

О. В. Белоусова

***ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ***

Учебное пособие



**Воронеж
2016**



Международный институт компьютерных технологий

О. В. Белоусова

***ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ***

Рекомендовано
Методическим советом института
в качестве учебного пособия

Воронеж
2016

УДК 621.311.019.3

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Н.В. Ситников

Белоусова О. В.

Теория надежности в электроэнергетике: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения. / О.В. Белоусова. – Воронеж: Междунар. ин-т компьют. технологий, 2016. – 165 с.

Учебное пособие содержит теоретические сведения по основным разделам теории надежности, изучаемым студентами в курсе «Электроэнергетические системы и сети».

Предназначено для студентов направления подготовки (специальности) 13.03.02 – *Электроэнергетика и электротехника*, профиль подготовки / специализации: *Электроэнергетические системы и сети*, квалификация (степень) выпускника: *бакалавр*.

Табл. 4. Ил. 39. Библ.: 19 назв.

Ответственный за выпуск – заведующий кафедрой «Электроэнергетика» доктор техн. наук, проф. Анненков А. Н.

© Белоусова О.В., 2016

© Международный институт
компьютерных технологий, 2016

Содержание

Введение	6
Глава 1 Основы теории надежности электрических систем	11
1.1 Развитие науки о надежности электрических систем. Ее особенности и задачи	11
1.2 Качество системы и определяющие ее свойства	17
1.3 Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения	24
1.4 Технические состояния объекта	29
1.5 Отказы электрооборудования в системах электроснабжения	34
Глава 2 Основные показатели надежности и их краткая характеристика	44
2.1 Показатели безотказности объектов	45
2.1.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов	46
2.1.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов	53
2.2 Показатели долговечности объектов	57
2.3 Показатели ремонтпригодности и сохраняемости объектов	60
2.4 Единичные и комплексные показатели надежности	67
Глава 3 Вероятностные модели для оценки надежности	69
3.1 Модели отказов отдельных элементов системы	70

3.2 Модель отказов установок при последовательном соединении элементов	74
3.3 Модель отказов установок при параллельном соединении элементов	81
Глава 4 Методы оценки надежности электроэнергетических установок и систем	89
4.1 Классификация режимов и методов	89
4.2 Метод, учитывающий зависимые отказы элементов	92
4.3 Метод расчетов структурно-функциональной надежности электроэнергетических установок	95
4.4 Метод расчетов надежности на основе графов цепей Маркова	100
4.5 Логико-вероятностный метод расчета надежности с использованием графов деревьев событий	104
4.6 Метод минимальных путей и сечений	106
Глава 5 Законы распределения случайных величин в задачах надежности электроснабжения	115
5.1 Биномиальное распределение	117
5.2 Распределение Пуассона	119
5.3 Экспоненциальное (показательное) распределение	125
5.4 Закон равномерного распределения вероятностей	129
5.5 Нормальное распределение (распределение Гаусса)	132
5.6 Распределение Вейбулла	136
Глава 6 Повышение надежности систем электроснабжения	142

6.1 Влияние качества электроэнергии на надежность систем электроснабжения	142
6.2 Качественный анализ надежности схем распределительных устройств	148
6.3 Рекомендации по повышению надежности систем электроснабжения	153
Список литературы	160
Список сокращений	162

Введение

2 октября 2003 года за № 503 вышел приказ РАО «ЕЭС России» «О мерах по повышению системной надёжности ЕЭС России в условиях реформирования электроэнергетики». Выходу приказа предшествовали события, произошедшие 14 августа в США, 23 сентября в Дании и Швеции и 28 сентября 2003 в Италии, в результате которых из-за системной аварии оказались без электричества территории с населением соответственно в пятьдесят, два и пятьдесят семь миллионов человек. В России таких масштабных по последствиям системных аварий в последних десятилетиях не наблюдалось, однако, крупные аварии на линиях электропередачи (ЛЭП) при воздействии интенсивных гололёдно-ветровых нагрузок многократно происходили.

В РАО «ЕЭС России» создан Совет по координации работ для обеспечения системной надёжности ЕЭС России, основными задачами которого являются определение стратегических направлений повышения системной надёжности, инициирование концептуальных разработок и проведение единой политики в вопросах развития и модернизации систем технологического управления, организации разработки нормативно-технической документации (НТД) по обеспечению системной надёжности и др.

Образование ЕНЭС и создание ОАО «ФСК ЕЭС» определяет необходимость формирования четких требований и подходов к обеспечению надёжности функционирования и развития электрических сетей, регламентированию и коммерческой оценке надёжности инфраструктурных образований, четкого разделения ответственности за надёжность среди субъектов рынка в целом.

В СССР, а затем и в России ведущую координационную роль по вопросам надёжности систем энергетики выполняет постоянно действующий научный семинар «Методические вопросы исследования надёжности больших систем

энергетики», организуемый более 40 лет Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Несмотря на имеющиеся достижения в теоретических разработках, они не в полной мере удовлетворяют потребностям практики проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) в современных условиях. Так, например, имеют место несогласованность в терминологии по вопросам надёжности.

Эти и другие несоответствия осложняют понимание и внедрение в практику научных результатов. Поэтому одна из задач состоит в устранении имеющихся несогласованностей в терминологии и подходах.

Определенная трудность выявилась при выборе и обосновании необходимого числа контролируемых показателей для оценки надёжности работы электрической сети. Существующий в теории надёжности набор показателей не ориентирован на особенности работы электрической сети, как сложного технического комплекса.

Так расчеты, выполняемые разными организациями, дают значительно отличающиеся между собой значения искомого расчетного показателя надежности схемы электроустановки или распределительного устройства (РУ) и приводят к разным выводам и рекомендациям даже в тех случаях, когда применяется один и тот же метод расчета. Различие расчетных оценок надежности является следствием использования при расчетах таких исходных эксплуатационных показателей надежности (ЭПН) одних и тех же видов электрооборудования, которые различаются у разных организаций в несколько раз (эти показатели получены разными методами, при учете отличающихся критериев и условий отказов).

Поэтому при эксплуатации электрических сетей необходимо иметь постоянный контроль изменений во времени показателей надёжности основного оборудования, электросетевых объектов и сети в целом. Для этих целей наиболее применимы статистические оценки надёжности по данным эксплуатации. Полученные ЭПН должны быть

статистически достоверными и пригодными для вероятностного анализа и расчета надежности схем электрических соединений электроустановок электростанций (ЭС) и сетей.

Предлагаемая методика должна быть единой для всех энергопредприятий и энергосистем, что позволит получить статистически достоверные ЭПН электрооборудования для данного энергообъединения с учетом размещения электрооборудования (в закрытых или открытых РУ) и других условий эксплуатации, в том числе климатических.

Целесообразно так же сосредоточение статистической информации в едином центре, что ни в коем случае не должно исключать учета нарушений и их анализа на каждом энергопредприятии. Основными доводами в пользу централизованного анализа технологических нарушений являются:

- В ЕНЭС содержится много объектов, на которых установлено однотипное оборудование. При централизованном анализе можно получать более достоверные показатели надёжности оборудования за сравнительно небольшой период наблюдения.

- Вследствие вероятностного характера возникновения, протекания и возможных последствий технологических нарушений практическая ценность анализа аварийности и надёжности возрастает, если в исходной статистической информации содержится большое число случаев.

- Централизованный анализ позволяет предотвратить многократные повторения одних и тех же по своему характеру технологических нарушений на разных предприятиях за счет ускоренного выявления причин возникновения нарушений и разработки соответствующих рекомендаций по их устранению.

- Разработка обоснованных нормативов по показателям надёжности, промышленной безопасности и живучести, мер и мероприятий по предотвращению технологических нарушений и снижению тяжести их последствий возможна только на

основе обобщения опыта эксплуатации максимально возможного числа энергообъектов.

В связи с изложенным стоит задача разработки инженерных методик анализа аварийности в электрической сети и алгоритмов расчёта показателей надёжности по статистическим данным.

Одновременно с решением указанной задачи требуется разработка автоматизированной системы анализа аварийности в электрической сети с получением контролируемых надёжностных показателей и оценок тенденций их изменения во времени.

Полученные на основе единой методики ЭПН электрооборудования ЭС и сетей могут быть использованы в качестве исходных для вероятностного анализа и расчетной оценки надёжности технических решений по главным схемам электрических соединений, схемам питания и резервирования собственных нужд (СН) ЭС, подстанций и участков электрических сетей, для сравнительной количественной оценки уровня надёжности систем электроснабжения (ЭСН) потребителей в нормальных и ремонтных режимах. Это позволит более обосновано сопоставлять, оценивать и выбирать варианты схемы электрических соединений на этапах проектирования новых, и реконструкции действующих энергообъектов с учетом ремонтных режимов, а также находить узкие места и разрабатывать меры по обеспечению надёжной работы действующих ЭС и сетей в нормальных и ремонтных режимах, при выводе в ремонт или резерв основного электрического и тепломеханического оборудования (секции или систем сборных шин (СШ), турбогенераторов без генераторных выключателей) или выводе в ремонт резервных источников СН (трансформаторов и линий).

При наличии вычислительной системы получения оценок надёжности работы электрической сети, особенно оценок надёжности ЭСН узлов нагрузок, будет возможным решение

актуальных вопросов компенсации потребителями затрат сети на обеспечение повышенного уровня надёжности.

Решение перечисленных задач будет способствовать выполнению требований по обеспечению надёжности ЕНЭС в условиях развивающихся конкурентных отношений в электроэнергетике.

Глава 1 Основы теории надежности электрических систем

1.1 Развитие науки о надежности электрических систем. Ее особенности и задачи

Исторически наука о надежности развивалась по двум основным направлениям:

- Математическое направление возникло в радиоэлектронике, связано с развитием математических методов оценки надежности, особенно применительно к сложным системам, с разработкой методов статистической обработки информации о надежности, разработкой структур систем, обеспечивающих высокий уровень надежности. Теоретической базой этого направления являются: теория вероятностей, математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическое моделирование и другие разделы математики.

- Физическое направление возникло в машиностроении, связано с изучением физики отказов, с разработкой методов расчета на прочность, износостойкость, теплостойкость и др. Теоретической базой этого направления являются естественные науки, изучающие различные аспекты разрушения, старения и изменения свойств материалов: теории упругости, пластичности и ползучести, теория усталостной прочности, механика разрушения, трибология, физико-химическая механика материалов и др.

В настоящий период идет активный процесс взаимного слияния этих направлений, перенесения рациональных идей из одной области в другую и формирование на этой основе единой науки о надежности.

Применительно к энергосистемам основные принципы расчета надежности были даны в 30-40-х годах. Первые серьезные работы в области надежности энергосистем были посвящены расчетам резерва. Теория надежности применительно к энергосистемам имеет ряд особенностей и

опирается на спецдисциплины («Электрические системы и сети», «Переходные процессы в энергосистемах», «Электрические машины», «Релейную защиту и автоматику»).

Наука о надежности занимается анализом общих закономерностей, определяющих долговечность работы различных устройств и сооружений, разработкой способов предупреждения отказов на стадиях проектирования, сооружения, эксплуатации, оценивает количественно вероятность того, что характеристики объекта будут в пределах технических норм на протяжении заданного периода времени.

Математический аппарат теории надежности основан на применении таких разделов современной математики как теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическая логика, теория графов, теория распознавания образов, теория экспертных оценок, а также теория вероятностей, математическая статистика и теория множеств. Проблема надежности в технике вызвала к жизни новые научные направления: теория надежности, физика отказов, техническая диагностика, статистическая теория прочности, инженерная психология, исследование операций, планирование эксперимента и т.п.

В практической деятельности инженеру-энергетику приходится принимать различные решения. Например, выбирать проектный вариант энергосистемы или ее части, производить реконструкцию ее сетей и станций, назначать режимы. В энергетике на выбор решения влияет большое количество факторов. Одни из них можно численно проанализировать и сократить область вариантов решения. Другие не имеют теоретической ясности для количественного описания. Появляется неопределенность, преодолевать ее помогают знания, опыт, интуиция, качественный анализ. Появляется риск выбора неоптимальных и некачественных решений. Среди других факторов, надежность имеет особое место, ее надо учитывать всегда. Последствия от ненадежности такие серьезные, что требуется постоянное

совершенствование методов проектирования, строительства, эксплуатации энергосистем, позволяющих полнее учитывать надежность.

Основной задачей энергосистем является снабжение потребителей электроэнергией в нужном количестве и при необходимом качестве. На это влияют непредвиденные причины - отказы или аварии в энергосистемах, перебои в топливноснабжающей системе, нерегулярное поступление топлива, гидроресурсов и т.п. Известны различные средства, повышающие надежность энергосистем: релейная защита (РЗ) от коротких замыканий (КЗ), автоматические повторные включения (АПВ), автоматический ввод резерва (АВР), автоматическое регулирование возбуждения, автоматическая частотная разгрузка, автоматическое регулирование частоты и мощности, автоматизация генераторов, автоматическое отключение генераторов на гидростанциях. Кроме этого, специальные схемные и режимные мероприятия по повышению надежности (неполнофазные режимы, плавка гололеда, дублирование генераторной мощности, увеличение пропускной способности межсистемных связей, трансформаторных подстанций (ТП), специальное автоматическое отключение нагрузки при системных авариях, резервирование мощности). Деление потребителей на категории по надежности и рекомендации по построению схем способствует обеспечению структурной надежности энергосистем.

От надежности ЭСН зависят промышленность, быт, сельское хозяйство. Зависимость эта такая сильная, что ее нарушение приводит к огромному материальному ущербу, имеющему масштабы национального бедствия. Например, Нью-Йоркская авария в ноябре 1965г в США привела к тому, что на территории с населением 30 млн. человек более 10 часов была приостановлена жизнедеятельность, ущерб оценивался приблизительно 100 млн. долларов. Последовавшие за ней десятки подобных аварий завершились аварией 13 июля 1977 года в Нью-Йорке с еще более

тяжелыми последствиями. В течение 25 часов была парализована жизнь одного из крупнейших городов мира. Ущерб составил приблизительно 1 млрд. долларов. Чернобыльская авария на АЭС - самая страшная. Ущерб оценивается сотнями млрд. долларов.

В энергосистемах последние несколько десятков лет наблюдается тенденция укрупнения всех элементов, увеличение их единичной мощности. Так, например, в энергетике СССР за период с 1970г. по 1985 год возросла степень концентрации генерирующих мощностей: количество ТЭС и АЭС мощностью 2000 МВт и более достигло 28, ГЭС мощностью 2000 МВт и более - 6; наибольшая мощность агрегата ТЭС увеличилась с 800 до 1200 МВт, АЭС - с 365 до 1500 МВт, ГЭС - с 500 до 640 МВт. Мощность наиболее крупных ЭС достигла: ТЭС - 4000 МВт, АЭС - 4000 МВт, ГЭС - 6000 МВт (против соответствующих значений 1970г. - 3000, 575 и 5000 МВт). Технический прогресс в развитии генерирующих мощностей проявился также в увеличении с 1970 по 1985г. доли конденсационных энергоблоков на сверхкритические параметры пара, а также доли теплофикационных агрегатов на давление пара 13-24 МПа. Общая протяженность (в одноцепном исчислении) линий напряжением 220 кВ и выше - с 9,8 до 35,9 тыс. км (в том числе 750 кВ - с 0,1 до 4,35 тыс. км, 1150 кВ с 0 до 0,9 тыс. км).[12]

Указанные обстоятельства привели к тому, что обеспечение надежности энергетических систем стало ключевой проблемой современной энергетики. Связь между энергосистемой, ее элементами и внешней средой носит стохастический (вероятностный) характер и можно говорить лишь о вероятности полного достижения энергосистемой своей цели - передачи электроэнергии потребителю. Поэтому надежность работы энергосистемы всегда включает *отказ (нарушение)*. Неполнота надежности энергосистемы дает потери выходного эффекта ее работы, на практике - недоотпуск энергии потребителям.

Теория надежности энергосистем основывается на вероятностно-статистической природе ее поведения. В последнее время с увеличением системных аварий, разрабатываются методы оценки вероятности.

Для применения при анализе надежности энергосистемы теории вероятности энергосистема должна быть избыточной (**избыточность** - дополнительные средства и возможности для выполнения энергосистемой заданных функций). Избыточность энергосистемы выступает в следующих формах:

1 Резервирование (повышение надежности дублированием элементов и функций, предоставление дополнительного времени для выполнения задачи, использование избыточной информации при управлении);

2 Совершенствование конструкций и материалов, из которых сделаны элементы энергосистемы, повышение их запасов прочности, долговечности, устойчивости неблагоприятным явлениям внешней и внутренней среды;

3 Совершенствование технического обслуживания, оптимизация периодичности и глубины капитальных и профилактических ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов;

4 Совершенствование систем контроля и управления процессами в электрических системах.

Проблема надежности управления энергосистем (как и других технических систем) за последние 2-3 десятилетия резко обострилась. Это вызвано следующими причинами:

1 Резким увеличением сложности энергосистем, включающих миллионы потребителей, тысячи узлов и элементов;

2 Экстремальностью условий эксплуатации многих элементов энергосистем (высокие скорости, ускорения, температуры и давления, вибрация, повышенная радиация и т.д.);

3 Повышение требований к качеству работы (эффективность, высокие параметры энергии);

4 Увеличение ответственности, функций, выполняемых энергосистемой (высокой экономической и технической ценой отказа);

5 Полной или частичной автоматизацией, широким использованием ПЭВМ для управления, и как следствие, исключением или уменьшением непосредственного контроля человеком работы энергосистемы и ее элементов.

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

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

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

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

Основной задачей теории надежности является разработка и изучение методов обеспечения эффективности работы различных объектов в процессе их эксплуатации, а также в определении и изучении количественных характеристик надежности и их связи с показателями экономичности. Существуют два направления повышения надежности: повышение надежности элементов, из которых состоит рассматриваемый объект, и создание объекта с высокой степенью надежности из относительно ненадежных элементов, используя различные виды резервирования. Максимального эффекта в повышении надежности, очевидно,

можно добиться рациональным сочетанием этих двух направлений.

