t)}{\rho_1 - \rho_2} + \frac{\lambda_1 [\exp(-\rho_1 t) - \exp(-\rho_2 t)]}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (5.66)$$

После проведения преобразований с учетом того, что  $\lambda_2 + \lambda_1 + \mu + \rho_1 = -\rho_2$ , определим  $R(t)$ :

$$R(t) = - \frac{\rho_1 \exp(-\rho_2 t) - \rho_2 \exp(-\rho_1 t)}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (5.67)$$

Представляет интерес для рассматриваемого случая величина средней наработки до отказа, определяемая по формуле

$$T_1 = \int_0^{\infty} R(t) dt = - \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 \rho_2} = \frac{4[(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)^2 - 4\lambda_1 \lambda_2]}{\lambda_1 + \lambda_2 + \mu}. \quad (5.68)$$

**Пример 5.9.** Система гарантированного питания потребителя с непрерывным процессом производства состоит из двух дизель – генераторов, находящихся в ненагруженном резерве. Интенсивность отказов и восстановления дизель – генератора в рабочем состоянии  $\lambda = 4 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$  и  $\mu = 5 \text{ ч}^{-1}$ . При одновременном отказе обоих источников система гарантированного питания неработоспособна. Необходимо определить наработку до отказа установки гарантированного питания.

**Р е ш е н и е.**

Возможные состояния установки гарантированного питания:

0 – оба дизель – генератора работоспособны,

1 – один из агрегатов неработоспособен,

2 – оба агрегата вышли из строя.

Граф состояний системы показан на рисунке 5.20.

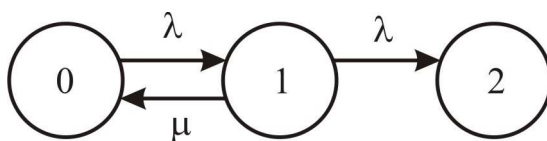


Рисунок 5.20 – Граф состояний установки гарантированного питания

Система дифференциальных уравнений для данной схемы имеет вид

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_1'(t) = \lambda P_0(t) + (\lambda + \mu) P_1(t), \\ P_2'(t) = \lambda P_1(t). \end{cases}$$

Начальные условия  $P_0(0) = 1$ ,  $P_1(0) = P_2(0) = 0$ . Решив систему уравнений, получим выражение для вероятности попадания в поглощающее состояние  $P_2(t)$  и для вероятности безотказной работы за это время  $P_2^*(t)$

$$P_2(t) = 1 - \frac{\rho_1 \exp(\rho_2 t) - \rho_2 \exp(\rho_1 t)}{\rho_1 - \rho_2},$$

$$P_2^*(t) = \frac{\rho_1 \exp(\rho_2 t) - \rho_2 \exp(\rho_1 t)}{\rho_1 - \rho_2},$$

где  $\rho_{1,2} = 0,5 [-(2\lambda + m) \pm \sqrt{(2\lambda + m)^2 - 4\lambda^2}]$ .

Средняя наработка до отказа

$$T_1 = \int_0^{\infty} P_2^*(t) dt = \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 \rho_2} = \frac{1}{\lambda} \left( 2 + \frac{\mu}{\lambda} \right) = \frac{1}{4 \cdot 10^{-2}} \left( 2 + \frac{5}{4 \cdot 10^{-2}} \right) = 3175 \text{ ч.}$$

Решение задачи оценки надежности восстанавливаемой системы в целом приводит к необходимости рассмотрения  $2^n$  состояний. Существует несколько подходов уменьшения получаемого множества состояний в основном за счет маловероятных событий.

Будем исходить из следующих предпосылок: система электроснабжения содержит высоконадежные элементы, коэффициент готовности которых близок к единице; время безотказной работы каждого элемента намного больше времени восстановления. Для таких систем процесс функционирования можно представить в виде узких «импульсов» (время восстановления), разделенных интервалами без-

отказной работы, и применить приближенный метод оценки показателей надежности.

Процедура получения приближенных формул для расчета надежности заключается в условном объединении в эквивалентный агрегат двух любых связанных между собой элементов системы. Эквивалентный агрегат может быть охарактеризован новым процессом восстановления, представляющим собой последовательность интервалов нормальной работы и восстановления. Система, состоящая из  $n$  элементов, становится состоящей из  $n - 1$  элемента. Такими последовательными объединениями удастся свести всю систему к одному элементу, для которого оказывается построенным и результирующий процесс восстановления.

Применим указанный подход к анализу надежности системы электроснабжения, состоящей из основного источника (госсети), двух резервных дизель – генераторов, работающих в ненагруженном резерве, дублированного комплекта токораспределительных устройств переменного тока в ненагруженном резерве, выпрямительного устройства со скользящим резервированием и токораспределительного устройства постоянного тока.

Структурная схема надежности системы электроснабжения приведена на рисунке 5.21.

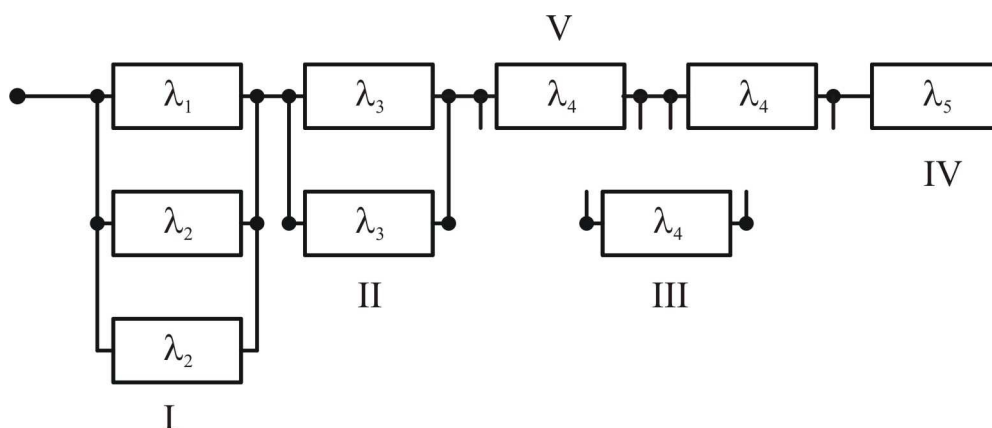


Рисунок 5.21 – Структурная схема надежности системы электроснабжения

Задачу определения коэффициента готовности будем решать поэтапно, в следующей последовательности.

1. Структурная схема надежности разбивается на ряд участков (I – V).
2. Определяются показатели надежности источников питания системы электроснабжения. В соответствии с ранее полученными результатами

$$k_{rI} = \frac{(\mu_1 + \mu_2)\mu_1 + \lambda_1(\mu_1 + \mu_2) + \lambda_2\lambda_1}{(\mu_1 + \mu_2)(\mu_1 + \lambda_1) + \lambda_2\lambda_1 + \frac{\lambda_2^2\lambda_1}{2\mu_2 + \mu_1}}, \tau_I = \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}}, \mu_I = \mu_1\mu_2^2(\tau_1 + 2\tau_2). \quad (5.69)$$

3. Определяются показатели надежности дублированной системы токораспределительных устройств переменного тока:

$$k_{rII} = 1 - \frac{\lambda_3^2}{2\mu_3 + 2\mu_3\lambda_3 + \lambda_3^2}, \tau_{II} = \tau_3 / 2, \mu_{II} = 2\mu_3^2\tau_3. \quad (5.70)$$

4. Определяются показатели надежности статических преобразователей, находящихся в ненагруженном резерве (скользящее резервирование с  $n = 2$  и  $m = 1$ )

$$k_{rIII} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_4}{\mu_4} + \left(\frac{\lambda_4}{\mu_4}\right)^2}, \tau_{III} = \tau_4 / 2, \mu_{III} = 2\mu_4^2\tau_4. \quad (5.71)$$

5. Определяются показатели надежности токораспределительного устройства постоянного тока

$$k_{rIV} = \frac{\mu_5}{\lambda_5 + \mu_5}, \tau_{IV} = \tau_5, \mu_{IV} = \mu_5. \quad (5.72)$$

6. Так как структурная схема надежности представляет теперь последовательное соединение элементов, то вычисляются коэффициент готовности дискретной цепи и среднее время восстановления системы по формулам

$$k_{rV} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^4 \left( \frac{1}{k_{ri} - 1} \right)}, \quad (5.73)$$

$$\tau_V = - \frac{\frac{\mu_1\mu_2^2(\tau_1 + 2\tau_2)(\tau_2 + 2\tau_1)}{\tau_1\tau_2} + \mu_3\tau_3 + \mu_4\tau_4 + \mu_5\tau_5}{\mu_1\mu_2(\tau_1 + 2\tau_2) + 2\mu_3\tau_3 + 2\mu_4\tau_4 + \mu_5\tau_5}. \quad (5.74)$$

Указанный подход может быть распространен и на более сложные дискретные цепи, встречающиеся в практике разработки систем электроснабжения.