1.2 Качество системы и определяющие ее свойства

Понятие «надежность» широко используется во всех сферах деятельности человека (наука, техника, медицина и т. д.), что и определяет широту его толкования. Однако практическое решение многих задач, а иногда и выяснение их сути оказывается совершенно невозможным без четкого установления некоторых понятий и соотношений между ними, выделения определенных свойств и их количественного описания. Поэтому изучение надежности целесообразно начать с рассмотрения понятий и характеристик надежности, которые используются в решении задач, возникающих при создании и эксплуатации искусственных технических систем вообще и электроэнергетических в частности.

Под **системой** понимается совокупность взаимосвязанных устройств, которая предназначена для самостоятельного выполнения заданных функций. К примеру, ЭЭС представляет собой совокупность взаимосвязанных ЭС, электрических сетей, узлов нагрузок, объединенных процессом производства, преобразования, передачи и распределения электроэнергии для снабжения потребителей.

Отдельные части, на которые можно подразделить систему, представляющие собой законченные устройства, способные самостоятельно выполнять некоторые локальные функции в системе принято называть **элементами** (например, генераторы, трансформаторы, ЛЭП и т. д.).

Деление системы на элементы - процедура условная и производится на том уровне, на котором удобно ее рассматривать для решения конкретной задачи. Например, можно рассматривать генератор, трансформатор блочных станций как отдельные элементы, но иногда их удобно объединить в один элемент. Условность подразделения системы на элементы состоит еще и в том, что любой элемент, в свою очередь, может рассматриваться как система. Например, воздушная линия электропередачи (ВЛ) состоит из таких элементов, связанных определенным образом, как

гирлянды изоляторов, опоры, фундаменты, провода, тросы, заземлители и т. д.

В связи с этим, рассматривая многие свойства и характеристики элементов и систем, в тех случаях, где нет необходимости подчеркивать свойства, присущие только системам или только элементам, будем говорить об объектах. В качестве объекта могут рассматриваться система, подсистема или элемент.

Объект – это предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в периоды проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытаний на надежность. Объектами могут быть системы и их элементы, в частности технические изделия, устройства, аппараты, приборы, их составные части, отдельные детали и т.д.

Первичным по отношению к понятию "надежность" является понятие "качество".

Качество объекта - совокупность свойств и признаков, определяющих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением, и выражающая его специфику и отличие от других объектов.

Этап применения (эксплуатации) объекта охватывает определенный, как правило, длительный период времени. А под влиянием различных факторов может произойти изменение уровня свойств, определяющих качество объекта и эффективность его функционирования. Т.о., предметом науки о надежности является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы.

Специфическими особенностями вопросов надежности являются:

- учет фактора времени. Надежность является как бы "динамикой качества", поскольку исследует временное количественное изменение показателей качества,

первоначальный уровень которых был заложен при разработке, обеспечен при изготовлении и реализуется при эксплуатации;

- прогностическая ценность результатов. Проблемы надежности связаны, прежде всего, с прогнозированием поведения объекта в будущем, так как простая констатация уровня надежности объекта, уже выработавшего свой ресурс, имеет, вообще говоря, малую ценность. Особенно большое значение имеет прогноз на ранних стадиях жизненного цикла объекта (разработка и изготовление), когда необходимо дать оценку эффективности принятых конструкторских решений и применяемых технологических методов для обеспечения требуемого уровня качества и эффективности применения объекта в предполагаемых условиях эксплуатации, в течение необходимого времени применения.

Следует иметь в виду, что изменение показателей качества объекта во времени может быть абсолютным и относительным.

Абсолютное изменение качества связано с различными повреждающими процессами, воздействующими на объект при эксплуатации и изменяющими свойства и состояние материалов, из которых изготовлен объект или его составные части; за счет этого происходит прогрессивное снижение показателей качества объекта и его физическое старение (физический износ).

Относительное изменение качества объекта связано с появлением новых аналогичных объектов с более совершенными характеристиками, в связи с чем, показатели данного объекта становятся ниже среднего уровня в совокупности объектов аналогичного целевого назначения, хотя в абсолютных значениях они могут не изменяться (моральный износ).

Наука о надежности изучает только абсолютное изменение показателей качества объектов, связанное с протеканием различных повреждающих процессов.

К определяющим качеством свойствам технической системы наиболее часто относят надёжность, экономичность и безопасность, а при определённых требованиях к системе – также живучесть.

Итак, в соответствии с ГОСТ 27.002-89 [18] надёжность трактуется следующим образом.

Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Как видно из определения, надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его пребывания может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Общей характеристикой показателей надёжности является то, что они имеют вероятностную природу и характеризуют вероятность наступления определённого события или выполнения заданных требований. Возможны оценки надёжности средним значением контролируемой случайной величины (СВ), дополненным доверительными границами.

Показатель надёжности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта. Показателем надёжности принято называть признак, по которому оценивается надёжность элемента, а характеристикой надёжности – количественное значение этого показателя для этого элемента.

Нормируемый показатель надёжности – это показатель, значение которого регламентировано НТД и (или) конструкторской (проектной) документацией на объект.

Отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики [2, 11, 17] показывает, что показатели надёжности в общем случае образуют три группы.

Первая группа – это *вероятность* какого-либо события, например, отказа.

Вторая группа – это *интенсивность* событий, например, число отказов в единицу времени.

Третья группа – это *средняя продолжительность* события (математическое ожидание), например, средняя продолжительность времени между отказами, средняя продолжительность времени восстановления после отказа.

В практике получило применение задание пороговых значений показателей надёжности, выполняющих роль нормативных требований. Нормативные требования принимаются соглашением с соответствующими обоснованиями и зависят от достигнутого в данный момент времени технического прогресса в области используемых технологий и оборудования, уровня организации эксплуатации и других факторов, и с течением времени должны пересматриваться.

Другим важным свойством является *экономичность*, которая характеризуется показателями использования средств, вкладываемых в объект. Такими показателями экономичности могут быть себестоимость оказываемых услуг по передаче единицы энергии, прибыль, рентабельность и другие, а для оценки решений по развитию электрической сети – чистый дисконтированный доход, индекс доходности, внутренняя норма доходности и другие.

В последнее время всё большую значимость приобретает свойство *безопасности* технических систем.

Безопасность - это способность системы функционировать, не переходя в критические состояния, угрожающие здоровью и жизни людей, окружающей среде, другим техническим системам, или наносящие другой ущерб в больших масштабах.

В проблеме безопасности сложных технических комплексов следует выделить два направления. Первое из них относится к их нормальной повседневной эксплуатации. Неизбежные техногенные воздействия на человека и

природную среду, а также отходы производства выдвигают ряд практических задач по охране труда и экологичности используемых технологий. Второе направление связано с технологическими нарушениями и получило название промышленная безопасность.

Под промышленной безопасностью технического объекта (системы) понимается его способность обеспечить защиту человека, природной среды и собственности от опасных воздействий, возникающих при авариях и инцидентах на этом объекте.

Если при анализе надёжности основное внимание уделяется изменению состояния исследуемого объекта, например, нарушению способности выполнять свои функции из-за произошедшего технологического нарушения, то при изучении промышленной безопасности выявляются причинно-следственные связи возникновения аварий и других нарушений с их последствиями (социальными, экологическими, экономическими). Показателями промышленной безопасности являются риски последствий от аварий и инцидентов, которые показывают меру опасности неблагоприятных последствий от нарушений за определённый период времени и включают в себя частоту событий и последствия от них.

Оценки надёжности, экономичности и безопасности дают достаточно полное представление о качестве (эффективности) функционирования технического объекта (системы) в определённых условиях эксплуатации – нормальных условиях. Однако, при эксплуатации электрической сети, хотя и редко, возможны опасные воздействия на элементы сети, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации и приводящие к чрезвычайным ситуациям. В качестве примера можно привести известные случаи массового повреждения ВЛ на обширной территории из-за воздействий гололёдно-ветровых нагрузок на провода и конструкции опор, превосходящих проектные. Высока вероятность террористических актов и случаев вандализма против

объектов электроэнергетики, нельзя исключить из рассмотрения военные конфликты и действия.

Во всех указанных случаях речь идёт о **живучести технического объекта (системы) в "широком" смысле** – способности объекта полностью или в ограниченном объёме выполнять свои функции при воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, а при полной или частичной утрате работоспособности – восстанавливать её за допустимое время.

В электроэнергетике имеет место **понятие живучести объекта в "узком" смысле** – свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей на длительное время.

Показатели живучести имеют вероятностный характер и отражают риск возникновения чрезвычайной ситуации, оценки времени восстановления и другие.

Поэтому современные количественные теории надежности и живучести в основном базируются на вероятностных моделях, для которых обязательным условием является устойчивость частот таких массовых событий, как отказ. А количественная мера безопасности, пригодная для практического применения относительно отдельных объектов, пока отсутствует, так как безопасность не имеет устойчивых частот даже для инициируемых событий (ошибки персонала, внешние воздействия и пр.).

Отсутствие объективной информации привело к созданию теории нечетких множеств как своеобразного инструмента для формализованного описания и преобразования качественных и субъективных экспертных оценок [13].

В целях инженерных расчетов по оценке надежности отдельного оборудования, станций и подстанций в целом ограничиваются рассмотрением устойчивых процессов, связанных с отказами устройств и схем электрических соединений.

Все перечисленные свойства сложных технических комплексов, определяющие качество их функционирования, должны учитываться при принятии решения на управляющие воздействия в задачах управления. Концентрация внимания, например, только на показателях экономичности, не гарантирует соблюдения допустимых уровней социальной и экологической безопасности или выполнения договорных обязательств по надёжности энергоснабжения потребителей. В свою очередь, надёжная электрическая сеть в части выполнения требуемых функций может быть не экономичной и не соответствовать требованиям безопасности.

1.3 Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения

Современная система ЭСН промышленного предприятия должна удовлетворять *основным требованиям*:

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

Важные *дополнительные требования* к системам ЭСН предъявляют:

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

Специальные требования к системам ЭСН и электрооборудованию предъявляют электроустановки,

расположенные в зонах с загрязненной средой и в районах Крайнего Севера.

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

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

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

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

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

Как показал опыт эксплуатации [8], при реконструкции действующих и проектировании новых систем ЭСН целесообразно проводить принцип "децентрализации" трансформирования и коммутации электроэнергии, благодаря чему:

- источники высшего напряжения максимально приближаются к электроустановкам потребителей;
- сводятся к минимуму сетевые звенья и ступени промежуточной трансформации и коммутации;
- уменьшаются потери электроэнергии;
- повышается в целом надежность ЭСН.

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

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

К электроприемникам I категории относятся те, перерыв ЭСН которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный материальный ущерб, повреждение

дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов коммунального хозяйства.

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

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

Для электроприемников I категории перерыв ЭСН может быть допущен лишь на время АВР, т.е. на доли секунды. Для особых непрерывных производств предусматривается технологическое резервирование или специальные устройства безаварийного останова технологического процесса, действующие при нарушении ЭСН.

Для электроприемников II категории допустимы перерывы ЭСН на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады (десять минут, единицы часов).

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

Выбор схем питания и распределения электроэнергии, напряжения и конфигурации питающих и распределительных сетей до и выше 1 кВ, числа, мощности, месторасположения и типа подстанций решается комплексно с выполнением в необходимых случаях технико-экономического сравнения вариантов по приведенным затратам. При этом учитывается очень важное условие: обязательная координация уровней надежности составных звеньев системы ЭСН таким образом,

чтобы надежность повышалась при переходе от потребителей электроэнергии к ИП по мере увеличения мощности соответствующих звеньев системы.

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

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

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

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

1.4 Технические состояния объекта

Как отмечалось, система или элемент (объект) выполняет определенные функции; имеет определенный жизненный цикл, который протекает во времени и имеет определенные закономерности, изучаемые в теории надежности.

Жизненный цикл объекта – это совокупность фактических состояний объекта и возникающих событий, способствующих переходу в новое состояние.

Если происходит полная или частичная утрата способности выполнения каких-либо функций (например, утрата работоспособности) на протяжении жизненного цикла объекта, то такое событие называется отказом.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа - признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

Типичные критерии отказов:

- прекращение выполнения объектом заданных функций (*отказ функционирования*); снижение качества функционирования по одному или нескольким из выходных параметров (производительность, мощность, точность и др.) за пределы допустимого уровня (*параметрический отказ*);

- искажения информации на выходе объектов, имеющих в своем составе ЭВМ или другие устройства дискретной техники из-за сбоев;

- внешние проявления, связанные с наступлением или предпосылками наступления неработоспособного состояния (*шум, вибрации, перегрев и др.*).

В связи с этим выделяют пять основных видов технического состояния объекта.

1 Исправное состояние (исправность) – это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

2 Неисправное состояние (неисправность) - это состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

3 Работоспособное состояние (работоспособность) – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

4 Неработоспособное состояние – это состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

5 Предельное состояние – это состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Предельное состояние обусловлено физической невозможностью дальнейшей эксплуатации объекта, либо недопустимым снижением его эффективности, либо требованиями безопасности и определяется установленным критерием предельного состояния.

Критерий предельного состояния - признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные НТД и (или) конструкторской (проектной) документацией.

Типичные критерии предельных состояний:

- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены эксплуатационной документацией (должны выполняться на предприятии-изготовителе или на специализированном ремонтном предприятии);

- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических (химических) свойств материалов до предельно допустимого уровня;

- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) ниже (выше) допустимого уровня;
- повышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонт или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Переход объекта из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие событий: отказов, повреждений или неисправностей.

Повреждение – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния. Различают два основных вида повреждений объекта:

1 Допустимые повреждения, возникающие при нормальных условиях эксплуатации (износ режущего инструмента, износ направляющих станка, поломки мелкогабаритного инструмента и деталей предохранительных устройств и т.п.). Полностью устранить этот вид повреждений невозможно, но можно замедлить их проявление.

2 Недопустимые повреждения, возникающие вследствие наличия дефектов или случайных неконтролируемых внешних причин, непосредственно не связанных с техническим состоянием рассматриваемого объекта (аварии, стихийные бедствия и т.п.).

Неисправное состояние - состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы по одному из требований НТД и (или) конструкторской (проектной) документации.

Повреждения и неисправности, в свою очередь, могут возникнуть из-за дефектов оборудования.

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным НТД и (или) конструкторской (проектной) документации, снижающее его уровень надежности.

Следует отметить, что объект, имеющий дефект, может находиться в работоспособном состоянии. Дефект

рассматривается как возможная причина возникновения отказа, но наличие дефекта не означает, что отказ произошел.

По признаку стадии происхождения дефекты можно разделить на три группы.

1 Дефекты (ошибки) проектирования:

- недостаточную защищенность узлов трения;
- наличие концентраторов напряжений на деталях;
- неправильный расчет несущей способности деталей (приводит к их статическому разрушению или малоцикловой усталости);

- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.;

2 Дефекты изготовления (производственные):

- дефекты заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, охрупчивающие примеси и т.п.);

- дефекты механической обработки (прижоги, задиры, заусенцы, избыточная локальная пластическая деформация и т.п.);

- дефекты сварки (трещины, остаточные напряжения, термические повреждения основного материала и т.п.);

- дефекты термообработки (перегрев, закалочные трещины, поводка, коробление, обезуглероживание поверхностного слоя);

- дефекты сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы, внесение абразива и т. п.).

3 Дефекты эксплуатации:

- нарушение условий применения;
- неправильное техническое обслуживание и ремонт;
- наличие перегрузок и непредвиденных нагрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

Для повышения надежности в сложных технических изделиях и системах применяют резервирование. А требования, предъявляемые к надежности системы ЭСН, определяют выбор объемов и способов резервирования.

Резервирование – это применение дополнительных средств и (или) возможностей в целях сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Резерв — это совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Резерв может быть *нагруженным*, когда резервный элемент находится в том же рабочем режиме, что и основной, *облегченным* и *ненагруженным*, когда резервный элемент нагрузки практически не несет (до начала выполнения им функций основного элемента).

Итак, под резервированием понимается повышение надежности введением избыточности, которое, в свою очередь, подразделяется на следующие виды: структурное, функциональное, временное и информационное.

Структурное резервирование - использование избыточных элементов структуры объекта, т. е. элементов, которые не являются необходимыми для выполнения возложенных на объект функций, например установки вторых трансформаторов на подстанциях, сооружения вторых цепей, когда пропускная способность первых еще не исчерпана.

Функциональное резервирование - это использование способности элементов выполнять дополнительные функции, повышая надежность работы системы за счет перераспределения функции при отказах элементов. При этом происходит более интенсивная работа (загрузка) других элементов, выполняющих до появления отказа более ограниченные функции. Например, межсистемная ЛЭП, предназначенная для реализации каких-то режимных состояний или передачи энергии, в то же время может быть использована и для резервирования отказов генерирующего оборудования.

Временное резервирование - использование избыточного времени. Суть его заключается в том, что системе в процессе функционирования предоставляется возможность израсходовать дополнительное время для выполнения задания.

Оно осуществляется либо за счет резерва времени, в течение которого система имеет возможность выполнить задание, либо за счет использования резерва мощности уменьшением времени выполнения задания. Так, если в одной из энергосистем имеются резервные генераторы, которые используются кратковременно в течение, например, года, обладая тем самым резервом по времени, то при объединении ее с другой системой эти генераторы могут резервировать отказы и простои оборудования во второй энергосистеме, компенсируя дефицит энергии в те интервалы времени, в которые они не используются в первой системе.

Информационное резервирование - использование избыточной информации.

1.5 Отказы электрооборудования в системах электроснабжения

Важным методическим аспектом при исследовании свойства надёжности электрической сети является понятие «отказа». Под **отказом** понимается непредусмотренное прекращение или утрата объектом способности выполнять в необходимом объёме (размере) свои функции свыше допустимого времени.

Причинами отказов в электрической сети в большинстве случаев могут быть повреждения в оборудовании, аппаратуре и конструкциях электросетевых объектов или появление недопустимых режимных параметров в элементах сети, требующее принятия неотложных действий по их устранению.

Согласно Инструкции [19] все случаи повреждения элементов электрической сети, недопустимых отклонений параметров технического (технологического) состояния энергетических установок, а также полных или частичных незапланированных отключений энергоустановок (в т.ч. без повреждения оборудования) и энергоприёмников относятся к технологическим нарушениям, которые в зависимости от

тяжести последствий подразделяются на аварии и инциденты. Все технологические нарушения подлежат расследованию и учёту, что позволяет сформировать базу данных по аварийности в электрических сетях за продолжительный срок эксплуатации.

Можно показать, что не все технологические нарушения приводят к случаю отказа. Так, например, при обрыве провода в одной цепи 2-х цепной ВЛ имеет место технологическое нарушение, при этом, если оставшаяся в работе другая цепь линии позволяет передавать необходимую мощность, то случай отказа линии отсутствует. Не будет отказа линии и при допустимом кратковременном отключении одноцепной ВЛ, если, например, она отключилась вследствие удара молнии в линию и успешно была включена действиями АПВ.

В теории надежности, как правило, предполагается внезапный отказ, который характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

На практике приходится анализировать и другие отказы, к примеру, ресурсный отказ, в результате которого объект приобретает предельное состояние, или эксплуатационный отказ, возникающий по причине нарушения установленных правил или условий эксплуатации. Т.о., отказы можно классифицировать по разным признакам:

1 Характер изменения выходного параметра объекта до момента возникновения отказа:

- внезапные отказы;
- постепенные (износные) отказы;
- сложные отказы.

Внезапные отказы проявляются в результате резкого, скачкообразного изменения основных параметров системы, связанных с нарушением условий работы, ошибочными действиями персонала и т.д.

При постепенных отказах наблюдается плавное изменение параметров оборудования в результате старения, износа. Постепенные отказы часто проявляются в форме

внезапных.

Отказ, который включает особенности двух предыдущих, называется *сложным отказом*.

2 Возможность последующего использования объекта после возникновения отказа:

- полные отказы;
- частичные отказы.

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

3 Связь между отказами объекта:

- независимые отказы;
- зависимые отказы.

Независимый отказ - отказ, не обусловленный другими отказами или повреждениями объекта.

Зависимый отказ - отказ, обусловленный другими отказами или повреждениями объекта.

4 Устойчивость состояния неработоспособности:

- устойчивые отказы;
- самоустраниющиеся отказы;
- сбои;
- перемежающиеся отказы.

Устойчивые отказы - отказы, которые можно устранить только путем восстановления (ремонта). Отказы, устраняемые без операций восстановления путем регулирования или саморегулирования, относятся к *самоустраниющимся*.

Сбой - самоустраниющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Перемежающийся отказ - многократно возникающий самоустраниющийся отказ одного и того же характера.

5 Наличие внешних проявлений отказа:

- явные отказы;
- скрытые отказы.

Явный отказ - отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

Скрытый отказ - отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

Большинство параметрических отказов относятся к категории скрытых.

6 Причина возникновения отказа:

- конструктивные отказы;
- производственные отказы;
- эксплуатационные отказы;
- деградационные отказы.

Конструктивный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Эксплуатационный отказ - отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

Деградационный отказ - отказ, обусловленный естественным процессом старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

7 Природа происхождения отказа:

- естественные отказы;
- искусственные отказы.

Отказы, происходящие без преднамеренной организации их наступления в результате направленных действий человека

(или автоматических устройств), относят к категории *естественных отказов*.

Искусственные отказы вызываются преднамеренно, например, с исследовательскими целями, с целью необходимости прекращения функционирования и т.п.

8 Время возникновения отказа:

- отказы при испытаниях;
- приработочные отказы;
- отказы периода нормальной эксплуатации;
- отказы последнего периода эксплуатации.

9 Возможность устранения отказа:

- устранимые отказы;
- неустранимые отказы.

10 Критичность отказа (уровень прямых и косвенных потерь, трудоемкость восстановления):

- критические отказы;
- некритические отказы (существенные и несущественные).

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

Элементы систем ЭСН относятся к восстанавливаемым при отказах. Надежность системы или элемента обеспечивается такими свойствами надежности, как например свойствами безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости, управляемости, устойчивоспособности, живучести и безопасности.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

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

А при анализе надежности *объекта как системы* используются следующие свойства характеризующие надежность.

Устойчивоспособность – свойство системы непрерывно сохранять устойчивость в течение некоторого интервала времени.

Устойчивость – способность системы переходить от одного устойчивого режима к другому при различных возмущениях.

Режимная управляемость – это свойство системы обеспечивать включение, отключение и изменение режима работы элементов по заданному алгоритму.

Живучесть – свойство системы противостоять крупным возмущениям режима, не допуская их цепочечного развития и массового отключения потребителей, не предусмотренного алгоритмом работы противоаварийной автоматики.

Безопасность определяется, как свойство объекта не создавать опасности для людей и окружающей среды во всех возможных режимах работы и аварийных ситуациях.

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

При рассмотрении показателей надежности любого элемента различают три периода его эксплуатации: I — период приработки; II — период нормальной эксплуатации; III — период интенсивного износа и старения. Эти периоды наглядно нанесены на кривую интенсивности отказов, иногда ее называют кривой жизни технического изделия (см. рисунок 1.1).

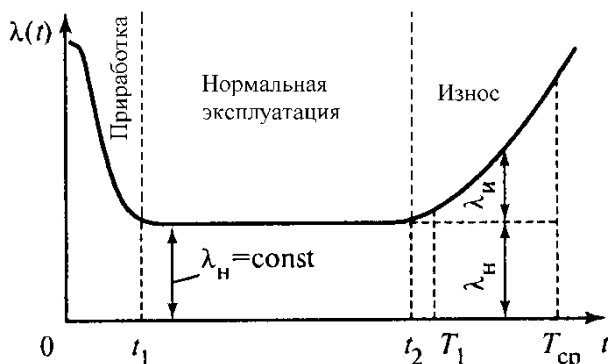


Рисунок 1.1 – Кривая интенсивности отказов

На кривой интенсивности отказов показаны значения средней долговечности изделия T_1 и средней наработки до первого отказа $T_{ср} > T_1$. Средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$ обычно значительная и характеризует запас надежности устройства в период нормальной эксплуатации. Обычно T_1 ненамного превышает время t_2 , т. е. соответствует начальному участку периода старения и износа.

Период приработки ($0 < t < t_1$) начинается с выхода нового изделия из цехов завода ($t = 0$) и характеризуется высокой интенсивностью отказов, которая постепенно падает. Эти отказы обусловлены технологическими, производственными или конструкционными недостатками, присущими как самому изделию, так и производству (включая также производство материалов, их хранение и транспортировку).

Отказы, возникающие в период приработки, стремятся исключить путем выявления скрытых дефектов монтажа и

изготовления, отбраковкой элементов. Отказы в период приработки подчиняются закону Вейбулла.

Период нормальной эксплуатации ($t_1 < t < t_2$) характеризуется минимальной интенсивностью отказов. В период нормальной эксплуатации происходят внезапные отказы, которые имеют случайный характер (механические повреждения, повреждения вследствие неблагоприятных внешних условий и т.д.). Природа таких отказов обусловлена неожиданной концентрацией нагрузок внутри изделия (или извне).

Подразделение отказов на внезапные и постепенные условно и служит для удобства анализа и количественной оценки протекающих явлений. Основной причиной внезапных отказов является превышение механической прочности элемента.

Регулярность событий в период нормальной эксплуатации не наблюдается. Закон распределения отказов в этот период экспоненциальный.

Период старения и износа ($t > t_2$) характеризуется резким увеличением интенсивности отказов и связан с интенсивным износом и старением, необратимыми физико-химическими процессами в материалах, из которых изготовлены элементы и их части (постепенные отказы).

Закон распределения отказов — либо нормальный, либо логарифмически-нормальный (могут быть и другие случаи).

Т.о., отказ оборудования может произойти в любом из рассматриваемых периодов работы и зависит это от суммарного воздействия той или иной комбинации факторов, основными из которых являются следующие.

Особое значение имеют *производственные факторы*. Влияние этих факторов учитывают отдельно, потому что, во-первых, они не могут быть конкретно учтены при проектировании, и, во-вторых, после отработки конструкции и внедрения ее в производство уровень надежности оборудования полностью определяется стабильностью производства. Кроме того, одно и то же оборудование,

изготовленное на разных предприятиях, нередко очень резко отличается друг от друга по качеству.

К *конструктивным факторам* относят прежде всего:

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

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

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

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

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

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

Глава 2 Основные показатели надежности и их краткая характеристика

Показатель надежности - количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Под номенклатурой показателей надежности понимают состав показателей, необходимый и достаточный для характеристики объекта или решения поставленной задачи. Полный состав номенклатуры показателей надежности, из которой выбираются показатели для конкретного объекта и решаемой задачи, установлен ГОСТ 27.002-89 [18].

Показатели надежности принято классифицировать по следующим признакам:

1 по свойствам надежности:

- показатели безотказности;
- показатели долговечности;
- показатели ремонтпригодности;
- показатели сохраняемости;

2 по числу свойств надежности, характеризующихся показателем:

- единичные показатели (характеризуют одно из свойств надежности);
- комплексные показатели (характеризуют одновременно несколько свойств надежности);

3 по числу характеризующихся объектов:

- групповые показатели;
- индивидуальные показатели;
- смешанные показатели;

Групповые показатели – показатели, которые могут быть определены и установлены только для совокупности объектов; уровень надежности отдельного экземпляра объекта они не регламентируют.

Индивидуальные показатели – показатели, устанавливающие норму надежности для каждого экземпляра

объекта из рассматриваемой совокупности (или единичного объекта).

Смешанные показатели могут выступать как групповые или индивидуальные.

4 по источнику информации для оценки уровня показателя:

- расчетные показатели;
- экспериментальные показатели;
- эксплуатационные показатели;
- экстраполированные показатели;

Экстраполированный показатель надежности – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

5 по размерности показателя различают показатели, выражаемые:

- наработкой;
- сроком службы;
- безразмерные (в том числе, вероятности событий).

2.1 Показатели безотказности объектов

Показатели безотказности объектов можно разбить на две группы, характеризующие невозстанавливаемые и восстанавливаемые объекты.

Восстанавливаемый объект – это объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в НТД и (или) конструкторской документации.

Под восстановлением нужно понимать не только ремонт того или иного элемента или системы, но и замену его на аналогичный и подключение резервного элемента. Например, при выходе из строя одного из трансформаторов (и при

наличии устройства АВР) система ЭСН может быть восстановлена достаточно быстро устройством АВР, хотя поврежденный трансформатор еще не будет восстановлен.

Невосстанавливаемый объект – это объект, который не подлежит восстановлению или его восстановление нецелесообразно в рассматриваемой ситуации.

Однако это не означает, что данные устройства не могут ремонтироваться. Понятие невосстанавливаемый (неремонтируемый) объект характеризуется не видом данного элемента, а его специфическим назначением. Например, выключатель в системе ЭСН является, по существу, неремонтируемым элементом, но это не означает вообще невозможность ремонта и восстановления выключателя.

2.1.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

К числу широко применяемых количественных характеристик надежности невосстанавливаемых объектов относятся:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;
- частота отказов $a(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (2.1)$$

где $P^*(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы;

N_0 – количество изделий в начале испытаний; во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным;

$n(t)$ – число отказавших объектов за время t .

Пример

На испытания поставлено 1000 образцов однотипных элементов, то есть $N_0 = 1000$ изоляторов.

При испытании отказавшие элементы не заменялись исправными. За время t отказало 10 изоляторов. Следовательно, $P(t) = 0,99$ и наша уверенность состоит в том, что любой изолятор из данной выборки не откажет за время t с вероятностью $P(t) = 0,99$.

Вероятность $P(t)$ – функция убывающая (рисунок 2.1), причем $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$. При большом количестве изделий N_0 статистическая оценка $P^*(t)$ практически совпадает с вероятностью $P(t)$.

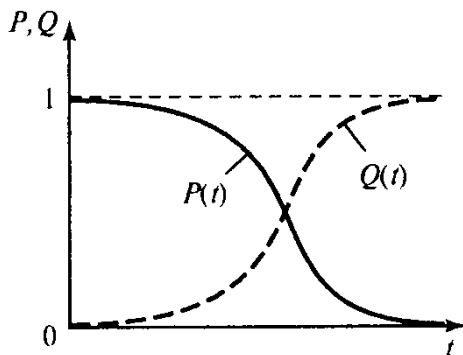


Рисунок 2.1 – Кривые вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказа $Q(t)$

Как видно из графика на рисунке 2.1, функция $P(t)$ характеризует изменение надежности во времени и является достаточно наглядной оценкой. Если t_p – время безотказной работы, то $P(t) = P(t_p > t)$ – вероятность того, что время безотказной работы больше t .

Зависимость $P(t)$ – **закон распределения** надежности.

Достоинства данного показателя:

- характеризует изменение надёжности во времени;
- даёт возможность наглядно судить о надёжности;
- показатель может быть использован для расчёта надёжности новых систем до их реализации;
- характеризует стоимость изготовления и эксплуатации систем;
- показатель охватывает большинство факторов, влияющих на надёжность.

Недостатки данного показателя:

- показатель характеризует надёжность восстанавливаемых систем до первого отказа и является достаточно полной характеристикой только систем разового пользования;
- показатель не даёт характеристики между временными составляющими цикла эксплуатации;
- эта величина не всегда удобна для оценки надёжности простых элементов при отсутствии старения;
- по этому показателю довольно трудно найти другие показатели надёжности.

На практике более удобна другая характеристика, а именно вероятность отказов (вероятность неисправной работы). Эта характеристика более удобна, в частности, для сравнения резервированных и нерезервированных ЛЭП и т.п.

Вероятность отказа $Q(t)$ – это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ.

Вероятность отказа при работе по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (2.2)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ является возрастающей функцией времени (см. рисунок 2.1). Функция $Q(t)$ характеризует вероятность того, что в заданном интервале

времени произойдет хотя бы один отказ: $Q(t) = Q(t_p < t)$ - вероятность того, что время безотказной работы меньше t .

Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместимыми и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью:

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

Частота отказов $a(t)$ - плотность распределения времени безотказной работы или производная от вероятности безотказной работы:

$$a(t) = q'(t) = -p'(t) \quad (2.4)$$

Для определения величины $a(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (2.5)$$

где $n(\Delta t)$ – количество отказавших изделий в интервале времени Δt ;

N_0 – количество изделий в начале испытаний.

Одновременно этот количественный показатель надёжности « $a(t)$ » является дифференциальной функцией распределения вероятностей отказа (плотностью вероятности отказа). Численно равен среднему числу отказов в единицу времени на один объект из начального количества объектов $N_0(t=0)$ или доле начального количества объектов $N_0(t=0)$, отказавших после произвольного, но фиксированного момента времени t , в течение выбранного промежутка времени Δt :

$$a(t) = f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Частота отказов "а" или "f" позволяет судить о количестве элементов, выходящих из строя в промежутке времени для невозстанавливаемой системы и довольно просто вычислить количество отказавших систем в интервале "Δt", но по её величине нельзя судить о надёжности.

Понятие интенсивность отказов устройства в единицу времени используется как количественная характеристика для математического определения надёжности. Эта величина измеряется в среднем обычно числом отказов за один час. Обратная величина "λ" - наработка до первого отказа в часах - отношение общего времени испытания к общему числу отказов.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это условная плотность распределения времени безотказной работы для момента времени t при условии, что до этого момент отказа не произошел (интенсивность появления отказов в единицу времени):

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)}, \quad (2.7)$$

причем $P(t) \leq 1$, то $\lambda(t) \geq a(t)$.

Для высоконадёжных систем если $P(t) = 0.99$, то $a(t) \approx \lambda(t)$. Ошибка не более 1% и не превышает ошибок статистического определения $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Следует подчеркнуть разницу между величинами $a(t)$ и $\lambda(t)$. Вероятность $a(t)dt$ характеризует вероятность отказа объекта за интервал времени $(t, t+\Delta t)$, взятого произвольным образом из группы подобных объектов, причём неизвестно в каком состоянии (работоспособным или неработоспособным) находится объект. Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа объекта за интервал $(t, t+\Delta t)$, взятого из группы подобных объектов, которые остались работоспособными к моменту времени t .

Интегрируя это выражение, получаем выражение, связывающее вероятность безотказной работы и интенсивность отказов:

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

Обычно интенсивность отказов изменяется во времени. Лишь в случае экспоненциального закона распределения отказов интенсивность отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

Со статистической точки зрения интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это отношение количества отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}, \quad (2.9)$$

где $n(\Delta t)$ – количество отказавших изделий в интервале времени Δt ;

$N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$ – среднее число изделий, исправно работающих в интервале Δt ;

N_i ; N_{i+1} – соответственно количество изделий, исправно работающих в начале и конце интервала Δt .

Достоинства данного показателя:

- $\lambda(t)$ – функция времени и позволяет наглядно установить характерные участки работы системы. Это даёт возможность наметить пути по повышению надёжности;
- по нему довольно просто найти другие характеристики надёжности.

Недостатком является то, что этот показатель используется лишь для невозстанавливаемых объектов.

Как отмечалось выше, показатель P (или λ) несет наиболее полную информацию о таком свойстве, как безотказность. Однако не всегда в практических условиях таковая имеется. Другой, менее информативной, но простой и наиболее доступной для получения характеристикой является *средняя наработка до отказа*.