### 5.3 Расчет надежности по статистическим данным об отказах электрооборудования

Посредством сбора и обработки информации об отказах определяются причины отказов, корректируются данные по интенсивностям отказов типовых элементов, оптимизируется работа сетевых предприятий по созданию необходимого резервного фонда. Статистические данные учитываются при определении сроков проведения технических обслуживания и текущих ремонтов, расчете численности обслуживающего персонала.

В практике работы районных электрических сетей сведения об отказах электрооборудования фиксируются в специальных журналах. При этом должны указываться: тип, марка оборудования, время наступления отказа, причина, время восстановления работоспособного состояния. Формы документов должны предусматривать возможность обработки информации на ЭВМ.

Расчет надежности по статистическим данным может проводиться либо в процессе испытаний на надежность, либо на основе опыта эксплуатации.

Наиболее типичная постановка задачи при экспериментальной оценке надежности – определение вида функции распределения и параметров распределения исследуемой случайной величины.

Обработка полученного статистического материала ведется в следующей последовательности. Сначала составляется таблица потока отказов, а затем исходные данные группируют в вариационный ряд в порядке возрастания значений случайной величины.

**Пример 5.10.** Построить вариационный ряд для следующего потока отказов (таблица 5.1).

**Таблица 5.1 – Исходные данные**

Номер отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наработка, ч	65	97	165	119	36	272	77	96	194	8

**Р е ш е н и е.**

Расположим значения случайной величины наработки до отказа в порядке возрастания, получим вариационный ряд, представленный ниже в таблице 5.2.

**Таблица 5.2 – Вариационный ряд**

Номер отказа	10	5	1	7	8	2	4	3	9	6
Наработка, ч	8	36	65	77	96	97	119	165	194	272

При большом числе наблюдений (порядка сотен) вариационный ряд перестает быть удобной формой записи статистического материала. Для удобства его использования он подвергается дополнительной обработке. Весь диапазон полученных значений случайной величины делится на интервалы и подсчитывается количество членов выборки, приходящихся на каждый интервал. Это число делится на общее число наблюдений и определяется частота, соответствующая данному разряду. Сумма частот всех разрядов должна быть равна единице.

Полученный статистический ряд оформляется в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс откладываются разряды и на каждом из них строится прямоугольник, площадь которого равна частоте данного разряда.

**Пример 5.11.** Проведено обследование длительности внезапных отключений воздушных линий 10 кВ района электрических сетей. Результаты сведены в статистический ряд (таблица 5.3). Построить гистограмму.

**Таблица 5.3 – Результаты обследования длительности отключений**

$\Delta t_i$ , ч	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8
$\Delta n_i$	66	41	30	18	9	6	4	2
$P_i^*$	0,38	0,23	0,17	0,1	0,051	0,034	0,022	0,011

**Р е ш е н и е.**

1. Вычисляем частоты для каждого  $i$ -го разряда по формуле  $P_i^* = \Delta n_i / N$ , где  $N = 176$  – общее число наблюдений;  $\Delta n_i$  – число отключений в данном интервале.

Результаты расчетов приведены в таблице 5.3.

2. Строим гистограмму (рисунок 5.22).

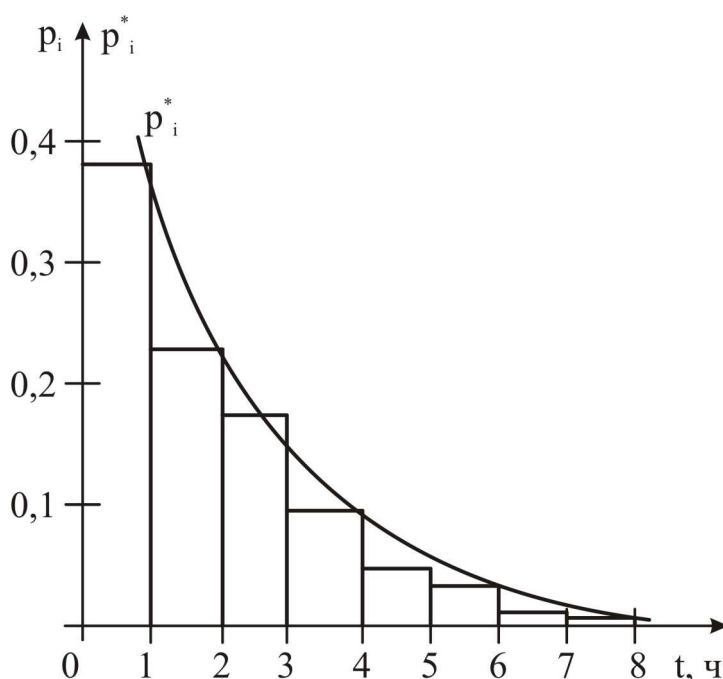


Рисунок 5.22 – Гистограмма длительности отключений линий 10 кВ

По виду гистограммы выдвигают гипотезу о предполагаемом законе распределения случайной величины и определяют его параметры.

Определяют теоретические вероятности попадания исследуемой величины в каждый интервал, строят теоретическую кривую.

При построении гистограммы с выравнивающей ее кривой обычно бывает видно, что между теоретической кривой и статистическим распределением имеется расхождение (см. рисунок 5.22). На практике такое расхождение всегда неизбежно. Следовательно, возникает вопрос о согласованности теоретического и статистического распределений. Такая проверка осуществляется по критериям согласия. Наиболее часто используются критерий Колмогорова и критерий  $\chi^2$  – Пирсона.

При применении критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределением рассматривается максимальное значение модуля разности между теоретической и экспериментальной функциями. Условие соответствия определяется формулой

$$\Delta x = \Delta F \sqrt{N} \leq 1,$$

где  $\Delta F = \max|F^*(t) - F(t)|$  – наибольшее отклонение экспериментальной кривой от теоретической;  $N$  – количество экспериментальных данных.



Недостаток рассматриваемого критерия – необходимость иметь не только вид функции распределения, но и ее параметры, что не всегда встречается на практике. Использование только статистических данных может дать неверные результаты.

Критерий  $\chi^2$  – Пирсона не требует построения самого закона распределения. Достаточно задаться только общим видом функции  $F(t)$ , а входящие в нее числовые параметры определяются по данным эксперимента. При использовании критерия согласия  $\chi^2$  – Пирсона определяется мера расхождения

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - Np_i)^2}{Np_i},$$

где  $k$  – число интервалов статистического ряда;

$p_i$  – вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал, вычисленная для теоретического распределения;

$N$  – число испытаний.

Для применения критерия  $\chi^2$  – Пирсона необходимо, чтобы  $N \geq 50 \dots 60$ ,  $k > 6 \dots 8$ . Распределение  $\chi^2$  зависит от числа степеней свободы  $s = k - z - 1$ , где  $z$  – число вычисляемых параметров распределения. По таблицам, приводимым в литературе по теории вероятностей и математической статистике, для каждого значения  $\chi^2$  и  $s$  можно найти вероятность того, что за счет случайных причин мера расхождения теоретического и экспериментального распределений будет не меньше, чем фактическое значение  $\chi^2$ . Если  $P_s > 0,1$  то обычно считают, что теоретическое распределение не противоречит экспериментальным данным.

**Пример 5.11.** По данным вариационного ряда (см. таблицу 5.3) проверить гипотезу об экспоненциальном распределении времени восстановления, используя критерий  $\chi^2$  – Пирсона.

**Р е ш е н и е.**

1. Определяем среднее время восстановления

$$T_B^* = \sum_{i=1}^k t_i p_i^* = 0,38 \cdot 0,5 + 0,23 \cdot 1,5 + 0,17 \cdot 2,5 + 0,1 \cdot 3,5 + 0,051 \cdot 4,5 + 0,034 \cdot 5,5 + 0,022 \cdot 6,5 + 0,011 \cdot 7,5 = 1,95 \text{ ч.}$$

2. Вычисляем значения теоретической кривой по формуле

$$F(t) = Q(t) = 1 - e^{-t/T_B^*}.$$

3. Последовательно определяем промежуточные величины, необходимые для получения  $\chi^2$  (таблица 5.4). При этом величины  $p_i$  берутся равными приращению функции распределения  $F(t)$  на  $i$ -м участке.

**Таблица 5.4 – Результаты расчета промежуточных величин**

$\Delta t_i$	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7-8
$\Delta n_i$	66	41	30	18	9	6	4	2
$F(t)$	0,4	0,64	0,785	0,871	0,92	0,95	0,97	0,982
$p_i$	0,4	0,24	0,145	0,086	0,05	0,03	0,02	0,012
$Np_i$	70	42	25	15	9	5	4	2
$(\Delta n_i - Np_i)^2$	16	1	25	9	0	1	0	0
$\frac{(\Delta n_i - Np_i)^2}{Np_i}$	0,23	0,02	1	0,6	0	0,2	0	0

4. По формуле  $\chi^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(\Delta n_i - Np_i)^2}{Np_i}$  определяем  $\chi^2 = 0,23 + 0,02 + 1 + 0,6 + 0 + 0,2 = 2,05$ .