Средней наработкой до отказа T_{cp} - это называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа, которое вычисляется следующим образом:

$$T_{cp} = M(t) = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt \quad (2.10)$$

Таким образом, средняя наработка до отказа графически представляет собой площадь, лежащую под графиком функции $P(t)$.

Статистическая оценка средней наработки до первого отказа при $N(t) \neq 0$ может быть получена как:

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_{0i} + tN(t)}{N_0}, \quad (2.11)$$

где t_{0i} - время до отказа i -го объекта;

t - время наблюдения за N_0 объектами;

N - число отказавших объектов за время t .

Этот показатель надёжности является одним из более наглядных количественных характеристик надёжности, но как математическое ожидание не полностью характеризует надёжность восстанавливаемых систем, надо ещё знать дисперсию времени отказов. Величина T_{cp} характеризует работу системы до первого отказа.

2.1.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

Рассмотрим характеристики восстанавливаемых объектов. При этом необходимо учитывать следующие условия. На испытаниях находится N_0 изделий, которые при отказе немедленно заменяются новыми или отремонтированными. Испытания заканчиваются, если число отказов достигнет величины, достаточной для оценки надежности.

К числу широко применяемых количественных характеристик надежности восстанавливаемых объектов относятся:

- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- средняя наработка на отказ t_{cp} ;
- гамма-процентная наработка до отказа γ ;
- коэффициент готовности k_r ;
- коэффициент вынужденного простоя $k_{п.}$.

Если не учитывать время на восстановление системы, то количественными характеристиками являются параметр потока отказов $\omega(t)$ и наработка на отказ t_{cp} .

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

$$\omega(t) = \Delta n(t) / m(t) \Delta t. \quad (2.12)$$

Характеристика $\omega(t)$ может иметь весьма сложную зависимость от времени. Особый интерес в связи с этим представляет зависимость $\omega(t)$ от срока эксплуатации, на основании которой можно установить периоды приработки, нормальной работы и старения для отдельных видов оборудования.

Средняя наработка на отказ (наработка на отказ) t_{cp} - это отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в

течение этой наработки, т.е. определяется как среднее значение времени между соседними отказами:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (2.14)$$

где t_i – время исправной работы изделия между $(i-1)$ -м и i -м отказами;

n – число отказов за некоторое время t .

Формула (2.14) используется при испытании одного образца изделий.

Если на испытании находится N образцов в течение времени t , то t_{cp} вычисляется следующим образом:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (2.15)$$

где t_{ij} – время работы j -го образца изделий между $(i-1)$ -м и i -м отказами;

n_j – число отказов j -го образца за время t .

С другой стороны:

$$t_{cp} = T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.16)$$

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

$$T_{cp} \approx \frac{1}{2} \omega . \quad (2.17)$$

Рассматриваемый показатель рассчитывается по экспериментальным данным.

Гамма-процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Более подробное описание про этот показатель и такое понятие как гамма-распределение приведено [5].

Параметр потока отказов и наработка на отказ, рассмотренные ранее, характеризуют надежность ремонтируемого изделия и не учитывают времени, необходимого на его восстановление. Поэтому они не характеризуют готовность изделия к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициент готовности K_G - это есть отношение суммарного времени исправной работы t_p к сумме суммарного времени исправной работы t_p и вынужденных простоев $t_{п}$:

$$K_G = \frac{t_p}{t_p + t_{п}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{пi}}, \quad (2.18)$$

где t_{pi} – время работы между (i-1)-м и i-м отказами;
 $t_{пi}$ – время простоя после i-го отказа;
 n – число отказавших изделий.

При анализе готовности восстанавливаемого объекта коэффициент готовности вычисляется по следующей формуле:

$$K_G = T_{cp} / (T_{cp} + t_{в}), \quad (2.19)$$

где t_b – среднее время восстановления объекта.

Коэффициент вынужденного простоя k_{Π} – это есть отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев:

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{t_p + t_{\Pi}} \cdot \quad (2.20)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью:

$$k_{\Pi} = 1 - k_r. \quad \dots \quad (2.21)$$

Следует отметить, что в зависимости от ситуации даже один и тот же объект может быть отнесен к тому или иному виду. Так, например, иногда надежность восстанавливаемых изделий или системы оценивается до первого отказа или резервирования. В этом случае показателями надежности восстанавливаемых систем могут служить показатели надежности невосстанавливаемых систем.

Наличие нескольких показателей надежности вовсе не означает, что нужно оценивать надежность объектов по всем этим показателям.

2.2 Показатели долговечности объектов

Перед рассмотрением показателей долговечности объектов, необходимо ознакомиться с временными понятиями теории надежности.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

Наработка до отказа — наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа. Этот показатель характеризует восстанавливаемую систему.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или его возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или его возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которого сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Согласно существующей практике оценки надёжности ЭСН потребителей различают следующие по продолжительности перерывы в ЭСН [17].

Кратковременный перерыв ограничен по продолжительности интервалом времени, необходимым для того, чтобы восстановить ЭСН автоматически с помощью телемеханики или ручным включением там, где оператор может сделать это немедленно. Такие операции обычно не превосходят нескольких минут.

Перерыв средней продолжительности ограничен интервалом времени, необходимым для того, чтобы вручную восстановить электроснабжение в местах, где нет дежурного оператора. Такие операции занимают 1–2 часа.

Длительный перерыв, который не может быть квалифицирован как перерыв кратковременный или средней продолжительности.

В теории надежности используются следующие показатели долговечности.

Средний ресурс – это математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс – это наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный ресурс

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

Основными характеристиками долговечности являются средний срок службы и средний ресурс.

Для восстанавливаемого объекта средний срок службы представляет собой среднюю календарную продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после предупредительного ремонта до наступления предельного состояния.

Средний ресурс представляет собой среднюю наработку объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после предупредительного ремонта до наступления предельного состояния.

Для невосстанавливаемого объекта эти характеристики совпадают и представляют собой среднюю продолжительность работы до отказа или до наступления предельного состояния. Практически эта величина совпадет со средней наработкой до отказа T_{cp} .

Статистическая оценка среднего срока службы может быть получена по результатам наблюдения за n однотипными электросетевыми объектами, эксплуатируемыми приблизительно в одинаковых условиях. Формула для статистической оценки среднего срока службы однотипных объектов по результатам наблюдения имеет вид:

$$T_{cc} = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_j}{n}, \quad (2.22)$$

где τ_j – срок службы j -го объекта;
 n – количество однотипных объектов.

Срок службы каждого конкретного объекта наблюдения зависит от многих случайных факторов, при этом предельное состояние объекта практически определяется его характеристиками, свидетельствующими о том, что его дальнейшая эксплуатация становится небезопасной для человека и окружающей среды, или становится экономически невыгодной.

В терминах показателей долговечности следует указывать вид действий после наступления предельного состояния объекта (например, средний ресурс до капитального ремонта, гамма-процентный ресурс до промежуточного ремонта и т.п.). Если предельное состояние обуславливает окончательное снятие объекта с эксплуатации, то показателями долговечности являются полный/средний ресурс (срок службы), полный гамма-процентный ресурс (срок службы), полный назначенный ресурс (срок службы). Причем в полный срок службы входят продолжительности всех видов ремонта объекта.

2.3 Показатели ремонтпригодности и сохраняемости объектов

К числу широко применяемых показателей ремонтпригодности объектов относят следующие.

Среднее время восстановления T_B – это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

Вероятность восстановления $v(t)$ — это вероятность того, что время восстановления T_B объекта (элемента или системы) будет меньше времени t , т.е. не превысит заданного:

$$v(t) = v(T_B < t). \quad (2.23)$$

Вероятность невосстановления $w(t)$ — это вероятность того, что время восстановления T_B объекта (элемента или системы) будет больше или равно времени t :

$$w(t) = w(T_B \geq t) = 1 - v(t). \quad (2.24)$$

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

$$\mu(t) = v'(t)/w(t) = w'(t)/w(t). \quad (2.25)$$

Для оценки ремонтпригодности наибольшее применение получил показатель – среднее время восстановления после отказа.

Статистическая оценка среднего времени восстановления может быть получена по результатам наблюдения за n однотипными электросетевыми объектами с приблизительно одинаковыми условиями эксплуатации и ремонта:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{N_i} t_{bij}}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (2.26)$$

где N_i – число отказов с последующим выполнением ремонтно-восстановительных работ на i -ом объекте, причем $N_i = 0, 1, 2, \dots$;

n – количество наблюдаемых объектов;

t_{bij} – время, затраченное на проведение ремонтно-восстановительных работ на i -ом объекте при j -м его отказе, причем $j = 0, 1, 2, \dots, N_i$; $i = 1, 2, \dots, n$.

А время восстановления, например, выключателей можно определить по другой формуле. К примеру, при внезапных отказах выключателей отключившиеся элементы (генерирующие агрегаты, трансформаторы, ЛЭП) в большинстве случаев могут быть введены в работу раньше, чем будет произведен ремонт выключателя. При этом длительность их простоя (время восстановления) определяется временем, необходимым для выполнения переключений в РУ:

$$T_{cp} = T_0 + T_{pnp}, \quad (2.27)$$

где T_0 — постоянная составляющая, равная времени, необходимому для того, чтобы обслуживающий персонал мог прийти в РУ и установить характер повреждения (для подстанций с обслуживанием $T_0 = 0,1 - 0,3$ ч);

$T_p = 0,1$ ч — время для отключения (включения) разъединителя;

n_p — число разъединителей, которые должны быть отключены (включены) для отделения поврежденного выключателя и ввода отключившихся элементов в работу.

Заметим, что среднее время восстановления представляет собой среднее значение времени отыскания и устранения имеющейся неисправности. При этом учитывается как среднее время проведения ремонтных работ по восстановлению повредившегося или отказавшего оборудования, так и среднее время, необходимое для проведения оперативных переключений по восстановлению нормальной схемы электроустановки или замене отказавшего оборудования резервным.

Выделяют следующие показатели сохраняемости объектов.

Средний срок сохраняемости – это математическое ожидание срока сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – это срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный срок хранения - срок хранения, по достижении которого хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

В качестве показателя сохраняемости рекомендуется использовать средний срок сохраняемости.

Статистическая оценка среднего срока сохраняемости может быть получена на основе опыта эксплуатации и наблюдения за n однотипными объектами с последующим проведением расчётов, например, по формуле (2.22), где под τ_j следует понимать наблюдаемый срок сохраняемости j -го объекта.

Все рассмотренные показатели надёжности устанавливаются для конкретного вида и типа оборудования, аппаратуры и конструкций посредством проведения заводских испытаний по определённой программе или на основе статистических данных об имевших место отказах за определённый период эксплуатации объектов и вычисления статистических оценок. Последнее даёт наиболее реальные оценки для электрической сети с учётом существующей в ней организацией и условиями эксплуатации. В этой связи следует

отметить значимость качественного расследования и учёта технологических нарушений в элементах электрической сети, позволяющие сформировать полную многолетнюю базу данных по аварийности для получения статистических оценок надёжности.

2.4 Единичные и комплексные показатели надёжности электроэнергетических установок

К единичным показателям относят такие показатели, которые характеризуют отдельные состояния объекта. Для основного и вспомогательного оборудования станций и подстанций в целях расчетов надёжности используются такие единичные показатели объекта как:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до отказа:
- параметр потока отказов $\omega(t)$;
- средний срок службы T_{cc} ;
- средний ресурс.

Эти показатели подробно были рассмотрены выше, но существуют и другие единичные показатели надёжности объектов. Их значения указываются в справочных данных или определяются на каждом предприятии опытным путем.

Так для каждого вида электрооборудования или установки существуют свои определенные эксплуатационные показатели надёжности. Например, для секции или системы СШ РУ существуют следующие показатели:

- параметр потока отказов (частота отказов) секции или системы шин ω , 1/год;
- среднее время восстановления T_b , ч;
- частота капитальных ремонтов секции или системы шин μ_0 , 1/год;

- среднее время капитального ремонта на одно присоединение T_0 , ч.

Для турбогенератора и гидрогенератора выделяют такие показатели как:

- параметр потока отказов (частота отказов) осредненный с автоматическим отключением ω , 1/год;

- среднее время восстановления $T_{в}$, ч;

- частота вынужденных неавтоматических отключений оперативным персоналом $\omega_{оп}$, 1/год;

- среднее время вынужденного простоя после вынужденного неавтоматического отключения $T_{п}$, ч.

- частота плановых простоев $\mu_{п}$, 1/год;

- среднее время плановых простоев в течение одного года $T_{пл}$, ч.

К комплексным показателям относят такие показатели, которые характеризуют объект с двух и более сторон. К таким комплексным показателям надежности относят:

- коэффициент готовности k_r . Он характеризует вероятность работоспособного состояния в произвольно выбранный момент времени. Коэффициент готовности имеет смысл надежностного коэффициента полезного действия, т.к. числитель представляет полезную составляющую, а знаменатель общие затраты времени (см. формулу 2.19). Он оценивает эксплуатационные качества объекта и квалификацию обслуживающего персонала, характеризует готовность объекта (элемента) к работе. Его недостатком является то, что по нему нельзя судить о времени непрерывной работы объекта без отказов.

- коэффициент вынужденного простоя $k_{п}$. Он характеризует вероятность того, что объект неработоспособен в произвольный момент времени (см. формулу 2.20).

- коэффициент технического использования $k_{т.и.}$. Этот показатель характеризует те же свойства, что и коэффициент готовности, но учитывает дополнительно предупредительные ремонты и представляет собой отношение математического

ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации:

$$K_{т.и} = T_{ср} / (T_{ср} + t_{в} + \tau) = 1 / (1 + \omega T_{в} + \mu_{р} T_{р}), \quad (2.28)$$

где τ - математическое ожидание времени нахождения объекта в отключенном состоянии для производства профилактических работ.

- коэффициент оперативной готовности $K_{ор}(t, \tau)$ - вероятность того, что объект будет работоспособен в произвольный момент времени "t" и безотказно проработает заданное время « τ » в аварийных условиях:

$$K_{ор}(t, \tau) = K_{г}(t) P(\tau) \quad (2.29)$$

Коэффициент $K_{ор}$ позволяет оценить надежность оборудования в аварийный период.

- математическое ожидание длительности цикла работы объекта $T_{цикла}$:

$$T_{цикла} = T_{ср} + T_{в}, \quad (2.30)$$

где $T_{ср}$ - среднее время наработки до отказа объекта;

$T_{в}$ - среднее время восстановления объекта .

- частота появления отказов объекта f :

$$f = 1 / T_{цикла}. \quad (2.31)$$

- вероятности работоспособного состояния объекта и состояния восстановления для переменного процесса восстановления с экспоненциальным распределением длительности состояний определяются из выражений:

$$P_p(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (2.32)$$

$$P_v(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (2.33)$$

где $P_p(t)$ - вероятность работоспособного состояния объекта,
 $P_v(t)$ - вероятность состояния восстановления объекта,
 μ - интенсивность восстановления объекта,
 λ - интенсивность отказов объекта.

Коэффициенты готовности и неготовности можно рассматривать как предел $P_p(t)$ и $P_v(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

- вероятность планового ремонта:

$$P^p = \mu_p T_p. \quad (2.34)$$

- вероятность нормального состояния:

$$P^n = 1 - P^p = 1 - \mu_p T_p. \quad (2.35)$$

- средний недоотпуск электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$. Этот показатель характеризует не только все основные свойства надежности системы, но и режим ее загрузки, и представляет собой математическое ожидание недоотпуска электроэнергии потребителям за расчетный период времени. Его оценка для узлов нагрузки и системы в целом является одной из конечных целей расчетов надежности. Недоотпуск электроэнергии за

время T потребителям узла нагрузки при полном прекращении его ЭСН можно определить по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = W_n K_n = P_n T K_n \quad (2.36)$$

где P_n , W_n - соответственно математическое ожидание мощности и энергии, потребляемой узлом нагрузки за время T ;
 K_n - коэффициент вынужденного простоя системы относительно узла нагрузки (средняя вероятность состояния отказа).

- экономический ущерб от ненадежности. Этот показатель надежности является наиболее полным. Он характеризует интегрально все свойства надежности системы, включая режим ее загрузки и значимость потребителя энергии. Экономический ущерб при каждом отказе k ($k = 1, 2, \dots, n$) за некоторый период T :

$$Y_k = Y_0 \Delta \mathcal{E}_k \quad (2.37)$$

где Y_0 – величина удельного ущерба, руб/кВт*ч;

$\Delta \mathcal{E}$ - средний недоотпуск электроэнергии, определяется по выражению (2.26).

Как видно из изложенного, надежность объекта характеризуется довольно широким спектром показателей. Эти показатели считаются основными или практическими показателями надежности.

Глава 3 Вероятностные модели для оценки надежности

При исследовании надежности объектов применяют моделирование, включающее создание модели отказов и анализ надежности с использованием модели отказов (математической или физической) [1]. Моделирование отказа базируется на подобии модели отказа реальному процессу отказа и включает перенос результатов моделирования на модулируемый объект.

Модель отказа - это математическое описание физических процессов, приводящих к возникновению отказа.

Модель отказа должна адекватно, в пределах поставленной задачи, отражать причины отказа - события и состояния, процессы и явления, вызывавшие возникновение отказа. Полная модель отказов дает полное подобие между всеми процессами отказа моделируемого объекта и моделью отказов. Для построения полной модели отказов объекта при его эксплуатации следует учитывать все условия и процессы, вызывающие отказы как при использовании объекта по назначению после ввода в работу и при техническом обслуживании и ремонте, так и во время транспортирования, хранения, монтажа и наладки объекта, т.е. до его ввода в работу.