5. Для  $s = 8 - 1 - 1 = 6$  и  $\chi^2 = 2,05$  по таблице Приложения В1 [8] находим  $P_s = 0,91$ . Эта величина малой не является и, следовательно, гипотезу о том, что время восстановления подчинено экспоненциальному закону, можно считать правдоподобной.

Основной особенностью оценки показателей надежности по статистическим данным является ограниченность статистического материала для точного определения характеристик. В условиях ограниченного числа опытов любое значение искомого показателя всегда будет содержать элемент случайности. Приближенное, случайное значение показателя надежности называется оценкой.

К оценке  $\alpha_0$  параметра  $\alpha$  предъявляют ряд требований, которым она должна удовлетворять.

Во-первых, оценка  $\alpha_0$  при увеличении числа опытов  $N$  должна приближаться к параметру  $\alpha$ . Оценка, обладающая таким свойством, называется состоятельной.

Во-вторых, желательно, чтобы оценка  $\alpha_0$  не обладала систематической ошибкой, т.е. чтобы выполнялось условие  $M[\alpha_0] = \alpha$ . Такая оценка называется несмещенной.

В-третьих, выбранная несмещенная оценка должна обладать по сравнению с другими наименьшей дисперсией. Оценка, обладающая таким свойством, называется эффективной.

При обработке статистических данных не всегда удается удовлетворить таким требованиям, однако выбору оценки всегда должно предшествовать ее критическое рассмотрение с указанных точек зрения. На практике часто требуется не только определить математическое ожидание  $m_\alpha$  и дисперсию  $D_\alpha$  величины  $\alpha$ , но оценить их точность и надежность. Требуется знать, к каким ошибкам приведет замена параметра  $\alpha$  на его оценку  $\alpha_0$ , и с какой степенью уверенности можно ожидать, что эти ошибки не выйдут за определенные пределы.

Для характеристики точности и надежности оценок используются доверительные интервалы и доверительная вероятность. Пусть для параметра  $\alpha$  получена из  $N$  опытов несмещенная оценка  $\alpha_0$ . Определим вероятность, при которой допустимая при этом ошибка будет меньше некоторой величины  $E$ . Обозначим эту вероятность  $P(E) = P(|\alpha_0 - \alpha| < E)$ .

По смыслу  $P(E)$  – это вероятность того, что истинное значение  $\alpha$  будет заключено в пределах  $\alpha_0 - E$ ,  $\alpha_0 + E$ . Вероятность  $P(E)$  называется доверительной вероятностью, границы  $\alpha_0 - E$ ,  $\alpha_0 + E$  доверительными границами, интервал  $I_E = \alpha_0 \pm E$  – доверительным интервалом.

Доверительный интервал характеризует точность полученного результата, а доверительная вероятность – его надежность. Показатели надежности электрооборудования задаются зачастую с определенной доверительной вероятностью или доверительными интервалами. Например, согласно заводской документации значение вероятности безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов

при доверительной вероятности 0,8 за 2 миллиона циклов должно быть не менее 0,92.

**Пример 5.12.** При эксплуатации 200 отходящих высоковольтных ЛЭП сельскохозяйственного назначения зарегистрировано 20 отказов в течение наработки 1000 ч. Требуется определить параметр потока отказов  $\omega^*$  и найти для него двухсторонний доверительный интервал при заданной доверительной вероятности  $\delta = 0,1$ .

**Р е ш е н и е.**

1. Среднее значение параметра потока отказов

$$\omega^* = r/N \cdot \Delta t = 20/200 \cdot 1000 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

2. Границы доверительного интервала для параметра потока отказов определим по формуле  $\omega_n = Q_n/\Delta t$ ,  $\omega_b = Q_b/\Delta t$ , предварительно установив границы доверительного интервала для вероятности  $Q(t_1, t_2)$ . Для этого по Приложению В1 [8] при числе степеней свободы  $2s = 40$  и уровне доверительной вероятности  $1 - \delta = 0,9$  находим  $\chi^2_{0,9} = 29,1$  и при числе степеней свободы  $s = 2(20 + 1) = 42$  и уровне вероятности  $\delta = 0,1$  находим  $\chi^2_{0,1} = 54$ . В результате

$$Q_n = \chi^2_{0,9} / (2N - r + 0,5\chi^2_{0,9}) = 29,1 / (2 \cdot 200 - 20 + 0,5 \cdot 29,1) = 0,073.$$

$$Q_b = \chi^2_{0,1} / (2N - r + 1 + 0,5\chi^2_{0,1}) = 54 / (2 \cdot 200 - 20 + 1 + 0,5 \cdot 54) = 0,132.$$

3. Соответственно, нижняя и верхняя границы доверительного интервала для параметра потока отказов будут равны

$$\omega_n = Q_n/\Delta t = 0,073/1000 = 7,37 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

$$\omega_b = Q_b/\Delta t = 0,132/1000 = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

## 5.4 Моделирование показателей надежности на ЭВМ

В предыдущих подразделах были рассмотрены методы оценки надежности систем электроснабжения, основанные на аналитических расчетах и натурных испытаниях. Основной недостаток этих способов – их большая трудоемкость и ограниченная точность.

При аналитических расчетах, как правило, не учитывается динамика процесса возникновения отказов и их временная последовательность. Исследуемый объект как бы замораживается во времени, и поэтому используются усредненные характеристики надежности с заданными законами распределения случайных величин. При проведении расчетов ремонтируемых систем с использованием аппарата теории массового обслуживания требуется перебор большого числа различных состояний исследуемой системы и решение дифференциальных уравнений.

Стремление упростить процедуры расчета вынуждает вводить допущения, снижающие точность результатов (рассмотрение только установившегося режима, пренебрежение действием только некоторых факторов и др.). Аналитическое исследование систем массового обслуживания практически ограничено объектами с простейшим потоком событий, процессы в которых являются марковскими.

Испытания на надежность в принципе позволяют исключить перечисленные недостатки, если их проводить достаточно длительно и на большом количестве изделий. Такие испытания по существу представляют физическое моделирование. Вместе с тем, большая длительность и большой объем подвергающихся испытаниям образцов приводят к необходимости вводить допущения, снижающие достоверность результатов.

Требуются принципиально новые пути и средства изучения надежности сложных изделий. Применительно к эксплуатации электрооборудования указанный подход возникает при исследовании систем массового обслуживания с произвольным потоком, при наличии очереди в системе массового обслуживания, для объектов со сложной структурой. В указанных ситуациях используется моделирование.

Среди различных методов вероятностного моделирования на ЭВМ применительно к исследованию надежности наибольшее распространение получил метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Он заменяет физический эксперимент математическим исследованием, сохраняя сущность и характер эксперимента, используя статистические методы для обработки полученных результатов. Метод статистических испытаний получил широкое распространение благодаря наглядной вероятностной трактовке, способствующей быстрому практическому усвоению, присущей ему универсальности, простой вычислительной схеме, существенно упрощающей программирование, устойчивости результатов по отношению

к возможным ошибкам и весьма простой оценке точности полученных результатов. Метод является численным.

Сущность метода состоит в том, что исследуемая система представляется вероятностной моделью, отражающей все стороны изучаемого процесса. Данная модель многократно испытывается, в результате чего накапливается статистический материал. Расчет (опыт) дает случайное значение показателя надежности объекта, множество опытов дает множество значений показателя надежности. Статистическая обработка результатов опытов позволяет получить ответ решаемой задачи.

При исследовании задач надежности наибольшее распространение получили так называемые логические модели безотказной работы. Каждый элемент и вся система в любой момент времени может находиться в одном из двух состояний – работоспособном или неработоспособном. Функциональные связи между элементами заменяются логическими, определяющими состояние системы в зависимости от состояния элементов. Процесс моделирования сводится к воспроизведению в соответствии с заданными законами процесса изменения состояния элементов, моделирования логических функций, определения случайного процесса изменения состояния системы в случайные моменты времени, вычисления оценок показателей надежности.

Рассмотрим простейший пример моделирования невосстанавливаемой системы, содержащей  $n$  элементов. Модели надежности элементов обеспечивают формирование случайного времени наработки до отказа  $T_i$  для каждого элемента системы на основании заданной модели безотказности  $F_i(t)$ . В зависимости от структуры модель на основании значений  $t_{ij}$  реализаций случайной величины  $T_i$  в  $j$ -м опыте формирует реализации  $t_j$  случайной величины  $T_j$  наработки до отказа всей системы. В результате проведения  $m$  статистических испытаний получается случайная выборка наработки до отказа системы  $t_j$  ( $j = 1 \dots m$ ).