В настоящей работе, в соответствии с поставленной целью, будем использовать неполные модели отказов, учитывающие лишь основные, определяющие условия и процессы, вызывающие отказы объектов после ввода их в работу для использования по назначению, т.е. после первого включения электрооборудования или ЛЭП в сеть под рабочее напряжение.[14]

Математическая модель отказов электрооборудования может быть наглядно выражена графически (например, с помощью дерева отказов) или аналитически с помощью расчетного выражения (формулы) для одного или нескольких основных показателей надежности. Для построения моделей

отказов отдельных видов электрооборудования используется в качестве основного показателя надежности «параметр потока отказов» или «частота отказов» - ω .

3.1 Модели отказов отдельных элементов системы

Модели отказов выключателей

В качестве исходной модели отказов выключателя рассмотрим модель, в которой сделана попытка учесть большую часть основных условий и причин отказов. Будем считать все отказы двусторонними, сопровождающимися КЗ и отключением двух смежных элементов (СШ и присоединений).

Параметр потока отказов выключателя (частота отказов), находящегося под рабочим напряжением, принимается равным:

$$\omega_{\text{в}} = \omega_{\text{ст}} + \omega_{\text{оп}} + \omega_{\text{кз}}, \quad (3.1)$$

где $\omega_{\text{кз}}$ - параметр потока отказов выключателя при стационарном включенном состоянии, в том числе при прохождении через выключатель сквозного (неотключаемого) тока КЗ;

$\omega_{\text{ст}}$ - то же при стационарном состоянии;

$\omega_{\text{оп}}$ - при оперативных переключениях.

Наиболее простой является модель, в которой суммируются все отказы выключателя данного вида независимо от условий и причины. В данной модели используется только итоговый параметр отказов ω (без выделения его составляющих), который можно рассчитать по формуле:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n N_i T_i} \quad (3.2)$$

где m_i - количество отказов выключателей на i -м предприятии за промежуток времени наблюдения T_i ;

N_i - количество выключателей на i -м предприятии в течение промежутка времени наблюдения T_i ;

n - общее количество выделенных промежутков времени наблюдения и сбора статистических данных об отказах выключателей рассматриваемого вида (серии) на всех предприятиях;

i – количество исследуемых предприятий.

Модель отказов сборных шин

Для построения модели отказов СШ РУ учитываются отказы собственно СШ, их подвесной или опорной изоляции, спусков к шинным разъединителям или другим аппаратам, а также отказы аппаратов, непосредственно без разъединителей и предохранителей подключенных к СШ. Отказы шинных разъединителей, выключателей, трансформаторов напряжения, разрядников, ограничителей перенапряжений, токоограничивающих и шунтирующих реакторов в данной модели не учитываются. Учет отказов перечисленных видов электрооборудования производится при расчетной оценке надежности схемы РУ.

Параметр потока отказов СШ ω , из расчета на одну секцию, для данной модели можно выразить формулой:

$$\omega_{\text{сш}} = \omega_{\text{ш}} + n_{\text{пр}} \omega_{\text{ап}} + d_{\text{в}}^{2k} \omega_{\text{пр}} n_{\text{пр}}, \quad (3.3)$$

где $\omega_{\text{ш}}$ - параметр потока отказов собственно СШ (из расчета на одну секцию), который рассчитывается по формуле: $\omega_{\text{ш}} = \omega_{\text{ш}}^{\circ} n_{\text{пр}}$;

$\omega_{\text{ш}}^{\circ}$ - удельная частота отказов СШ;

$\omega_{\text{ап}}$ - параметр потока отказов аппаратов, подключенных к СШ непосредственно, без разъединителей или предохранителей (из расчета на одну секцию);

$\omega_{\text{пр}}$ - то же присоединения;

$n_{\text{пр}}$ - количество присоединений;
 $d_{\text{в}}^{2k}$ - относительная частота отказов выключателя при отключении КЗ на присоединении.

Модели отказов линий электропередачи

Первая модель отказов ЛЭП относится для одноцепных ВЛ данного вида (определяемого напряжением линий и материалом опор) или кабельной линии (КЛ) наиболее простой является модель отказов, в которой количество отказов с отключением линии принято пропорциональным длине линии.

Параметр потока отказов линии определяется в расчете на 100 км длины линии и имеет размерность: [отказ / (100 км*год)].

В данной модели для каждой отдельной ЛЭП параметр потока отказов ω_i определяется по формуле:

$$\omega_i = \frac{100m_i}{L_i T_i} \quad (3.4)$$

где m_i - число отказов i -ой линии за промежуток времени T_i , лет эксплуатации;

L_i - длина линии, км;

100 - условная единица длины линии, принятая равной 100 км.

Вторая модель отказов - для совокупности линий данного вида, определяется из выражения:

$$\omega_i = \frac{100 \sum_{i=1}^b m_i}{\sum_{i=1}^n L_i T_i} \quad (3.5)$$

где b - число отключенных линий из совокупности наблюдаемых линий данного вида;

n - общее число линий, входящих в совокупность данного вида.

Третья модель отказов - для линии данного вида, выраженный в той же размерности:

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^b \omega_i L_i T_i}{\sum_{i=1}^n L_i T_i}, \quad (3.6)$$

где использованы прежние обозначения.

Модель может применяться также для одной цепи двухцепной линии или для двухцепной линии, если критерием отказа принят одновременный отказ обеих цепей линии по одной причине [1].

Требования к оценке безотказности объекта существенно различаются в зависимости от степени ответственности объекта и его роли в электрической сети, а также возможных последствий его отказов. В таблице 3.1 приводятся рекомендуемые Международной электротехнической комиссией (Комитет 11) уровни (или классы) надёжности для ВЛ с позиций безотказности от воздействий внешних климатических нагрузок.[2]

Таблица 3.1 – Уровни и показатели надежности ЛЭП

Уровни надёжности	1	2	3
Период повторяемости расчетных нагрузок (среднее время между отказами) [число лет]	50	150	500
Интенсивность потока отказов [73ТК/год]	0.02	0.0067	0.002
Вероятность безотказной работы в течение года [о.е.]	0.98	0.993	0.998
Вероятность безотказной работы в течение срока службы линии, равному 50 лет, [о.е.]	0.368	0.716	0.905

Согласно указанным рекомендациям в любом случае линии должны иметь как минимум 1-ый уровень надёжности.

Уровень надёжности 2-ой применяется обычно для линий напряжением свыше 230 кВ и для линий более низкого напряжения, но являющихся основным или единственным ИП для ответственной нагрузки.

Уровень надёжности 3-ий применяется обычно для линий с напряжением свыше 230 кВ, которые являются основным или единственным ИП для ответственной нагрузки.

3.2 Модель отказов установок при последовательном соединении элементов

Простейшей системой с точки зрения теории надёжности является такой комплект элементов, при котором отказ одного элемента вызывает отказ всей системы, но не изменяет надёжность других элементов. Такую структуру в теории надёжности называют **системой с последовательным соединением элементов**.

При разработке модели надёжности без учета восстановления надёжность каждого элемента системы ЭСН можно характеризовать коэффициентом готовности K_r (вероятность рабочего состояния p) и коэффициентом вынужденного простоя K_v (вероятность состояния отказа q). Если не учитывать плановые простои (ремонт), то можно считать, что элемент в любой момент времени находится в одном из этих состояний. Тогда сумма вероятностей этих состояний равна 1:

$$p + q = 1. \quad (3.7)$$

Для группы из двух элементов возможны следующие сочетания:

- оба элемента в рабочем состоянии;
- первый элемент в вынужденном простое, второй в

рабочем состоянии;

- первый элемент в рабочем состоянии, второй в вынужденном простое;

- оба элемента в вынужденном простое.

Вероятности этих состояний можно найти, воспользовавшись теоремой умножения вероятностей событий. Применительно к состояниям элементов **теорема умножения** может быть сформулирована следующим образом: вероятность сложного события, состоящего в совпадении данных независимых состояний группы элементов, равна произведению вероятностей этих состояний. [8]

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

$$(p_1 + q_1) (p_2 + q_2) = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2 + q_1 q_2 = 1. \quad (3.8)$$

Если в системе из двух элементов элементы резервируют друг друга, то отказ системы произойдет только тогда, когда откажут оба:

$$q_c = q_1 q_2 \quad (3.9)$$

А вероятность надежной работы в этом случае:

$$p_c = 1 - q_c = 1 - q_1 q_2 = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2. \quad (3.10)$$

Таким образом, вероятность надежной работы системы из двух взаиморезервируемых элементов можно определить, пользуясь теоремами сложения и умножения вероятностей. **Теорема сложения** формулируется так: вероятность состояния группы элементов, состоящего в появлении хотя бы одного из заданных несовместимых состояний, равна сумме вероятности этих состояний. [8]

Если два элемента не резервируют друг друга, то состояние отказа этой системы будет тогда, когда откажет хотя

бы один элемент, а состояние надежной работы будет тогда, когда оба элемента в работе, т.е. для не резервированной системы из двух элементов вероятность надежной работы:

$$p_c = p_1 p_2 \quad (3.11)$$

А вероятность отказа в данном случае:

$$q_c = 1 - p_c = 1 - p_1 p_2 = q_1 q_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2. \quad (3.12)$$

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

Отметим, что логическая схема надежности не всегда совпадает с электрической схемой, особенно для схем с большим количеством присоединений.

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

$$p_c = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod p_i, \quad (3.13)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — элементы в последовательно соединенной системе;

p_i — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Вероятность состояния отказа определяется как вероятность события, противоположного рабочему состоянию:

$$q_c = 1 - p_c = 1 - \prod p_i, \quad (3.14)$$

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

$$q_c = \sum q_i - \sum q_i q_j + \sum q_i q_j q_k - \dots - (-1)^{n-1} q_1 q_n. \quad (3.15)$$

Для элементов электрических систем вероятности отказов гораздо меньше 1, поэтому при определении состояния отказа из n последовательно соединенных элементов вторым, третьим и последующими слагаемыми правой части равенства (3.15) можно пренебречь, как числами более высокого порядка малости. Поэтому в практических расчетах используют формулу:

$$q_c = \sum q_i \quad (3.16)$$

При последовательном соединении элементов в логической схеме надежности вероятности безотказной работы элементов перемножаются (3.13), поэтому при экспоненциальном законе распределения:

$$p_c = e^{-\sum \omega_i} = e^{-\omega_c} \quad (3.17)$$

Отсюда параметр потока отказов при последовательном соединении определяется как:

$$\omega_c = \sum \omega_i, \quad (3.18)$$

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

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

$$T_{cp} = 1/\omega_c = 1/\sum \omega_i = 1/(1/T_1 + 1/T_2 + \dots + 1/T_n). \quad (3.19)$$

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

$$T_{в.с.} = q_c / \omega_c. \quad (3.20)$$

В случае последовательного соединения 2-х элементов и при критерии - выход из работы любого элемента нарушает технологическую связь между входом А и выходом В (случай отказа) - эквивалентные показатели надёжности рассчитываются по формулам:

- интенсивность (параметр) потока отказов:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (3.21)$$

- среднее время восстановления:

$$T_{в} = \frac{\lambda_1 \cdot T_{в1} + \lambda_2 \cdot T_{в2}}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (3.22)$$

Структурой из последовательно соединенных элементов можно моделировать надежность электрических цепей с последовательным соединением аппаратов, трансформаторов,

проводов, кабелей и ВЛ, а также схем, содержащих обмотки и контакты реле, резисторы, тиристоры, катушки индуктивности и электронные приборы.

В качестве примера рассмотрим участок электрической сети, состоящей из последовательно соединенных элементов: выключателя, ЛЭП и трансформатора (рисунок 3.1). Очевидно, что отказ любого из элементов приводит к вынужденному простоя всего участка. Влияние каждого из элементов на надежность всего участка можно оценить поданным таблице 3.2, где приведены показатели надежности элементов участка сети напряжением 110 кВ.

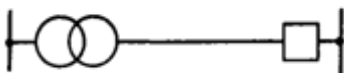


Рисунок 3.1 – Схема ЛЭП

Таблица 3.2 - Показатели надежности элементов участка сети напряжением 110 кВ

Элемент	ω , 1/год	T, ч	$K_{п}$, о. е.
Выключатель	0,026	100	0,0003
Линия 50 км	0,50	14	0,0008
Трансформатор	0,015	200	0,0003

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

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

Рассмотрим простейшую схему электрических соединений, состоящую из выключателя, ЛЭП и

трансформатора (рисунок 3.1) [8]. Для такой электрической схемы логическая схема надежности представляет собой последовательное соединение трех элементов, так как отказ любого элемента вызывает отказ всей системы. На рисунке 3.2 дана соответствующая логическая схема надежности. Обычно над прямоугольником, отражающим влияние каждого элемента на надежность системы в целом, указываются вид элемента, а в прямоугольнике — присвоенный ему номер в схеме надежности.

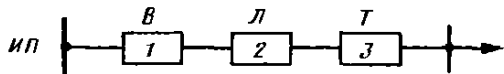


Рисунок 3.2 - Логическая схема надежно сети ЛЭП

Если шины ИП, от которого отходит линия, имеют еще присоединения (рисунок 3.3), то их надежность отражается на надежности ЭСН потребителей рассматриваемой линии, поскольку отказ или вывод в плановый ремонт каждого из шинных разъединителей приводит к отключению всей шины и, следовательно, к отключению рассматриваемой линии.

Поскольку, как сказано выше, отказ каждого присоединения приводит к отказу всей системы, в логической схеме надежности эти элементы соединены последовательно с элементами рассматриваемой линии (рисунок 3.4).

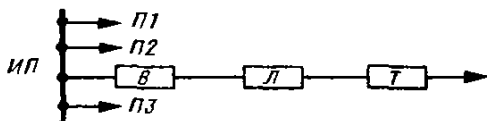


Рисунок 3.3 - Схема ЛЭП с несколькими (тремя) присоединениями к шинам ИП

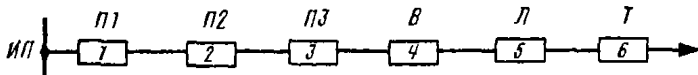


Рисунок 3.4 - Логическая схема надежности ЛЭП с тремя присоединениями к шинам ИП

Очевидно, что значение параметра потока отказов схемы на рисунке 3.4 больше, чем схемы на рис. 3.2, и чем большее число присоединений имеют шины ИП, тем менее надежна система ЭСН в целом.

3.3 Модель отказов установок при параллельном соединении элементов

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

$$q_c = q_1 q_2 q_3 \dots q_n = \prod q_i, \quad (3.23)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — элементы в параллельно соединенной системе;

g_i — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Вероятность рабочего состояния определяется как вероятность события, противоположного состоянию отказа:

$$p_c = 1 - q_c = 1 - \prod q_i, \quad (3.24)$$

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

$$\begin{aligned} p_c &= 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) = \\ &= p_1 + p_2 - p_1 p_2 = e^{-\omega_1} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

При $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ имеем:

$$p_c = 2e^{-\omega} - e^{-2\omega} \quad (3.26)$$

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

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.27)$$

Если $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ то имеем:

$$T_{\text{ср}} = \frac{2}{\omega} - \frac{1}{2\omega} = \frac{3}{2\omega} \quad (3.28)$$

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

$$\omega_c = \omega_1 q_2 + \omega_2 q_1, \quad (3.29)$$

где ω_1 и ω_2 — параметры потока отказов первого и второго элементов;

q_1 и q_2 — вероятности (коэффициенты) вынужденного простоя.

В (3.29) первый член соответствует наложению отказа первого элемента на вынужденный простой второго, а второй наоборот — наложению отказа второго элемента на вынужденный простой первого.

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

$$q_c = q_1 q_2. \quad (3.30)$$

По известным параметру потока отказов и вероятности отказа, используя выражение (3.29), найдем время восстановления системы $T_{вс}$ и при одинаковых параметрах элементов получим:

$$T_{в.с.} = q_c / \omega_c = T_B / 2, \quad (3.31)$$

где T_B — время восстановления одного элемента.

При параллельном соединении элементов и критерии — случай отказа имеет место только при выходе из работы обоих элементов — эквивалентные показатели надёжности при условии $\lambda_i \cdot T_{ei} \ll 1$ ($i=1,2$) рассчитываются по формулам [17]:

- интенсивность (параметр) потока отказов:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (T_{e1} + T_{e2}); \quad (3.32)$$

- среднее время восстановления:

$$T_B = \frac{T_{e1} \cdot T_{e2}}{T_{e1} + T_{e2}}. \quad (3.33)$$

Элементы в логической схеме надёжности соединяют параллельно, если при отказе одного, другой обеспечивает надёжность системы полностью. Для систем ЭСН это возможно в том случае, если при отказе одной цепи оставшаяся в работе цепь обеспечивает требуемую пропускную способность элементов и мощность ИП работающей цепи достаточна для обеспечения объекта ЭСН без ограничения в подаче электроэнергии при надлежащем ее качестве. Если указанные выше условия не соблюдаются, то элементы не могут рассматриваться как взаиморезервируемы и, следовательно, в логической схеме надёжности они не могут быть соединены параллельно.

На рисунке 3.5 изображена электрическая схема двухцепной ЛЭП, которая может быть представлена параллельным соединением элементов в логической схеме ее надежности (см. рисунок 3.6).

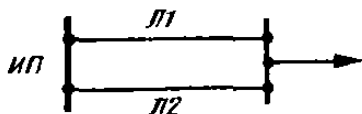


Рисунок 3.5 - Схема двухцепной ЛЭП без Выключателей

Очевидно, что реальные схемы ЭСН не сводятся только к последовательным или только к параллельным соединениям в логических схемах надежности. Элементы в логической схеме надежности могут быть соединены параллельно-последовательно и последовательно-параллельно.

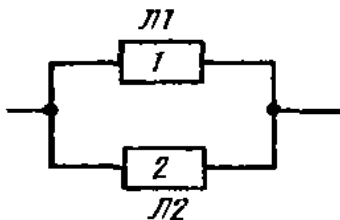


Рисунок 3.6 - Логическая схема надежности двухцепной ЛЭП

Так, например, для электрической схемы, изображенной на рисунке 3.7, логическая схема надежности может быть представлена так, как показано на рисунке 3.8.