Для вычисления статистических характеристик надежности целесообразно весь диапазон возможных значений наработки до отказа  $t_{\max}$  разбить на  $k$  равных интервалов шириной  $\Delta t$  и подсчитать количество отказов системы  $\Delta r_l$ , приходящихся на каждый  $l$ -й интервал ( $l = 1 \dots k$ ). Одновременно подсчитывается количество отказов системы к началу рассматриваемого  $l$ -го интервала

$$r_i = \sum_{s=1}^{l-1} \Delta r_s. \quad (5.75)$$

Оценки показателей вероятности безотказной работы, интенсивности отказов и среднего времени безотказной работы соответственно равны

$$P^*(t_i) = 1 - \frac{r_i}{m}; \quad (5.76)$$

$$\lambda_i^*(t) = \frac{\Delta r_i}{(m - r_i) \Delta t}; \quad (5.77)$$

$$T_i^* = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m}. \quad (5.78)$$

Аналогично исследуются ремонтируемые объекты, но для таких систем модели надежности элементов предназначены для формирования случайного времени наработки до отказа и времени восстановления каждого элемента.

Определение требуемого объема опытов при использовании метода статистических испытаний может быть выполнено по приближенной формуле

$$N = 1/\varepsilon^2, \quad (5.79)$$

где  $N$  – число испытаний,

$\varepsilon$  – заданная относительная точность.

Из формулы следует, что, например, при  $\varepsilon = 0,05$  требуется провести 400 опытов.

Рациональная область применения метода статистических испытаний – это исследовательские расчеты. Метод может быть эталонным для оценки точности других приближенных, но более простых методов.

В заключение отметим, что имеются стандартные программы, позволяющие решать задачи оценки надежности с использованием метода статистических испытаний на ЭВМ.

## **6 Техничко-экономическая оценка недоотпуска электроэнергии потребителям**

При рассмотрении вопросов электроснабжения потребителей решаются задачи создания новых, расширения и реконструкции существующих электроустановок, разрабатываются мероприятия по снижению потерь электроэнергии, повышению надежности электроснабжения и т.п.

Комплексная оценка эффективности принимаемых решений по вопросам электроснабжения должна предусматривать рассмотрение альтернативных вариантов на многокритериальной основе. В качестве частных показателей качества в первую очередь следует рассматривать экономические характеристики, показатели надежности, показатели качества электроэнергии.

Отключения электроэнергии и выход параметров электроэнергии за допустимые пределы связаны с ущербом и приводят к сопутствующим экономическим эффектам. В ряде случаев экономический ущерб от таких факторов может быть сопоставим с основными экономическими показателями. В силу этого при анализе вариантов систем электроснабжения, отличающихся по надежности и качеству электроэнергии, необходимо учитывать ущерб от ненадежной работы электропитающих установок.

В технической литературе по надежности систем электроснабжения [21, 22] рекомендуется рассматривать две составляющие ущерба, одна из которых определяется числом перерывов при заданной мощности нагрузки (до перерыва) и стоимость ущерба от внезапного перерыва, а вторая зависит от величины удельного ущерба и математического ожидания недоотпущенной энергии.

Имея среднее ожидаемое число перерывов электроснабжения и соответствующие величины отключаемых нагрузок, а также значения удельного штрафа можно найти первую составляющую ущерба

Длительность аварийных остановок, приводящих к полному или частичному перерыву электроснабжения за год, определяется рядом распределения вероятностей пропускной способности элементов системы электроснабжения

$$P_1^{(s_1)} + P_2^{(s_2)} + \dots + P_n^{(s_n)} + q = 1, \quad (6.1)$$

где  $s_1, s_2, \dots, s_n$  – пропускная способность системы ( $s_1 = 1, 0$ ),



$q$  – вероятность полного перерыва электроснабжения.

Отсюда, недоотпуск потребителям электроэнергии в результате полного или частичного аварийного перерыва будет равен:

$$W_a = 8760S (P_2^{(1-s_2)} + \dots + P_n^{(1-s_n)} + q), \quad (6.2)$$

где  $S$  – расчетная среднеквадратичная нагрузка.

Указанное выражение справедливо для графиков нагрузки предприятий с трехсменным режимом работы и коэффициентом заполнения графика близким к единице. Для предприятий с резко изменяющимся графиком потребления электроэнергии такая формула для расчета недоотпущенной энергии не подходит и для ее использования требуется введение соответствующих корреляционных коэффициентов, определяемых на основе исследования графиков потребления электроэнергии для различных потребителей. В силу этого, для отдельных отраслей народного хозяйства составляющая ущерба, базирующаяся на числе аварийных отключений, обычно не рассматривается, и расчеты ведутся по количеству недоотпущенной энергии. Такая методика применяется, например, для сельскохозяйственных потребителей [5].

В практике проектирования и технико-экономического сравнения схем электроснабжения чаще всего встречаются сведения о потребляемой мощности объекта или о мощности трансформаторных подстанций, присоединенных к проектируемой сети, параметры которой известны (длина, марка и сечение проводов и т.д.). В этом случае целесообразно оперировать величиной среднеквадратичного вероятностного ущерба, отнесенного к 1 кВт·ч недоотпущенной электроэнергии, а также средне-статистическими значениями продолжительности отключений в год в расчете на одну ТП, на 1 км линии электропередачи.

Ущерб, наносимый потребителю в результате недоотпуска электроэнергии по причине отказа системы электроснабжения можно определить по формуле

$$Y = y_0 W_{п.э}, \quad (6.3)$$

где  $y_0$  – удельный ущерб от недоотпуска потребителям 1 кВт·ч электроэнергии (руб./кВт·ч),

$W_{п.э}$  = количество недоотпущенной электроэнергии за время перерыва электроснабжения (кВт·ч).

По состоянию на 01.01 2001г величина  $y_0$  составляла 18,3 руб./кВт·ч [11].

Указанная величина удельного ущерба рекомендована научно-техническим советом Минэнерго [4] как исходная при экономическом обосновании решений, связанных с повышением надежности распределительных электрических сетей, в том числе при расчетах народно-хозяйственного эффекта от внедрения мероприятий по повышению надежности в проектируемые и действующие электрические сети при разработке новых технических решений для этих целей.

Однако определение величины ущерба связано с определенными трудностями, поскольку требуется значительное количество информации о влиянии длительности перерывов на снижение эффективности технологических процессов, порчу продукции и т.д. При этом для отдельных сельскохозяйственных потребителей удельный ущерб может существенно различаться (таблица 6.1) [4]. Указанное обстоятельство связано с типом производства продукции у потребителя, невозможностью точного определения объема потерь продукции и рядом технологических и биологических факторов которые трудно учесть.

**Таблица 6.1 – Средний удельный ущерб для сельскохозяйственных потребителей**

Наименование потребителя	Средний удельный ущерб, руб./кВт·ч
Молочные комплексы и фермы	32,4
Свинотоварная ферма	64,8
Птицефермы	122,9
Теплицы	41,3
Коммунально-бытовые потребители	3,25
Промышленные потребители	6,3

Согласно [5] ущерб от перерывов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей рекомендуется определять по формуле

$$Y = M \sum_{j=1}^k C_j n_t n_g P_j, \quad (6.4)$$

где  $k$  – число видов сельскохозяйственной продукции;  
 $n_t$  – коэффициент, учитывающий технологию производства продукции;  
 $n_g$  – коэффициент, учитывающий специализацию производства;  
 $P_j$  – удельный объем сельскохозяйственной продукции  $j$ -го вида, недополученной в результате перерыва электроснабжения (кг, шт.).

**Пример 6.1.** На молочно-товарной ферме с боксовым содержанием 400 голов коров и среднегодовым надоем 4500 л молока произошло отключение электроэнергии с 15 до 22 часов. Длительность процесса доения на ферме составляет 2,3 ч. Доение коров производится дважды в 6 и 18 часов. Требуется определить ущерб от отключения электроэнергии.

**Р е ш е н и е.**

1. По Приложению 1 [5] определяем  $P_j = 1,5$  л/гол. Принимаем кадастровую цену на молоко 7 руб./л.

2. По формуле 6.4 определяем  $Y = M C_j P_j = 400 \cdot 7 \cdot 1,5 = 4200$  руб.

Перерывы в подаче электрической энергии помимо ущерба от нарушения технологического процесса потребителей связаны с недоиспользованием оборудования системы электроснабжения и необходимостью проведения ремонтно-восстановительных работ. Затраты на проведение аварийно-восстановительных работ включают: заработную плату ремонтного персонала, транспортные расходы, стоимость материалов и запасных частей, накладные расходы и определяются по формуле

$$Y_p = \tau_{\Sigma} N_{p.п} S_{\text{ч}} \mu_g \left( 1 + \frac{\mu_c}{100} \right) k_{p.м}, \quad (6.5)$$

где  $\tau_{\Sigma}$  – суммарная величина перерыва электроснабжения;  
 $N_{p.п}$  – число ремонтного персонала, задействованного на устранении аварии;  
 $S_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка ремонтного персонала, руб./ч;

$\mu_g$  – коэффициент дополнительных начислений на зарплату ( $\mu_g = 1,1$ );

$\mu_c$  – процент отчислений в фонд социального страхования;

$k_{p.м}$  – коэффициент, учитывающий затраты на материалы, транспортные и накладные расходы ( $k_{p.м} = 2,35$ ).

Объем недоотпущенной электроэнергии за время перерывов в электроснабжении зависит от потребляемой мощности и продолжительности перерывов.

При проектировании системы электроснабжения он складывается из величины недоотпущенной электроэнергии по отдельным участкам сети с учетом количества аварий и плановых отключений

$$W_{п.э} = \sum_{z=1}^Z S_z K_{oz} \tau_{п.з}, \quad (6.6)$$

где  $z$  – количество расчетных участков сети;

$S_z$  – мощность трансформаторных подстанций по  $z$ -му участку сети, кВт·А,

$K_{oz}$  – коэффициент одновременности включения электроприемников по  $z$ -му участку сети (при отсутствии реальных данных  $K_{oz} = 0,6$ );

$\tau_{пз}$  – суммарная продолжительность отключений за год по  $z$ -му участку сети.

В общем случае для системы электроснабжения суммарную продолжительность отключений во всех элементах сети за год можно определить по формуле [11]

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{п.л} + \tau_{р.л} + \tau_{п.п} + \tau_{п.н}, \quad (6.7)$$

где  $\tau_{п.л} = \Delta \tau_{п.л} L_{п.л}$  – длительность перерывов электроснабжения в питающих линиях 110, 35 кВ, ч;

$\tau_{р.л} = \Delta \tau_{р.л} L_{р.л}$  – длительность перерывов электроснабжения в распределительных линиях, ч;

$\tau_{п.п}$  – длительность перерывов электроснабжения при отказе трансформаторных подстанций, ч;

$\tau_{п.н} = \Delta \tau_{п.н} L_{п.н}$  – длительность перерывов из-за отключения низковольтной сети, ч;

$\Delta\tau_{п. л}, \Delta\tau_{р. л}, \Delta\tau_{п. н}$  – среднестатистические годовые удельные продолжительности отключений на 1 км линии, соответственно в питающих, распределительных и низковольтных сетях, ч/км (таблица 6.2);

$L_{п. л}, L_{р. л}, L_{п. н}$  – длина питающей, распределительной и низковольтной линий электропередачи, км.

**Таблица 6.2 – Среднестатистические значения годовой продолжительности отключений элементов сети**

Элемент сети	Ед. изм.	Удельная продолжительность отключения, ч/ед. изм.
Одноцепная питающая линия 110 кВ	1 км	0,4
Двухцепная питающая линия 110 кВ	1 км	0,16
Одноцепная питающая линия 35 кВ	1 км	0,7
Двухцепная питающая линия 35 кВ	1 км	0,28
Распределительная линия 10 (6) кВ	1 км	0,9
Низковольтная ВЛ 0,38 кВ	1 км	4,3
Однотрансформаторная подстанция 35/110/10 (6) кВ	1 шт	12
Двухтрансформаторная подстанция 35/110/10 (6) кВ	1 шт	0
Потребительская подстанция 10 (6)/0,4 кВ	1 шт	2,7

**Пример 6.2.** Оперативно-выездная бригада районных электрических сетей проводит обслуживание в год 376 км распределительных линий 10 кВ и 42 трансформаторных подстанции 10/0,4 кВ. Определить возможный объем недоотпуска электрической энергии потребителям на закрепленном за бригадой участке электрических сетей, если суммарная мощность трансформаторных подстанций составляет 8200 кВ·А.

**Р е ш е н и е.**

1. Определяем суммарную продолжительность отключений

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{р. л} + \tau_{п. п} = \Delta\tau_{р. л} L_{р. л} + \Delta\tau_{п. п} n = 0,9 \cdot 376 + 2,7 \cdot 42 = 451,8 \text{ ч.}$$

2. Вычисляем объем недоотпущенной электрической энергии

$$W_{п.э} = SK_0 \tau_{\Sigma} = 8200 \cdot 0,6 \cdot 451,8 = 2\,222\,856 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

В последние годы во взаимоотношениях энергоснабжающих организаций и потребителей наметились новые тенденции по вопросу недоотпуска электроэнергии.

Поскольку перерывы в электроснабжении оказывают существенное влияние на эффективность работы технологических установок и возможность возникновения значительного материального ущерба из-за простоя технологических процессов, порчи продукции и т.д., все большее распространение во взаимоотношениях получают договорные отношения. При таком подходе потребитель выбирает необходимый уровень надежности и возмещает затраты на проведение мероприятий по бесперебойной подаче электроэнергии. В случае невыполнения договорных обязательств энергоснабжающая организация выплачивает штраф. К сожалению научно-обоснованные рекомендации по регулированию отношений в этих случаях до последнего времени не разработаны, что сдерживает более широкое распространение такого подхода.

## **7 Мероприятия по повышению надежности электроснабжения**

### **7.1 Требования нормативных документов к надежности электроснабжения потребителей**

В отношении обеспечения надежности электроснабжения электроприемники в соответствии с Правилами устройства электроустановок [3] разделяются на три категории.

*Электроприемники первой категории* – электроприемники, перерыв в электроснабжении которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения. Из состава электроприемников первой категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима без аварийного останова производства с целью предотвращения угрозы для жизни людей, взрывов и пожаров.

Применительно к сельскохозяйственным потребителям к первой категории относятся крупные животноводческие комплексы и фермы (молочно-товарные фермы на 400 голов, комплексы по выращиванию и откорму крупного рогатого скота на 5000 голов и более, комплексы по выращиванию и откорму 12 000 свиней в год), а также птицефабрики. В сельской местности к первой категории также относятся электроприемники особо важных объектов несельскохозяйственного назначения – операционные отделения больниц, родильные дома.

*Электроприемники второй категории* – электроприемники, перерыв в электроснабжении которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовому простоя рабочих, механизмов, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей. В сельской местности к таким потребителям относятся: животноводческие и птицеводческие фермы небольшой производительности, тепличные комбинаты, кормоприготовительные предприятия, картофелехранилища, холодильники, инкубационные цехи рыбоводческих хозяйств.

*Электроприемники третьей категории* – все остальные электроприемники, не попадающие под определение первой и второй категорий.

Для электроприемников и потребителей в зависимости от их категории Правилами установлены допустимые длительности перерывов, которые обуславливают определенные требования к схемам построения систем электроснабжения и организации их эксплуатации.

Потребители и электроприемники первой категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников питания, и перерыв в их электроснабжении при нарушении электроснабжения от одного из источников может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания. Для электроснабжения особой группы электроприемников первой категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника. В качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприемников первой категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистемы, агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи. Источники резервного питания выбираются путем технико-экономического сравнения различных вариантов. Резервные источники электроснабжения наиболее ответственных потребителей первой категории должны вводиться в действие автоматически.

В качестве независимого источника питания недопустимо использование двух секций или систем шин, питающихся по двум цепям одной двухцепной воздушной линии; секций шин закрытого распределительного устройства, конструктивное исполнение которого допускает одновременное нарушение обеих секций шин при возникновении короткого замыкания в этом распределительном устройстве.

Если резервированием электроснабжения нельзя обеспечить непрерывность технологических процессов или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, должно быть осуществлено технологическое резервирование или установка специальных устройств безаварийного останова технологических процессов.



Электроприемники второй категории в нормальном режиме должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания. Для потребителей и электроприемников второй категории допустимы перерывы на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или оперативной бригады.

Допускается питание электроприемников и потребителей второй категории по одной воздушной линии и одним трансформатором, если имеется централизованный резерв трансформаторов.

Для производственных сельскохозяйственных потребителей второй категории длительность плановых отключений не должна превышать 3,5 ч. В течение суток допускаются повторные плановые отключения через 2 ч. При этом плановые отключения не допускаются в часы работы электрифицированных доильных установок. Длительность аварийных перерывов при питании потребителей второй категории по воздушным линиям и одному силовому трансформатору Правилами не регламентируются и определяются временем ремонта воздушной линии электропередачи или замены трансформатора.

Для электроприемников третьей категории электроснабжение может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденных элементов системы электроснабжения не превышают одних суток.

Питание потребителей различной категории в сельской местности осуществляется по общим распределительным сетям. При этом потребителей первой категории, которые требуют двух независимых источников питания, обычно не много, и их электропотребление не превышает 5% от общего количества отпускаемой электроэнергии. Поэтому необходим анализ технологических процессов и возможного ущерба от перерывов электроснабжения при отнесении потребителей к первой или второй категориям с одной стороны, и возможности обеспечения требуемой надежности, с другой.