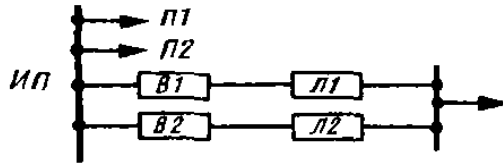


Рисунок 3.7 - Схема ЭСН от одного ИП

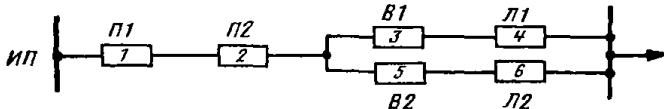


Рисунок 3.8 - Логическая схема надежности при параллельно-последовательном соединении элементов

Для анализа такой схемы ЭСН (рисунок 3.7) необходимо получить показатели надежности всей схемы по показателям надежности ее элементов. Для этого следует преобразовать логическую схему надежности так, чтобы шины ИП и потребителя были связаны одним элементом (наподобие того, как преобразовываются электрические цепи с последовательно-параллельным соединением сопротивлений) [8]. Порядок преобразований показан на примере схемы (см. рисунок 3.8).

Преобразовываем все последовательные цепи (рисунок 3.9)

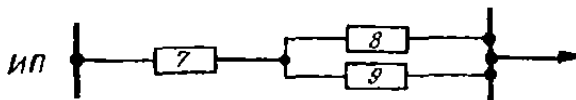


Рисунок 3.9 - Первый этап преобразования логической схемы надежности

Находим показатели надежности объединенных элементов 7, 8 и 9:

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

В результате преобразований получаем схему (рисунок 3.9) с параллельными элементами 8 и 9. Далее необходимо заменить элементы 8 и 9 одним (10 на рисунке 3.10).

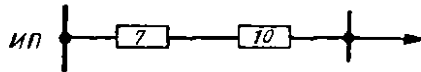


Рисунок 3.10 - Второй этап преобразования логической схемы надежности

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

Вероятность безотказной работы в течение одного года будет равна:

$$p_{10} = e^{-\omega_8} + e^{-\omega_9} - e^{-(\omega_8 + \omega_9)} \quad (3.34)$$

Параметр потока отказов по формуле (3.29) запишется:

$$\omega_{10} = \omega_8 q_9 + \omega_9 q_8.$$

При $\omega_8 = \omega_9$ и $q_9 = q_8$ по формулам (3.29) и (3.31) имеем:

$$\omega_{10} = 2\omega_8 q_9.$$

$$T_{в10} = T_{в8}/2.$$

В результате получим схему с двумя последовательно соединенными элементами 7 и 10 (рисунок 3.10) и их параметры надежности. Далее следует определить параметры надежности всей схемы – элемента 11 (рисунок 3.11) по параметрам последовательно соединенных двух элементов 7 и 10 как указывалось выше.

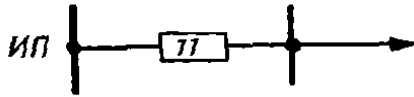


Рисунок 3.11 - Третий этап преобразования логической схемы

Итак, для получения расчётной оценки показателей надёжности объекта на этапе проектирования исходят из того, что в структуре объекта известны показатели надёжности, характеризующие безотказность и ремонтпригодность всех образующих его элементов: оборудования, аппаратуры и конструкций. Известна также схема соединений этих элементов. Задача заключается в расчёте показателей надёжности всего объекта (λ и T_e) по показателям надёжности элементов (λ_i и T_{ei}).

Глава 4 Методы оценки надежности электроэнергетических установок и систем

4.1 Классификация режимов и методов

Конечной целью расчета надежности систем ЭСН является количественная оценка комплексных показателей надежности относительно конкретных узлов нагрузки и разработка на основе полученных результатов мероприятий целенаправленного их изменения.

Количественные характеристики комплексных показателей надежности зависят от состояний системы в каждый момент времени и спроса мощности и энергии в узлах нагрузки. Число дискретных состояний в сложной схеме исключительно велико. Поэтому на практике невозможно оценить надежность, не разработав эффективного метода сокращения числа рассматриваемых состояний до приемлемого уровня и достижения конкретных целей.

Проблема надежности ЭС и их элементов связана с вопросами определения и оптимизации показателей надежности ЭС на стадиях проектирования, сооружения и эксплуатации. С увеличением электро- и теплотребления усложняется структура ЭС, увеличивается их мощность и мощность единичных агрегатов, повышается уровень автоматизации.

Основными причинами полных сбросов нагрузки в большинстве случаев являются: низкая надежность тепловых и электрических схем ТЭС в ремонтных режимах и при выводе основного оборудования в холодный резерв. Зачастую ЭС вынуждены работать в маневренных режимах при покрытии ступенчатых графиков нагрузки, при этом процессы функционирования ЭЭУ на современных ЭС характеризуются стационарными и переменными режимами [13].

Большинство задач по формализации процессов функционирования систем сводится к количественной оценке вероятностных показателей в стационарном режиме с

использованием логико-вероятностных, топологических, аналитических и других методов.

Решая задачи надежности главным образом структурных моделей, в этих методах мало уделяется внимания режимной надежности ЭЭУ, которая приобретает особую важность в процессах регулирования графиков электрических нагрузок ЭЭС с учетом фактора человека. Чтобы восполнить этот пробел, предлагается структурно-функциональный метод исследования надежности ЭЭУ в стационарных и переменных режимах: пуска, останова и регулирования нагрузки.[14]

В качестве расчетных режимов для исследования надежности выдачи мощности ЭС принимаются: нормальный, переменный и аварийный режимы (установившийся и неуставившийся).

В *установившихся аварийных режимах* учитываются все отказы тепломеханического и электротехнического оборудования с использованием средних значений показателей надежности.

В *неуставившихся режимах* учитывается только то оборудование (генераторы, трансформаторы, выключатели, СШ, ЛЭП), которое отключается РЗ. Надежность этого оборудования, средств защит и автоматики характеризуется мгновенными значениями.

Всякий режим ЭС или ЭЭУ может быть представлен статической, кинематической или динамической моделью.

Статическая модель характерна для нормального режима ЭС и отображает структурную взаимосвязь элементов ЭС, поэтому методы исследования надежности на основе этой модели названы структурными. Применяются математические методы: аналитический, топологический, логико-вероятностный. Критерием надежность ЭС в этом случае является условный недоотпуск электроэнергии ΔW_n .

Кинематическая модель отражает не только взаимосвязь элементов ЭС, но и их взаимодействие в процессе функционирования и учитывает последствия действий автоматики, защит и оперативного персонала, изменяющие

режим работы. Кинематические модели применимы в переменных режимах: пуска, нормального и аварийного останова, включения, отключения, регулирования ЭЭУ, - а так же в установившемся аварийном режиме. В отличие от статических, кинематические модели предназначены для исследования структурно-функциональной надежности. При расчетах используют топологические методы, например, марковский метод, структурно-функциональный и пр. Критерием надежность ЭС в этом случае является и условный недоотпуск электроэнергии ΔW_n в случае переменного режима, и дефицит мощности ΔP при установившемся аварийном режиме.

Динамические модели предназначены для идентификации неустановившихся аварийных режимов, возникающих вследствие нештатных аварийных ситуаций с каскадным (цепочечным) развитием аварии. Динамические модели предназначены для исследования структурно-функциональной надежности. При этом в расчетах используют данные лишь статистических испытаний. Надежность ЭС в этом случае характеризуется свойствами живучести и режимной управляемости.

В данной работе предложены статические и кинематические модели ЭЭУ на основе структурных методов расчетов надежности. Особое место в теории надежности занимают топологические методы расчетов на основе графов (см. таблицу 4.1) [13].

Таблица 4.1 - Применение графов в качестве моделей

Графы	Методы расчета надежности
Мэсона (сигнальный)	Зависимых отказов, связанных между собой групп элементов
Коутса (направленный)	Процесса функционирования в стационарном и переменных режимах энергоустановок
Цепей Маркова	Стационарных значений и временных зависимостей вероятностей состояний систем
Деревьев событий	Причинно-следственных связей развития событий отказов в системах
Сетевых систем (частично	Минимальных путей и сечений сетей

4.2 Метод, учитывающий зависимые отказы элементов

В электрических системах и отдельных ЭЭУ возможны отказы элементов, обусловленные отказами смежных элементов и сопровождающиеся КЗ. Такие отказы называются **зависимыми отказами**.

Для учета зависимых отказов могут быть применены топологические модели на основе сигнальных графов Мэсона (граф М) [14]. В общем виде граф М (рисунок 4.1) описывается выражением относительно расчетного элемента (РЭ):

$$P_{PЭ} = \sum_i^n \omega_i T_{B(n)} \alpha_{(i+1)i} \quad (4.1)$$

где $P_{PЭ}$ - вероятность состояния отказа элемента, относительно которого производится расчет, отн. ед.;

ω_i - частота отказов элемента, соответствующего вершине графа М, 1/год;

$\alpha_{(i+1)i}$ - передача отказа от (i+1)-го к i-ому элементу, характеризующая значение условной вероятности отказа РЭ при отказе (i+1)-го элемента (i = 1, 2, 3...n), отн. ед.;

$T_{B(n)}$ - продолжительность восстановления (а также оперативных переключений или простоя) РЭ, соответствующая собственному контуру вершины (петле), ч;

n - количество элементов.

При стационарности процессов отказов и восстановления, подчиняющихся показательному закону распределения, для зависимых отказов на интервале времени Δt применимы основные выражения из теории вероятностей.

Вероятность одновременного наступления двух зависимых событий А и В имеет вид:

$$P(AB) = P(A/B) P(B),$$

где $P(A/B)$ - условная вероятность отказа РЭ, изменяющееся от 0 до 1, а граничные значения показывают отсутствие или наличие связи между элементами.

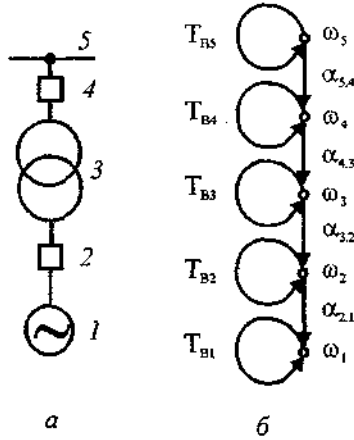


Рисунок 4.1 - Метод, учитывающий зависимые отказы элементов: *a* - схема электрических соединений блока; *б* - направленный граф

Связь элементов через коммутационный аппарат (выключатель) представляется как передача отказов с относительной частотой отказа выключателя $d_b^{2к}$ при автоматических и $d_b^{оп}$ при оперативных переключениях.

Согласно (4.1) граф M для схемы электрических соединений РУ, показанной на рисунке 4.2, описывается формулой:

$$P_{PЭ} = \sum_i^I \omega_i T_{B_i} + \sum_j^J \omega_j T_{B_{Pj}} + \sum_x^X \omega_x T_{\Pi} + d_B^{2к} \sum_y^Y \omega_y T_{\Pi} \quad (4.2)$$

где $P_{PЭ}$ - вероятность состояния отказов РЭ;

ω_i ω_j ω_x ω_y - частота отказов элементов;

T_{B_i} - продолжительность восстановления;

T_{Π} - время простоя при оперативных переключениях;
 $T_{вр} = T_{в} - T_{в}^2/2T_{р}$ - время простоя схемы при наложении отказа выключателя на ремонт другого;
 $T_{р}$ - время ремонта выключателя;
 I, J, X, Y - количество элементов;
 $d_{в}^{2к}$ - условная частота отказов выключателя при автоматическом отключении КЗ.

Метод, основанный на графах М, имеет ограниченное применение при следующих недостатках:

- надежность систем или отдельных ЭЭУ рассматривается в статическом состоянии при отказах в виде КЗ;
- в оценке надежности не учитывается резервирование элементов;
- исключается влияние внешних стохастических факторов на систему.

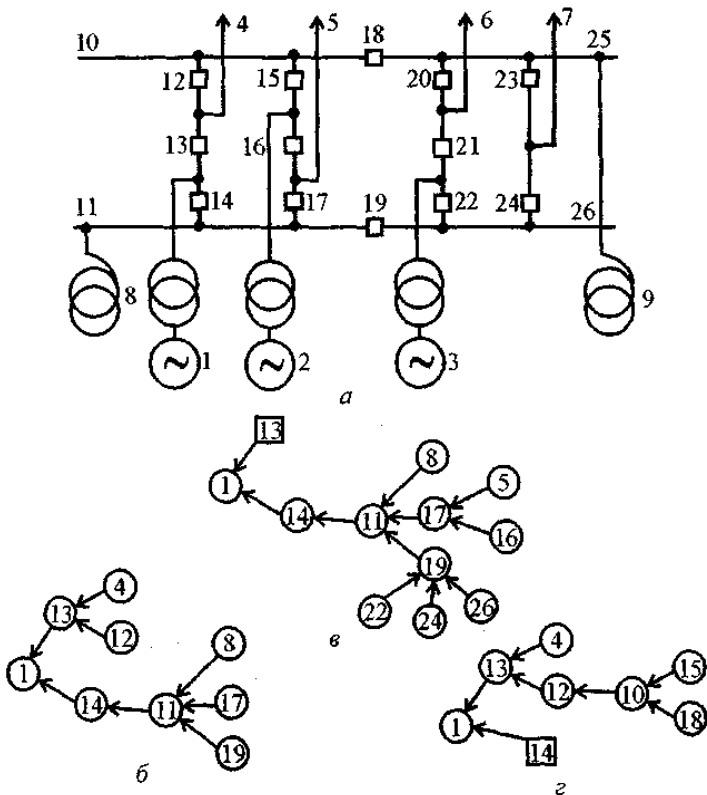


Рисунок 4.2 - Схема ОРУ - 220 кВ:
 а - схема электрических соединений ОРУ; б - граф зависимых отказов в нормальном режиме ОРУ; в, г - графы зависимых отказов при ремонте выключателей

4.3 Метод расчетов структурно-функциональной надежности электроэнергетических установок

Использование топологических структур графа Коутса (граф К) в качестве кинематических моделей для оценки надежности ЭЭУ расширяет диапазон исследований и позволяет решать задачи структурно-функциональной

надежности [14]. Граф К соответствует системе линейных уравнений, записанных в общем виде:

$$\sum_i^n k_i k_{ii} k_{i(i+1)} - \varphi(F) = 0, \quad (4.3)$$

где k_i - совокупность вершин, отображающих переменные ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

$k_{ii}, k_{i(i+1)}$ - совокупность дуг, отображающих передачи;

$\varphi(F)$ - совокупности вероятностей внешних факторов воздействия.

Аналитический способ преобразования графа К заключается в описании типовых графов К уравнениями относительно начального и конечного состояний системы и определения коэффициента готовности конечного состояния.

Структурные схемы строятся для технологически связанных между собой элементов, которые образуют функциональные цепи. Функциональная цепь представляется направленным графом (рисунок 4.3), узлы которого соответствуют коэффициентом готовности функциональной цепи, а ветви - коэффициентам готовности элементов (k_i, k_j, k_q).

Вводятся понятия параметров начального k_0 и конечного k_n узлов. Узлы графа обладают собственными контурами (k_{00}, k_{nn}), к узлам отнесены действия факторов F, влияющих на изменение структурной схемы с вероятностью $\varphi(F)$.

Собственные контуры в узлах графа k_{00} и k_{nn} характеризуют результат диагностического контроля работоспособного состояния отдельных или группы связанных элементов.

Вероятность фактора F_0 принимает дискретное значение 1 или 0 по результатам диагностического контроля.

Целью расчета является определение коэффициента готовности конечного узла k_n .

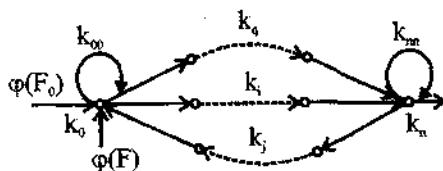


Рисунок 4.3- Кинематическая модель надежности ЭЭУ

Получены основные выражения k_n для схем ЭЭУ, имеющих последовательно-параллельное соединение элементов с учетом действия стохастических факторов прямой и обратной связи.

а) Коэффициент готовности k_r кинематической системы при последовательном соединении элементов в смысле надежности согласно модели на рисунке 4.4 а) будет равен:

$$k_a = \varphi(F) \frac{\prod_i^I k_i}{k_{00} k_{nn}} = \prod_i^I k_i \quad (4.4)$$

где $\varphi(F_0) = 1$; $k_{00} = k_{nn} = -1$.