Отнесение к той или иной категориям электроустановок потребителей перечисляется в акте разграничения балансовой принадлежности электрических сетей и эксплуатационной ответственности сторон, который является приложением к договору на электроснабжение.

Энергоснабжающая организация несет ответственность за бесперебойную подачу электроэнергии:

- потребителям первой категории после осуществления мероприятий по созданию резервных источников питания в соответствии с имеющимся проектом и договоренностью сторон;
- потребителей второй и третьей категорий при питании их по сетям до 1000 В, которые раньше принадлежали сельскохозяйственным потребителям и по своему состоянию на момент передачи их на баланс энергоснабжающей организации требовали капитально-восстановительного ремонта, – черед год со дня их приемки на баланс.

Ответственность энергоснабжающей организации за недопоставки электроэнергии на производственные нужды ограничиваются штрафными санкциями в соответствии с количеством недоотпущенной электроэнергии из-за неисправностей в системе электроснабжения, кроме недоотпуска вызванного:

- стихийными явлениями;
- неправильными действиями персонала потребителей (ошибочные включения, отключения или переключения, набросы на провода воздушной линии, механические повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи);
- прекращением подачи электроэнергии после предварительного предупреждения в случае неудовлетворительного состояния электроустановок абонента и не устранения им недостатков, самовольного присоединения к сетям энергосистемы или нарушения схем учета электроэнергии, отсутствия персонала для обслуживания электроустановок.

## **7.2 Обеспечение надежности электроснабжения при проектировании**

Уровень надежности систем электроснабжения на определенном этапе развития техники в конечном итоге определяется затратами на сооружение и эксплуатацию системы. Повышение надежности, как правило, связано с увеличением за-

трат на сооружение и эксплуатацию системы. Однако при этом уменьшается ущерб от перерывов электроснабжения.

Поскольку отсутствуют достоверные данные о значениях ущербов, в проектной практике при оценке надежности используются такие показатели, как параметр потока отказов  $\omega$  (число отказов в год) и эквивалентная продолжительность отключений.

Для потребителей различной категории по непрерывности питания установлены следующие нормативы по первому параметру:

для потребителей первой категории количество отключений не регламентировано, но продолжительность перерыва ограничена временем на автоматическое включение резервного электроснабжения;

для потребителей второй категории количество отключений принимается в соответствии с данными таблицы 7.1 в зависимости от времени восстановления электроснабжения

**Таблица 7.1 – Параметр потока отказов потребителей второй категории**

Среднее время перерыва электроснабжения, ч	$\tau < 0,5$	$\tau < 4$	$4 < \tau \leq 10$ , $P_{\text{расч}} > 120 \text{ кВт}$	$4 < \tau \leq 10$ , $P_{\text{расч}} < 120 \text{ кВт}$
Количество отключений в год	2,5	2,3	0,1	0,2

для потребителей третьей категории ( $\tau = 24 \text{ ч}$ ) – 3 отказа в год.

Эквивалентная продолжительность отключений определяется по формуле [4]

$$T = T_{\text{ав}} + rT_{\text{пл}}, \quad (7.1)$$

где  $T_{\text{ав}}$ ,  $T_{\text{пл}}$  – суммарная за год продолжительность аварийных и плановых отключений;

$r$  – коэффициент, учитывающий меньшую тяжесть плановых отключений ( $r = 0,33$ ).

Допустимая эквивалентная продолжительность отключений системы электроснабжения при принятом методе ее расчета принимается следующим образом:

$T = 0$  для потребителей и электроприемников первой категории;

$T = 35 \text{ ч/год}$  для остальных потребителей (в среднем три аварийных перерыва длительностью по 6 ч каждый и пять плановых отключений по 3,5 ч каждый).

В проектной практике при расчетах показателей надежности удельное значение эквивалентной продолжительности отключений элементов (ч/год·км) принимается по данным таблицы 6.2.

Установленные нормативы обеспечивают единый подход к проектированию схем электрических сетей. Методика принятия решений при использовании данного подхода основана на сопоставлении нормативных показателей надежности электроснабжения потребителей соответствующих категорий с расчетными данными.

Фактические показатели надежности систем электроснабжения могут существенно отличаться от расчетных. Так, проведенная обработка статистических материалов по эксплуатации распределительных электрических сетей одного из сетевых предприятий Северо-Кавказского региона [24] позволила получить следующие удельные показатели:

параметр потока отключений для электрических сетей 10 (6) кВ

$\omega = 0,5$  откл./км·год;

среднее время одного аварийного отключения  $\tau_a = 3,2$  ч;

среднее время одного преднамеренного отключения  $\tau_n = 2,7$  ч.

Для сравнения в соседнем регионе Нижнего Поволжья аналогичные показатели оказались равными [23]:

параметр потока отключений для электрических сетей 10 (6) кВ

$\omega = 0,51$  откл./км·год;

среднее время одного аварийного отключения  $\tau_a = 6$  ч;

среднее время одного преднамеренного отключения  $\tau_n = 5$  ч.

Надежность систем электроснабжения зависит от надежности элементов схемы, объема резервирования, принятой системы технических обслуживаний и ремонтов.

Количественные значения показателей надежности элементов сети зависят от многих факторов, из которых в первую очередь следует отметить качество и первоначальную прочность воздушных линий электропередачи и оборудования, их возраст, климатические условия (гололедно-ветровые нагрузки, интенсивность грозовой деятельности, особенности грунтов и др.), обеспеченность устройствами грозозащиты.

Показатели надежности воздушных линий электропередачи 10-35 кВ могут отличаться в 2-3 раза в различных климатических зонах при одинаковом времени эксплуатации и конструктивном исполнении линий.

Требования по надежности потребителей второй и третьей категорий, которые потребляют до 95% всей электроэнергии, могут быть обеспечены при использовании нерезервированной воздушной линии и однотрансформаторной подстанции 35/10 и 10/0,4 кВ. Если не принимать специальных мер, то при отключении для ремонта любого элемента такой схемы потребители остаются без напряжения. При этом отсутствие или неудовлетворительная работа автоматического повторного включения (АПВ) повышает в 1,5-2 раза число отключений линий. Как показала практика эксплуатации распределительных сетей, АПВ без выдержки времени часто не успешны и воздушные линии включаются в работу персоналом вручную.

Известно, что в распределительных электрических сетях перерывы обусловлены плановыми и аварийными отключениями.

Продолжительность одного планового отключения определяется временем работы бригады и наличием потребителей второй категории. В среднем среди потребителей электроэнергии в сельской местности около 50% потребителей относятся ко второй категории, и ограничение разовой продолжительности отключений в нерезервированных сетях приводит к увеличению их числа, дополнительным трудозатратам оперативного и ремонтного персонала и усложнению организации работ.

Продолжительность аварийных отключений в нерезервированных сетях определяется организацией оперативной работы, оснащенностью сети устройствами автоматического обнаружения и поиска места повреждения, состоянием транспортных средств, дорог, связи. В случае, когда бригада может немедленно выехать для устранения неполадок в системе электроснабжения, время на аварийные отключения сокращается до 1,5 ... 2 ч. Это время соизмеримо со временем, необходимым для отключения поврежденного участка сети и подаче напряжения по резервной перемычке в кольцевых резервированных сетях 10 кВ.

Плановые и аварийные ремонты воздушных линий 10 кВ в нерезервированных схемах сетей дают до 40 % числа ремонтов и до 30 % времени перерывов питания потребителей. При этом, исключая стихийные бедствия, время каждого пе-

перерыва питания не превышает одних суток, а в 60 ... 70 % случаев – 3,5 ч. С этой точки зрения радиальные схемы воздушных линий электропередачи удовлетворяют требованиям к надежности потребителей второй и третьей категорий.

Плановые и аварийные отключения трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и воздушных линий 0,38 кВ в общем числе перерывов питания потребителей имеют относительно малое значение. Однако плановые ремонты трансформаторных подстанций могут занимать более 3,5 ч, что требует специальной организации работ.

Плановые и аварийные ремонты ВЛ 35 кВ дают почти 50 % времени и 25 % числа перерывов питания потребителей в нерезервированных схемах сетей. Плановые ремонты ВЛ 35 кВ (верховые осмотры, замена и выравнивание опор, замена проводов и изоляторов и др.) занимают в среднем от 300 до 600 ч каждые 3 года на 100 км линий, основная часть из них приходится на год капитального ремонта. В плановом порядке ВЛ 35 кВ отключаются также для работ на подстанциях (около 100 ч в год), чистки изоляторов (30 ч в год), для реконструкции линий, включения новых подстанций, работ в сетях высшего напряжения и т.д.

Почти половина аварийных простоев ВЛ 35 кВ на деревянных опорах связана с их загниванием и возгоранием при грозе. Аварийные ремонты и замена опор ВЛ 35 кВ в отдельных случаях время более одних суток, и в этих случаях требования к надежности электроснабжения даже потребителей третьей категории не удовлетворяются. Ремонты проводов и замена изоляторов на ВЛ 35 кВ в подавляющем большинстве случаев проводится за время не более одних суток.

Таким образом, при наличии резервирования в звене 35 кВ надежность потребителей второй и третьей категорий, возможно обеспечить по радиальным линиям 10 кВ. Однако в ряде случаев оказывается экономически выгодным увеличить надежность сетей 10 кВ или 0,38 кВ сверх минимального уровня обеспечиваемого радиальными линиями.

### **7.3 Способы повышения надежности электроснабжения потребителей**

Если уровень надежности электроснабжения потребителей не соответствует нормам, система электроснабжения оснащается средствами повышения надежности, сокращающими количество и продолжительность отключений.

Выбор состава, количества, мест установки средств повышения надежности основывается на достижении нормированного уровня надежности наиболее экономичным путем.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей предусматриваются следующие технические меры:

- повышение надежности отдельных элементов электрических сетей, в том числе за счет применения новых материалов;
- секционирование сетей с помощью выключателей с АПВ, автоматических отделителей и разъединителей;
- использование различных видов резервирования;
- приближение напряжения 35-110 кВ к потребителям, разукрупнение подстанций 35-110 кВ;
- увеличение количества двухтрансформаторных подстанций и подстанций с двухсторонним питанием;
- разукрупнение подстанций 10/0,4 кВ и раздельное питание от них производственных и коммунально-бытовых потребителей;
- применение батарей статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

Рассмотрим основные мероприятия из предлагаемой совокупности.

Секционирование ВЛ, уменьшая протяженность сети, отключаемой при авариях, снижает число отключений понижающих подстанций. Наиболее доступным мероприятием в условиях эксплуатации является разделение ВЛ 10 (6) кВ на секции.

Неавтоматизированное секционирование является мероприятием, снижающим в первую очередь число и длительность преднамеренных отключений. Оно

выполняется с помощью линейных разъединителей. Установка на линейных опорах секционирующих разъединителей позволяет избежать отключения головных секций и магистралей во время ремонта оборудования в конце магистралей и на отпайках от них. Секционирующие разъединители устанавливаются на ответвлениях длиной более 2,5 км и, как правило, используются при ремонтах ВЛ. Наличие секционных разъединителей облегчает процесс определения мест замыкания на землю, уменьшает число потребителей, отключаемых при ремонтных работах.

При автоматическом секционировании ВЛ разбивают на участки, в начале которых устанавливаются специальные секционирующие аппараты, отключающие поврежденные участки, не нарушая нормальной работы остальных частей линии.. Оптимальные места установки секционирующих аппаратов определяются из условия максимального сокращения ущерба от перерыва электроснабжения потребителей.

При выборе количества и мест установки автоматических коммутационных аппаратов (АКА) в первую очередь должны быть рассмотрены мероприятия по надежному электроснабжению потребителей первой категории.

Местное резервирование электроснабжения потребителей первой категории целесообразно, если выполняется условие [4]

$$I_{рез} < I_{вых} + 0,5, \quad (7.2)$$

где  $I_{рез}$  – длина резервной линии, которую необходимо соорудить для осуществления местного резерва от независимого источника питания, км;

$I_{вых}$  – длина магистрального участка рассматриваемой линии 10 кВ, который необходимо соорудить для осуществления схемы питания опорной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, км.

При невыполнении условия (7.2) для электроснабжения потребителей первой категории следует применять схемы «заход-выход». Магистраль линии 10 кВ при этом должна быть оснащена устройством (пунктом) АВР.

Выбор количества и мест установки автоматических секционирующих устройств, обеспечивающих заданный уровень надежности потребителей второй и третьей категории, осуществляется в зависимости от схемы подстанции 35-110 кВ,



суммарной длины  $l_{\Sigma}$  и расчетной нагрузки  $P_{\Sigma}$  линий 10 кВ, наличия на линии 10 кВ потребителей первой категории. При этом максимальная длина участка линии (включая ответвления), к которому присоединены эти потребители, ограниченная коммутационными устройствами, во всех случаях не должна быть более 12 км.

Если к рассматриваемой линии присоединен потребитель первой категории и условие (7.2) не выполняется, тогда независимо от схемы трансформаторной подстанции выбор количества коммутационных аппаратов производится по номограммам (рисунок 7.1).

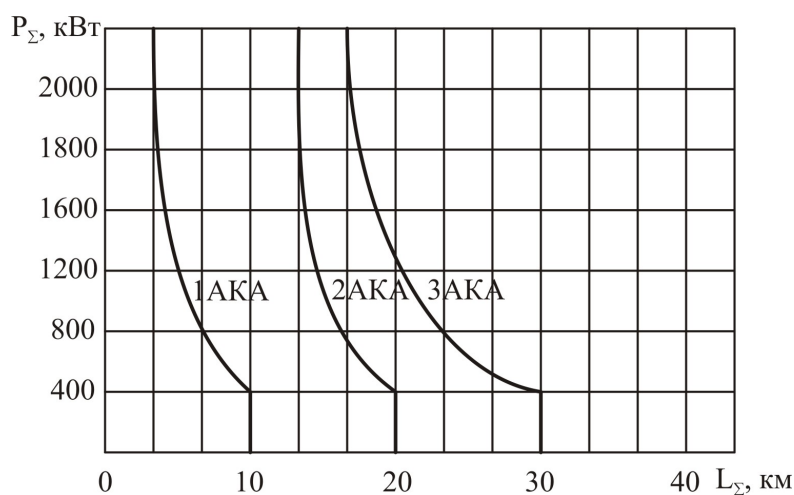


Рисунок 7.1 – Графики для определения количества АКА секционирования линии 10 кВ при оснащении ее АВР

В этом случае рассматриваются два участка линии:

первый – от головного выключателя линии до потребителя первой категории с суммарной расчетной нагрузкой  $P_{\Sigma 1}$  и длиной  $l_{\Sigma 1}$ ;

второй – от потребителей первой категории до сетевого АВР с нагрузкой  $P_{\Sigma 2}$  и длиной  $l_{\Sigma 2}$ .

Откладывая на графике точки с координатами  $P_{\Sigma 1}$ ,  $l_{\Sigma 1}$  и  $P_{\Sigma 2}$ ,  $l_{\Sigma 2}$ , определяем количество коммутационных аппаратов, которые необходимо установить соответственно на первом и втором участках.

Расчетная нагрузка линии 10 кВ определяется путем суммирования расчетных нагрузок всех потребителей, присоединенных к рассматриваемой линии, кроме нагрузки первой категории.

Если к рассматриваемой линии присоединен потребитель первой категории и выполняется условие (7.2), а также если к рассматриваемой линии присоединены только потребители второй и третьей категории, то в зависимости от схемы подстанции 110-35/10 кВ выбор количества коммутационных аппаратов производится по номограммам, аналогичным приведенной на рисунке 7.1 [4].

Примерное размещение устройств автоматического секционирования выбирается между точками, одна из которых делит линию (участок сети) на равные части по длине, а вторая – на равные части по нагрузке.

В ряде случаев автоматическое секционирование является единственным средством обеспечения требуемой чувствительности защит линий 10 (6) кВ.

Наибольшее распространение в распределительных электрических сетях для автоматического секционирования получили разработанные институтом Сельэнергопроект шкафы наружной установки К-36С с выключателями ВММ-10 для воздушных линий с одно и двухсторонним питанием.

Релейная защита секционирующего устройства выполнена по двухфазной двухрелейной схеме с вторичными реле РТ-85 с ограниченно зависимой выдержкой времени. Все шкафы оборудованы устройствами однократного АПВ и защитой от замыканий на землю с действием на сигнал. Шкаф для секционирования ВЛ с двухсторонним питанием имеет максимальную направленную защиту двухстороннего действия с реле РБМ.

Для питания цепей релейной защиты и автоматики предусмотрены трансформаторы наружной установки типа ОМ-1,2/10. Шкаф К-36С оборудован устройством обогрева с автоматическим управлением. Пункт секционирования включается в линию с помощью разъединителя, устанавливаемого на отдельной опоре. Шкаф устанавливается у анкерной опоры на железобетонной стойке. Для выката тележки и обслуживания пункта предусматривается площадка. Заход и выход ВЛ в шкаф осуществляется кабельными вставками.

Экономически оправдано разделение магистрали выключателями на секции длиной не менее 10 км.

Ввод резерва действиями выездных бригад применяется для повышения надежности потребителей второй и третьей категории. Резервная перемычка может соединить концевые участки или другие точки двух магистральных распреде-

тельных линий 10 (6) кВ, которые резервируют друг друга по схеме кольцевого питания. На магистрали с резервными переключками должны быть секционированы выключатели и разъединители или включены в расщелку магистрали проходные трансформаторные подстанции.

Целесообразность строительства резервной переключки должна быть оценена с учетом местных условий, времени ремонта сетей, режимов напряжений и сечения проводов ВЛ.