б) При параллельно-последовательном соединении элементов в случае нагруженного резерва коэффициент готовности кинематической системы (рисунок 4.4 б)) равен:

$$k_6 = \prod_j^J k_j + \varphi(F) \prod_i^I k_i$$

$$k_6 = \prod_i^I k_i + \prod_j^J k_j - \prod_i^I k_i \prod_j^J k_j \quad (4.5).$$

Получена зависимость, соответствующая схеме с одной резервной функциональной цепью с элементами k_i (или k_j). При условии, что выполняется равенство:

$$\varphi(F) = 1 - \prod_j k_j$$

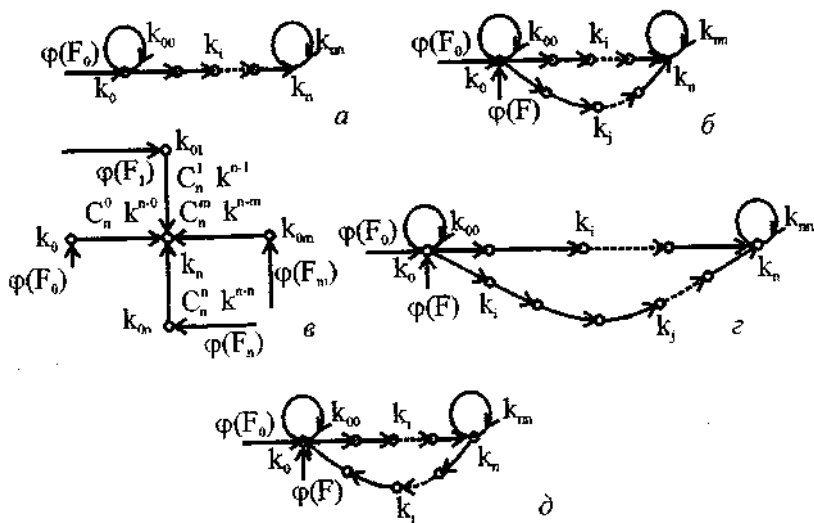


Рисунок 4.4 - Кинематические модели систем:

a - последовательное соединение элементов; *б* - параллельно-последовательное соединение элементов; *в* - система с кратным резервированием; *г* - последовательно-параллельное соединение элементов; *д* - система с обратной связью при действии защит

в) В случаях, когда схемы имеют некоторую кратность резервирования (рисунок 4.4 в)), коэффициент готовности определяется по формуле биномиального распределения:

$$k_{\text{в}} = \sum_{i=0}^m C_n^i k^{n-1} (1-k)^i, \quad (4.6)$$

где n - общее количество функциональных цепей,

m - количество резервных цепей;

$1 - k = \varphi(F)$ - вероятность отказа цепи или коэффициент простоя;

k - коэффициент готовности однородной функциональной цепи.

г) Модель графа K , отображающая ненагруженный резерв (замещение), представляется в виде параллельно-последовательного соединения элементов с прямой стохастической связью (рисунок 4.4 б)):

$$k_{\text{г}} = (1 - \varphi(F)) \prod_i^I k_i + \varphi(F) \prod_j^J k_j \quad (4.7).$$

д) Включение параллельной функциональной цепи, состоящей из двух групп элементов, в случае изменения режима, например, регулирование нагрузки, под действием фактора с вероятностью $\varphi(F)$ (рисунок 4.4 з)):

$$k_{\text{д}} = (1 - \varphi(F)) \prod_i^I k_i + \varphi(F) \prod_i^I k_i \prod_j^J k_j \quad (4.8).$$

е) Модель параллельно-последовательного соединения элементов с обратной стохастической связью, включающейся при действии фактора с вероятностью $\varphi(F)$, например, при отключении ЭЭУ от защит (рисунок 4.4 д)):

$$k_e = (1 - \varphi(F)) \frac{\prod_i^I k_i}{1 - \varphi(F) \prod_i^I k_i \prod_j^J k_j} \quad (4.9).$$

4.4 Метод расчетов надежности на основе графов цепей Маркова

Формирование моделей для расчета надежности систем и ЭЭУ производится с учетом реальных потоков событий, в результате которых происходит эволюция рассматриваемых объектов из состояния в состояние. Потоки событий возникают по причинам отказов, восстановлений, замены, плановых ремонтов элементов систем. Эволюция состояний описывается в виде траекторий переходов из одного состояния в другое с помощью цепей Маркова (рисунок 4.5).[14]

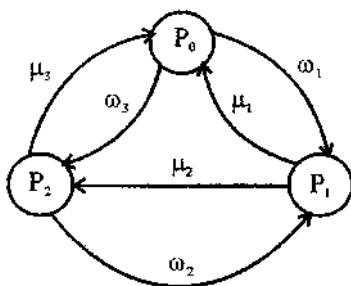


Рисунок 4.5 - Граф состояний ОРУ-220 кВ:

P_0 - вероятность нормального состояния;

P_1 - вероятность частично рабочего состояния;

P_2 - вероятность ремонтного состояния

Статическая модель системы при $t \rightarrow \infty$, соответствующая графу цепи Маркова (граф ЦМ), описывается линейными уравнениями вида:

$$\sum P_j \mu_{ji} - P_i \sum \omega_{ij} = 0, \quad (4.10)$$

где P_i, P_j - вероятности состояний, отн. ед.;

μ_{ji}, ω_{ij} - интенсивность переходов, 1/год;

G_j - подмножество состояний Марковского процесса, из которых возможны переходы в i -е состояние ($j \in G_j$);

G_i - подмножество состояний, в которые возможны переходы из i -го состояния ($i \in G_i$).

Для решения системы уравнений относительно P_i и P_j дополнительно вводится уравнение нормировки $\sum P_{ij} = 1$.

Схема ОРУ - 220 кВ, показанная на рисунке 4.2, может находиться в состояниях: нормального, когда все элементы находятся в работе; частично рабочего, при отказах отдельных элементов схемы на время устранения отказа, и ремонтного при плановом ремонте выключателей. Относительно РЭ блока 1 граф состояний (рисунок 4.5) описывается следующими линейными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} -(\omega_1 + \omega_3)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_3 P_2 &= 0; \\ \omega_1 P_0 - (\mu_1 + \mu_2)P_1 + \omega_2 P_2 &= 0; \\ \omega_3 P_0 + \mu_2 P_1 - (\omega_2 + \mu_3)P_2 &= 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Входящие в эту систему уравнений интенсивности переходов рассчитываются по выражениям:

$$\omega = \sum_i^n \omega_i, \quad \mu = \frac{\sum_i^n \omega_i}{\sum_i^n \omega_i T_{\text{в}}(\pi)}$$

или

$$\omega = \sum_i^n \alpha \omega_i, \quad \mu = \frac{\sum_i^n \alpha \omega_i}{\sum_i^n \alpha \omega_i T_{\text{в}}(\pi)}$$

(4.11)

где π - количество элементов в системе;

$T_{в(п)}$ - продолжительность восстановительных ремонтов или простоя, ч.

Применение представленного метода в целях оценки вероятности состояния схем электрических соединений или ЭЭУ ограничено в связи с большими вычислительными затратами, несмотря на более высокую точность по сравнению с другими методами.

Так, например, рассмотрим расчет количественных показателей при простейшем случае, когда объект имеет два состояния: работы и отказа, причём переходы из состояния в состояние происходят под воздействием пуассоновских потоков событий (нередко потоки принимаются стационарными).

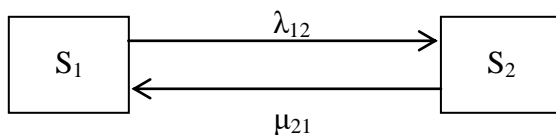


Рисунок 4.6 - Состояния электросетевого объекта: S_1 – объект исправен (работает), S_2 – объект неисправен (находится в ремонте)

На объект, находящийся в состоянии S_1 , действует стационарный поток отказов с интенсивностью λ_{12} , переводящий объект в состояние S_2 . На объект, находящийся в состоянии S_2 , действует стационарный поток восстановлений с интенсивностью μ_{21} . Оба потока являются пуассоновскими и независимыми.

Вероятности нахождения объекта в состоянии работы – $p_{\text{раб}}$ и состоянии отказа – $p_{\text{отк}}$ в стационарном режиме определяются путем решения уравнений Колмогорова [4]:

$$p_{\text{раб}} = \frac{\mu_{21}}{\lambda_{12} + \mu_{21}}; p_{\text{отк}} = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \mu_{21}}. \quad (4.12)$$

Исходя из свойств показательного распределения, среднее время нахождения объекта в работе составляет:

$$T_{раб} = \frac{1}{\lambda_{12}}, \quad (4.13)$$

Среднее время нахождения объекта в состоянии отказа:

$$T_{вос} = \frac{1}{\mu_{12}}. \quad (4.14)$$

Подставляя (4.13) и (4.14) в (4.12), получим:

$$P_{раб} = \frac{T_{раб}}{T_{раб} + T_{вос}}; P_{отк} = \frac{T_{вос}}{T_{раб} + T_{вос}}. \quad (4.15)$$

Последние выражения для вероятностей известны под названием соответственно коэффициент готовности (комплексный показатель надёжности) и коэффициент неготовности. Знаменатель в формулах (4.15) представляет собой среднее время между отказами (полный цикл "работа – отказ - восстановление"):

$$T_{ср} = T_{раб} + T_{вос}. \quad (4.16)$$

Подставляя (11) в (10) с учётом (6), получим:

$$\lambda = \frac{1 - P_{раб}}{T_{вос}} \text{ или } \lambda = \frac{P_{раб}}{T_{раб}}. \quad (4.17)$$

Полученное выражение в [17] известно как фундаментальное уравнение, устанавливающее связь между

тремя параметрами – показателями надёжности работы объекта.

Уравнение (4.17) с методической точки зрения интересно тем, что позволяет определить минимальное число показателей, которые дают достаточную оценку надёжности объекта. Исходя из (4.17), число таких показателей должно быть равно двум, а остальные, при необходимости, могут быть рассчитаны по формулам.

4.5 Логико-вероятностный метод расчета надежности с использованием графов деревьев событий

Граф деревьев событий (граф ДС) представляет собой связанный граф, у которого число дуг (ветвей) на единицу меньше вершин (углов) [14]. Логические связи между событиями, которые порождают результирующее событие, отражаются ветвями, в целом граф имеет древовидную структуру (рисунок 4.7 б)). С помощью графов ДС производится причинно-следственный анализ влияния изменения работоспособности отдельных элементов, согласно структурной схеме (рисунок 4.7 а)), на состояние системы (результирующее событие), которое формируется как функция отказа \bar{X} .

Описание множества \bar{X} получают посредством логических операций дизъюнкций \vee - суммирования и конъюнкций \wedge - умножения. Формирование функции отказа начинается с нижнего уровня графа ДС.

В случае дизъюнкций элементарных событий $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ сложное событие \bar{X}_1 представляется логической суммой:

$$\bar{X}_1 = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \dots \vee \bar{x}_n \quad (4.18)$$

Если наблюдается конъюнкция элементарных событий, то \bar{X}_2 представляется логическим произведением:

$$\overline{X_2} = \overline{x_1} \wedge \overline{x_2} \wedge \dots \wedge \overline{x_n} \quad (4.19)$$

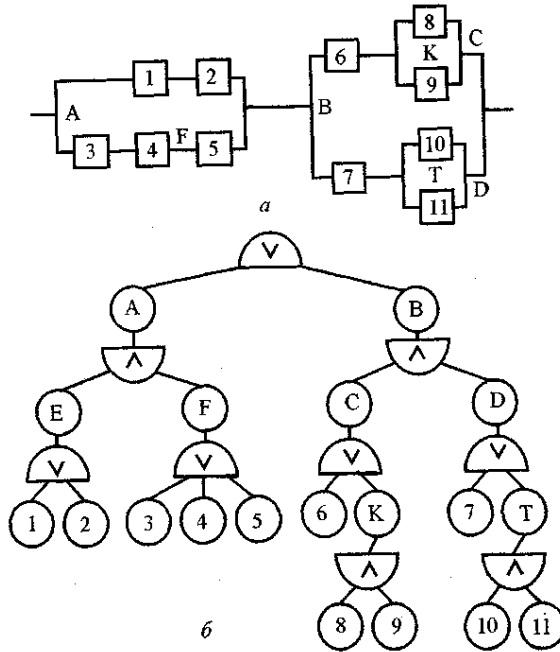


Рисунок 4.7 - Граф ДС: *a* - структурная схема; *б* - граф дерева отказов

Переходя на вероятностные обозначения, получим для дерева отказов, показанного на рисунке 4.7 *б*), следующие выражения:

	$P_K = P_8 P_9$
	$P_T = P_{10} P_{11}$
$P_E = P_1 + P_2$	$P_C = P_6 + P_K$
$P_F = P_3 + P_4 + P_5$	$P_D = P_7 + P_T$
$P_A = P_E P_F$	$P_B = P_C P_D$

Вероятность вершинного события равна:

$$P = P_A + P_B$$

С помощью графа ДС получают систематизированное представление всех возможных причин результирующего события и их взаимодействие. Метод нашел применение в оценке надежности тепловой части ЭЭУ, схем электрических соединений для небольшого числа событий при отказах в виде «обрыва».

Недостатком метода является статический характер рассматриваемых событий и применимость только для схем с последовательным и параллельным соединениями элементов (с явным резервированием). Отражение случаев с кратным резервированием с помощью дерева событий весьма проблематично, кроме того поперечные связи не учитываются.

4.6 Метод минимальных путей и сечений

Метод базируется на представлении сетевых систем графом сети (граф С). К сетевым системам относятся физические системы, предназначенные для распределения электроэнергии, газа, воды, пара и пр. Геометрическое изображение сети может быть представлено графом, у которого направление дуг обязательно должно совпадать с направлением физического потока, поэтому граф является частично ориентированным. Условием ориентирования графа сети является расположение базисных узлов, относительно которых производится оценка надежности системы.

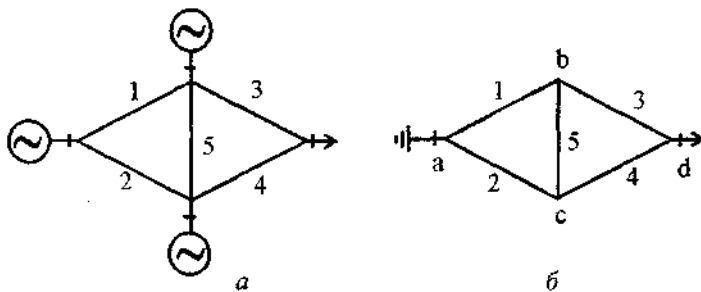


Рисунок 4.8 - Схема системы (а) и граф сети (б)

Реальная схема электрических соединений преобразуется в структурную (граф С), при этом последовательно и параллельно соединенные элементы заменяются эквивалентными. Элементом графа С присваиваются названия (обозначения) физической сети: *вершинам* - пункты присоединений, *дугам* - ЛЭП. Кроме этих вершин в графе образуются вершина ИП и так называемый узел земли, который получается в результате объединения всех нейтралей ИП.

Представление электрической схемы графом сети дает возможность упростить расчеты и применить для вычислений матрицу путей, по которым возможны связи между источником и нагрузкой. Из этих путей выделяются минимальные пути, состоящие из элементов, работоспособное состояние которых обеспечивает передачу электроэнергии от ИП к узлу нагрузки.

Путь	1	2	3	4	5	a	b	c	d
П ₁	1	0	1	0	0	1	1	0	1
П ₂	0	1	0	1	0	1	0	1	1
П ₃	1	0	0	1	1	1	1	1	1
П ₄	0	1	1	0	1	1	1	1	1

В этой матрице единица (1), стоящая на пересечении строки (путь П) и столбца (i), означает, что i-й элемент или узел входит в путь П_i; ноль (0) означает, что i-й элемент или узел не входит в путь П_i.

Из матрицы путей нетрудно получить матрицу сечений. Сечения при этом могут быть одноэлементными, двухэлементными и т.д.

Сечение	1	2	3	4	5	a	b	c	d
C ₁	1	1	0	0	0	0	0	0	0
C ₂	0	0	1	1	0	0	0	0	0
C ₃	1	0	0	1	1	0	0	0	0
C ₄	0	1	1	0	1	0	0	0	0
C ₅	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C ₆	0	0	0	0	0	0	1	1	0
C ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Минимальными сечениями системы называются совокупности минимального набора элементов, одновременные отказы которых приводят к перерыву ЭСН узла нагрузки.

Если все пути содержат один элемент, то этот элемент является одноэлементным сечением (узлы a и d) и соответствует схеме одного отказа при оценке надежности системы.

Если пути содержат два одинаковых элемента, то эти элементы образуют двухэлементное сечение, что соответствует схеме двух отказов.

Вероятность отказа системы (рисунок 4.8) без учета преднамеренных отключений относительно узла нагрузки d имеет вид:

$$Q = q_a + q_1q_2 + q_bq_c + q_3q_4 + q_5q_1q_4 + q_5q_2q_3 + q_d \quad (4.20)$$

При расчете показателей надежности с помощью структурных схем анализируются не все возможные состояния схемы, а только состояния безотказной работы того минимального набора элементов, которые обеспечивают нормальное функционирование схемы (передачу энергии) от ИП до узла нагрузки (минимальные пути) или отказ того минимального набора элементов, отказ которого в любом из наборов приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла (минимальные сечения).

С помощью минимальных путей или сечений, полученных в результате структурного анализа, можно определить вероятность обесточения узла нагрузки. Рассмотрим основные положения и определения теории графов, используемые в структурном анализе, целью которого является определение минимальных путей или минимальных сечений.[5]

Графом называются два любых множества A и B , в которых каждому элементу из множества A соответствуют два элемента из множества B . Элементы A и B называются соответственно ребрами и вершинами графа. Вершины, соответствующие ребру, называются *концами ребра*. Ребро называется *ориентированным*, если один из его концов рассматривается как начало, а другой как окончание. На схеме ориентированное ребро изображается как отрезок со стрелкой. Граф, в котором отдельные ребра ориентированы, называется *частично-ориентированным*. Граф, где все ребра ориентированы, называется *ориентированным*. Граф без ориентации ребер называется *неориентированным*.

Изучение структуры той или иной схемы равносильно изучению структуры графов. Граф называется *планарным*, если он может быть изображен на плоскости без пересечений ребер в точках, не являющихся вершинами графа, в противном случае граф является *непланарным*. Для системы ЭСН свойство планарности, как правило, выполняется, так как переходы линий друг над другом встречаются относительно редко.

Анализ связей при расчетах надежности заключается, прежде всего, в нахождении и оценке путей между его вершинами, т. е. ИП и узлами нагрузки. *Путем графа* называется такая последовательность ребер, в которой конец каждого предыдущего ребра совпадает с началом последующего. Однореберный путь называется *непосредственным*, многореберный - *транзитным*.

Существует много способов определения минимальных путей графа. Эти способы делятся на аналитические и логико-

цифровые (последние реализуются обычно только на ЭВМ) и основаны на аналитическом представлении схемы в виде матрицы *непосредственных* путей. По путям графа можно также определить и минимальные сечения. Чтобы составить структурную схему (граф сети), необходимо предварительно *преобразовать схему электрической сети в расчетную схему надежности*, т. е. схему функционирования сети. Последовательно соединенные элементы между двумя узлами целесообразно заменить одним эквивалентным, параметры которого определяются по известным формулам. Аналогичный прием применяется для элементов, параллельно включенных между двумя узлами.