Опыт показывает, что при быстро ликвидируемых повреждениях, возникающих в дневное время, резервная переключка почти не используется, так как включение напряжения на неповрежденные участки занимает в среднем 2 ч. Указанное время соизмеримо со временем, необходимым для устранения неисправности и включения линии.

Создание сложных кольцевых сетей с тремя и более резервными связями нецелесообразно из-за усложнения схемы, увеличения вероятностей ошибок и несчастных случаев.

Автоматическое включение резервного питания на напряжении до 1000 В с нагрузкой до 600 А наиболее удобно осуществлять с помощью контактных станций, устанавливаемых в закрытых помещениях, которые отключаются при напряжении менее 50 % и включаются при напряжении более 80 % номинального напряжения. Недостатком АВР на стороне сети с напряжением до 1000 В является относительно высокая стоимость двухтрансформаторных подстанций и резервных связей. Поэтому схемы резервирования с АВР на стороне до 1000 В целесообразно применять только для ответственных потребителей первой категории в случаях, когда имеются независимые источники питания на территории одного поселения.

Использование сетевого резервирования предполагает достаточно высокую надежность самих сетей. Наиболее целесообразна разомкнутая схема работы питания в нормальном режиме с автоматическим подключением неповрежденных участков к другому источнику энергии при авариях.

Наряду с сетевым резервированием находит применение также местное резервирование, так как при неблагоприятных атмосферных условиях (гололед, ураган, гроза и т.д.) возможно одновременное повреждение двух линий.

Кроме этого предупредить перерывы питания потребителей при производстве ремонтов нерезервированной сети можно путем использования передвижных резервных подстанций и электростанций.

Передвижные подстанции типа ПКТП 400/10 с трансформатором до 400кВ·А обычно монтируются на автомобильном прицепе, полностью укомплектованы оборудованием и кабелями 10 и 0,4 кВ, транспортируются автомобилем. Но наиболее часто для резервирования электроснабжения потребителей используются передвижные электростанции. Такие станции обладают сравнительно большой эксплуатационной надежностью, удобны в эксплуатации, быстро разворачиваются и запускаются. Техничко-экономические характеристики передвижных электростанций мощностью 100 и 200 кВт приведены в таблице 7.2.

**Таблица 7.2 – Параметры передвижных электростанций**

Параметры	Тип электростанции	
	ЭСДА-100	ЭСДА-200
Номинальная мощность, кВт	100	200
Напряжение, В	400	400
Время непрерывной работы, ч	150	150
Моторесурс, ч	5000	4000
Удельный расход топлива, кг/кВт·ч	0,30	0,26
Время запуска из горячего состояния, с	30	30
Время запуска из холодного состояния, мин	30	30

Для сельскохозяйственных потребителей первой категории, если нет специальных ограничений, рекомендуется применять холодный резерв электростанций.

Управление электроагрегатами может быть ручным, дистанционным или автоматическим. Система автоматики предусматривает стартерный пуск электростанции и включение нагрузки, контроль работы, защиту от аварийных режимов, сигнализацию состояния, аварийную остановку. Система автоматики предусматривает предварительный прогрев и самопрогрев агрегатов. Станция снабжается расходными баками топлива и масла. Обслуживается передвижная электростанция одним машинистом.

В зависимости от схемы сети и ремонтируемого объекта передвижная электростанция может подключаться к шинам 0,4 кВ трансформаторной подстанции

или через передвижную КТП к одной из ячеек 10 (6) кВ. При этом необходимо обеспечить баланс нагрузки и мощности, исключить возможность подачи напряжения на ремонтируемый участок и подачи напряжения из сети на электроагрегат.

Тип автономного источника резервного электропитания, его мощность, место размещения и способ подключения к сети определяются в составе электротехнической части проекта электрификации объекта.

Для повышения надежности электроснабжения большое значение имеют также организационно-технические мероприятия, особенно касающиеся преднамеренных отключений.

Проведение ремонтных и других видов работ в системах электроснабжения следует подчинять требованиям минимального ущерба для потребителей с учетом режимов работы последних. Для сокращения числа отключений потребителей необходимо совмещение по времени работ, проводимых на различных ступенях напряжения.

Эффективным средством повышения надежности электроснабжения следует рассматривать рациональную организацию эксплуатации электрических сетей. При этом одной из важных задач эксплуатации является создание хорошо налаженной системы сбора и обработки информации об отказах электрооборудования, а также установление величины ущерба для конкретных потребителей. При этом следует помнить, что эффективная эксплуатация электрооборудования не мыслима без строго соблюдения персоналом энергоснабжающей организации правил технической эксплуатации.

## Список использованных источников

1. **ГОСТ 27.002-89.** Надежность в технике. Основные понятия термины и определения. – М.: Госстандарт, 1989.
2. **Надежность систем энергетики.** Терминология. – М.: Наука, 2002.
3. **Правила устройства электроустановок.** – Новосибирск: Сибирское университетское издание, 2006.
4. **Методические указания** по обеспечению при проектировании нормативных уровней надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: Сельэнергопроект, 1986.
5. **Методика** определения ущерба сельскохозяйственному производству от перерывов в подаче электроэнергии. – М.: Госагропром СССР, 1986.
6. **Ерошенко Г.П., Медведько Ю.А., Таранов М.А.** Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий. – Ростов-на-Дону: «Терра», 2001.
7. **Хорольский В.Я., Таранов М.А.** Анализ и синтез систем автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов. – Ростов-на-Дону: «Терра», 2001.
8. **Хорольский В.Я., Таранов М.А., Медведько Ю.А.** Задачник по эксплуатации электрооборудования. – Ростов-на-Дону: «Терра Принт», 2006.
9. **Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.И.** Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: Колос, 2000.
10. **Сырых. Н.Н.** Эксплуатация электрооборудования сельскохозяйственных предприятий.– М.: Агропромиздат, 1986.
11. **Водяников В.Т.** Экономическая оценка энергетики АПК. – М.: «ИКФ ЭКМОС», 2002.
12. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001.
13. **Половко А.М., Гуров С.В.** Основы теории надежности. – Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2006.
14. **Теория надежности** радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Под ред. Г.В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976.

15. **Вероятностные методы** в вычислительной технике. – М.: «Высшая школа», 1986.
16. **Анищенко В.А.** Надежность систем электроснабжения. – Минск: Технопринт, 2001.
17. **Корчемный Н.А., Машевский В.П.** Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве. – Киев: «Урожай», 1988.
18. **Фокин Ю.А.** Вероятностные методы в расчетах надежности электрических систем. – М.: МЭИ, 1983.
19. **Гук Ю.Б.** Теория надежности в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
20. **Фокин Ю.А.** Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
21. **Фокин Ю.А., Туфанов В.А.** Оценка надежности систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
22. **Гук Ю.Б.** Теория и расчет надежности в системах электроснабжения. – М.: Энергия, 1970.
23. **Федосеенко Р.Я., Мельников А.Я.** Эксплуатационная надежность электрических сетей сельскохозяйственного назначения. – М.: Энергия, 1977.
24. **Хорольский В.Я., Жданов В.Г.** Автоматизация информационных процессов энергослужб предприятий. – Ставрополь: «АГРУС», 2004.
25. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. – М.: «Советское радио», 1972.

# Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	4
1.1 Терминология, применяемая в теории надежности.....	4
1.2 Задачи оценки надежности электроснабжения потребителей.....	8
2 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	13
2.1 Единичные показатели надежности.....	13
2.1.1 Показатели безотказности неремонтируемых объектов .....	13
2.1.2 Показатели безотказности ремонтируемых объектов .....	17
2.1.3 Ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость.....	19
2.2 Комплексные показатели надежности.....	23
2.3 Особенности использования показателей надежности для оценки систем электроснабжения .....	27
3 МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	30
3.1 Виды моделей отказов.....	30
3.2 Показатели надежности для различных моделей отказов.....	32
4 ФАКТОРЫ, НАРУШАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ .....	39
4.1 Влияние различных факторов на показатели надежности электрооборудования .....	39
4.2 Статистика отказов и причины выхода из строя отдельных элементов систем электроснабжения .....	45
5 РАСЧЕТЫ НАДЕЖНОСТИ.....	53
5.1 Расчет надежности неремонтируемых систем при проектировании .....	53
5.2 Расчет надежности восстанавливаемых систем .....	62
5.2.1 Элементы теории массового обслуживания.....	62
5.2.2 Определение показателей надежности восстанавливаемых систем ....	66
5.3 Расчет надежности по статистическим данным об отказах электрооборудования .....	93



5.4 Моделирование показателей надежности на ЭВМ .....	99
6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕДООТПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ .....	103
7 МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	110
7.1 Требования нормативных документов к надежности электроснабжения потребителей .....	110
7.2 Обеспечение надежности электроснабжения при проектировании.....	113
7.3 Способы повышения надежности электроснабжения потребителей...	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	125