После этого элементам расчетной схемы ставятся в соответствие *ребра графа*, а пунктам физического соединения (СШ, трехобмоточным трансформаторам, местам подключения ответвлений к магистральным линиям) - *вершины графа*. Надежность пунктов физического соединения элементов и коммутационной аппаратуры может учитываться введением в расчетную схему элементов соответственно логике функционирования их в электрической системе. Кроме указанных вершин в графе сети будет еще одна особая вершина - вершина источников, иногда называемая вершиной «истока». ИП, если вероятность его безотказной работы отличается от 1, вводится РЭ надежности. Все свободные концы ребер элементов таких ИП объединяются в вершину - «исток».

Обычно граф сети с учетом возможных направлений потоков мощности в элементах является *частично-ориентированным*. Направленность графа сети относительно разных узлов нагрузки может быть различной. Поэтому для оценки надежности системы относительно различных узлов нагрузки следует каждый раз проверять ориентировку ребер исходного графа. Построение и составление исходной схемы в виде графа дает возможность упростить процесс исследования надежности системы алгебраической методикой вычисления.

В качестве аналитического образа графа используется матрица *непосредственных путей*, которая строится следующим образом.

1 Нумеруются вершины исходного графа. Для удобства расчетов нумерацию рекомендуется начинать с вершины источников. Порядок матрицы равен числу вершин в исходном графе.

2 Строки и столбцы матрицы обозначаются номерами вершин графа.

3 Элементу, принадлежащему i -ой строке j -му столбцу матрицы A , присваивается некоторое число (единица или значение вероятности надежной работы элемента) если из вершины i к вершине j имеется непосредственный путь; если пути нет - ставится нуль.

Если указанному элементу присваивается значение 1, то такую матрицу называют *матрицей смежности*. В случае расчета надежности схем очень сложной конфигурации для уменьшения порядка матрицы путей целесообразно разделить схему на несколько частей.

Используя матрицу непосредственных путей A в качестве аналитического образа расчетной схемы по надежности, можно определить минимальные пути и минимальные сечения в сложной схеме. Существует несколько методов определения минимальных путей и соответственно минимальных сечений, которые достаточно подробно описаны [16].

После определения минимальных путей и сечений исходная сложная расчетная схема по надежности заменяется эквивалентной относительно узла, последовательно-параллельной - в случае путей или параллельно-последовательной - в случае сечений.

Такая замена дает возможность использовать известные приемы расчета, в частности применить формулы для суммы вероятностей совместных событий - безотказной работы путей или событий отказа сечений. Но следует иметь в виду, что пути и сечения в общем случае являются зависимыми, так как

в них могут входить одни и те же элементы. Эту зависимость необходимо учитывать при определении вероятности надежной работы нескольких путей или вероятности отказа нескольких сечений в формуле для суммы вероятности совместимых событий при условии, что каждый путь может пропустить всю необходимую мощность в узел нагрузки.

При определении каждой последующей условной вероятности следует учитывать вероятность безотказной работы (отказа) только тех элементов, которые еще не входили в предыдущие пути (сечения). [5]

Конечный результат - вычисление вероятности отказа системы относительно интересующего нас узла нагрузки или вероятность безотказной работы при представлении схемы в виде минимальных сечений - достигается быстрее и проще, чем методом минимальных путей, однако процесс определения сечений сам по себе более трудоемкий.

На существующем этапе развития и применения этих методов в электроэнергетике нецелесообразно противопоставлять один метод другому, т. к. для схем с протяженной структурой и малым числом поперечных связей определенные преимущества будет иметь метод путей, а для схем с концентрированной структурой и большим числом поперечных связей предпочтителен метод сечений.

Методы расчета показателей надежности сложных схем с использованием минимальных путей и сечений достаточно просто позволяют учесть преднамеренное отключение элементов. Так, при представлении исходной схемы в виде минимальных путей вероятность отказа $Q_{\text{сп}}$ схемы относительно n -го узла нагрузки складывается из суммы вероятностей двух гипотез: отказов всех путей $Q(\sum_{i=1}^k P_i)$ и наложения на преднамеренное отключение i -го элемента отказа оставшейся части схемы $Q_n(\sum_{i=1}^{k-r_i} P_i)$.

Предполагаем, что преднамеренные отключения отдельных элементов не совмещаются:

$$Q_{\text{сн}} = Q\left(\sum_{i=1}^k \Pi_i\right) + Q_{\text{п}}\left(\sum_{i=1}^{k-r_i} \Pi_i\right), \quad (4.21)$$

где $Q(\sum_{i=1}^k \Pi_i) = 1 - P(\sum_{i=1}^k \Pi_i)$, (4.22)

$$Q_{\text{п}}(\sum_{i=1}^{k-r_i} \Pi_i) = \sum_{i=1}^m k_{\text{п},i} q_{\text{п},i} Q(\sum_{i=1}^{k-r_i} \Pi_i), \quad (4.23)$$

$P = (\sum_{i=1}^k \Pi_i)$ - вероятность работы всех путей схемы, определяется по формуле для суммы вероятностей совместимых событий (4.80);

$Q_{\text{п} i}$ - вероятность преднамеренного отключения i -го элемента схемы;

r_i - число путей, в которых содержится i -й элемент схемы;

$(k - r_i)$ - число путей, оставшихся после исключения i -го элемента из схемы;

$k_{\text{п} i} < 1$ - коэффициент, учитывающий уменьшение вероятности отказов вследствие того, что возможно наложение аварии оставшейся части схемы на преднамеренное отключение i -го элемента, а не наоборот;

m - число элементов в сложной схеме.

$$\begin{aligned} Q_{\text{сн}} &= Q\left(\sum_{i=1}^{k-r_i} C_i\right) + \sum_{i=1}^m k_{\text{п},i} q_{\text{п},i} Q\left(\sum_{j=1}^{k-r_i} C_j\right) \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^k Q(C_i) + \sum_{i=1}^m k_{\text{п},i} q_{\text{п},i} \sum_{j=1}^{k-r_i} Q(C_j), \end{aligned} \quad (4.24)$$

где $(k - r_i)$ - число сечений, оставшихся в схеме после исключения i -го элемента.

В оставшейся после исключения i -го элемента части схемы минимальные сечения получаются из сечений исходной полной схемы после исключения образовавшихся неминимальных сечений. Аналогичные приемы можно использовать для расчета надежности тех сложных схем, в которых возможны совмещения преднамеренных отключений различных элементов. В этом случае рассматриваются гипотезы наложения аварий на преднамеренные отключения двух и более элементов оставшихся частей схемы и гипотезы отказа схемы без учета преднамеренных отключений элементов.

Методы расчета показателей надежности сложных схем с использованием минимальных путей и сечений достаточно просто позволяют учесть преднамеренное отключение элементов.

Метод кратчайших путей и минимальных сечений нашел применение для оценки надежности сложных физических систем с несколькими тысячами элементов, в том числе и для энергосистем. Метод позволяет учитывать поперечные связи в схемах электрических соединений.

Глава 5 Законы распределения случайных величин в задачах надежности электроснабжения

Для решения теоретических и практических задач надёжности производственных ЭС и их элементов надо знать законы распределения их отказов. Они получаются посредством обобщения статического материала об отказах. [12]

Примем случайную величину (СВ) "Т" за время безотказной работы. За время эксплуатации восстанавливаемых элементов ЭС - «t» величина "Т" принимает "n" значений. Совокупность этих случайных значений величины - статическая выборка объёма "n". Если значения СВ "Т" расположить в возрастающем (убывающем) порядке и указать относительно каждого как часто оно встречается, то имеем распределение СВ или вариационный ряд, на основании которого определяем аналитическую форму неизвестной плотности вероятности $f(t) = \varphi(t)$ или функцию распределения $F(t)$.

Большое значение имеет графический метод изображения вариационного ряда:

- *Полигон распределения* (многоугольник): по оси абсцисс откладываем интервалы значений СВ, в их серединах строим ординаты, пропорциональные частотам и концы ординат соединяем.

- *Гистограмма распределения*: над каждым отрезком оси абсцисс, изображающем интервал значений СВ, строится прямоугольник, высота которого пропорциональна частотам интервала.

При уменьшении длины каждого интервала гистограмма приближается к некоторой плавной кривой, соответствующей плотности распределения величины. Таким образом, при построении гистограммы получаем представление о дифференциальном законе распределения СВ "Т".

- Статическая функция распределения $F^*(t)$ - частота событий $T < t$ в данной выборке:

$$F^*(t) = p^*(T < t), \quad (5.1)$$

где t - текущая переменная:

p^* - частота или статическая вероятность события.

$$F^*(t_i) = n_i/n, \quad (5.2)$$

где n_i - число отказов, при которых $T < t$;

n - число наблюдений.

Если T - непрерывная величина, то при увеличении "n" (объема выборки) $F^*(t)$ - интегральная функция распределения величины T .

Таким образом, построение статической функции распределения $F^*(t)$ решает вопрос об установлении на основе экспериментальных данных закона распределения СВ. Но использование $F^*(t)$ неудобно, так как экспериментальные точки гистограммы колеблются около неизвестной кривой истинного распределения.

Для выяснения теоретического закона распределения СВ заданного $F(t)$ или $f(t) = \varphi(t)$ производится обработка статических данных. Выбирается аппроксимирующая функция $f(t) = \varphi(t)$, которая согласуется с данными эксперимента $f_0(t) = f(t)$. Для оценки правдоподобия этого приближённого вероятностного равенства разработано несколько критериев согласия проверяемых гипотез относительно вида функции (аппроксимирующей и данных эксперимента) $f_0(t)$ и $f(t)$.

Итак, закономерности СВ описываются с помощью интегральной функции распределения вероятностей для дискретных и непрерывных СВ. Кроме того, для описания распределения вероятностей непрерывных СВ применяется дифференциальная функция распределения вероятностей или дифференциальный закон распределения СВ.

При анализе надежности преимущественно находят применение законы распределения, которые определяются с помощью небольшого количества числовых характеристик. Так, например, показательный (экспоненциальный) закон распределения определяется лишь одним параметром - математическим ожиданием случайной величины. Нормальный закон распределения характеризуется двумя параметрами математическим ожиданием случайной величины и дисперсией.

Настоящий раздел составлен по материалам литературы [3, 6, 7, 10]. Там же можно ознакомиться с доказательствами основных положений и выводов, а также расширить знания по интересующему вопросу.

5.1 Биномиальное распределение

В системах ЭСН для нормального функционирования, повышения надежности эксплуатации и создания оптимального резерва стремятся по возможности использовать *однотипное оборудование* (выключатели, трансформаторы, привода и т. п.). Это оборудование может находиться в исключаящем друг друга состояниях (исправно или неисправно, включено или выключено и т. д.).

Произведем n независимых опытов, в каждом из которых может появиться или не появиться некоторое событие A (например, выключатель включен). Вероятность появления события A в каждом опыте равна p , а вероятность не появления $q = 1 - p$. Требуется найти вероятность p_n^m того, что событие A в этих n опытах появится ровно m раз. [5]

Рассмотрим сложное событие B_m , состоящее в том, что событие A появится в n опытах ровно m раз. Это событие может осуществиться различными способами. Представим событие B_m как сумму произведений событий, состоящих в появлении или не появлении события A в отдельном опыте.

Будем обозначать A_i появление события A в i -ом опыте; \bar{A}_i - непоявление события A в i -ом опыте.

Очевидно, каждый вариант появления события B_m (каждый член суммы) должен состоять из m появлений события A и $n-m$ непоявлений, т. е. из m событий A и $n-m$ событий \bar{A} с различными индексами:

$$B_m = A_1 A_2 \dots A_m \bar{A}_{m+1} \dots \bar{A}_n + \dots + A_1 \bar{A}_2 A_3 \dots \dots \bar{A}_{n-1} A_n + \dots + \bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{n-m} A_{n-m+1} \dots A_n, \quad (5.3)$$

Причем в этом выражении в каждое произведение событие A должно входить m раз, а \bar{A} должно входить $n-m$ раз.

Число всех комбинаций такого рода равно C_n^m , т. е. числу способов, какими можно из n опытов выбрать m , в которых произошло событие A . Вероятность каждой такой комбинации, по теореме умножения для независимых событий, равна $p^m q^{n-m}$. Так как комбинации между собой несовместны, то, по теореме сложения, вероятность сложного события B_m будет равна:

$$P_n^m = p^m q^{n-m} + \dots + p^m q^{n-m} = C_n^m p^m q^{n-m}. \quad (5.4)$$

где C_n^m - число слагаемых вида $p^m q^{n-m}$, равное числу комбинации.

Таким образом, если производится n независимых опытов, в каждом из которых событие A появится с вероятностью p , то вероятность того, что событие A появится ровно m раз выражается формулой:

$$P_n^m = C_n^m p^m q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} \quad (5.5)$$

Формула (5.5) является аналитическим выражением биномиального закона распределения и носит название формулы Бернулли.

При биномиальном распределении начальный момент первого порядка обозначается математическим ожиданием: $m_1 = np$. Центральный момент второго порядка - дисперсия: $\mu_2 = D = npq$.

Выделим некоторые частные вероятности, облегчающие решение практических задач:

- вероятность того, что все элементы выключены (повреждены):

$$P_n^0 = P_n(m = 0) = C_n^0 p^0 q^{n-0} = q^n, \quad (5.6)$$

- вероятность того, что в рассматриваемой группе работают от m_1 до m_2 элементов:

$$P_n(m_1 \leq m \leq m_2) = \sum_{m=m_1}^{m=m_2} C_n^m p^m q^{n-m}. \quad (5.7)$$

5.2 Распределение Пуассона

Это распределение также как и биномиальное описывает характеристики дискретных СВ. [5]

Рассмотрим дискретную СВ X , которая может принимать только целые, неотрицательные значения: 0, 1, 2, ..., m , причем последовательность этих значений теоретически не ограничена.

СВ X распределена по закону Пуассона, если вероятность того, что она примет определенное значение m , выражается формулой:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (5.8)$$

где a - некоторая положительная величина, называемая параметром закона Пуассона.

Последовательность вероятностей, задаваемая формулой (5.8), представляет собой ряд распределения, т. е. сумма всех вероятностей P_m равна единице и имеет вид:

X_m	0	1	2	...	m	...
P_m	e^{-a}	$\frac{a}{1!} e^{-a}$	$\frac{a^2}{2!} e^{-a}$...	$\frac{a^m}{m!} e^{-a}$...

Зададим параметру a некоторые численные значения и определим вероятности P_m для различных значений m по формуле (5.8). В результате этих действий получим данные рядов распределения. На их основе построены многоугольники распределения СВ X , распределенной по закону Пуассона (рисунок 5.1).

Из рисунка 5.1 видно, что в зависимости от параметра a многоугольники распределения имеют существенные различия и по форме похожи на другие известные законы распределения СВ.

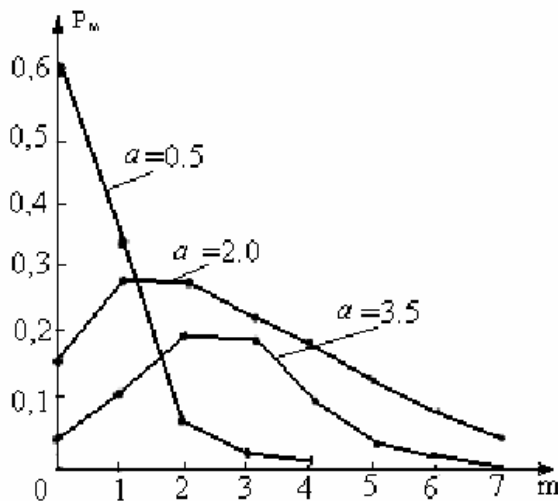


Рисунок 5.1 - Многоугольники распределения

Одной из основных числовых характеристик СВ X , распределенной по закону Пуассона, является математическое ожидание:

$$m_x = M[X] = \sum_{m=0}^{\infty} m P_m = \sum_{m=0}^{\infty} m \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (5.9)$$

После некоторых преобразований [3] получим: $m_x = a$. Таким образом, параметр a представляет собой не что иное, как математическое ожидание СВ X .

Другая числовая характеристика – дисперсия, которая тоже равна параметру a , т. е. $D_x = a$.

Таким образом, дисперсия случайной величины, распределенной по закону Пуассона, равна ее математическому ожиданию a :

$$m_x = D_x = a \quad (5.10)$$

Это свойство распределения Пуассона часто применяется на практике для решения вопроса, правдоподобна ли гипотеза о том, что СВ X распределена по закону Пуассона. Для этого определяют из опыта статистические характеристики – математическое ожидание и дисперсию. Если их значения близки, то это может служить основанием в пользу гипотезы о пуассоновском распределении.

В задачах энергетики наибольший интерес представляют потоки события, распределение которых описывается законом Пуассона.

Под **потоком событий** понимается последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то моменты времени. Примерами могут служить: поток вызовов на телефонной станции; поток включений приборов в бытовой электросети; поток сбоев электронной вычислительной машины; потоки отказов энергетических объектов

(выключателей, разъединителей, трансформаторов и др.) в достаточно большой системе и т. п.

События, образующие поток, в общем случае могут быть различными, но мы будем рассматривать лишь поток *однородных событий*, различающихся только моментами появления. Такой поток можно изобразить как последовательность точек t_1, t_2, \dots, t_k на числовой оси (рисунок 5.2).

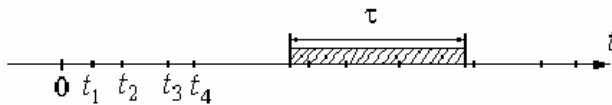


Рисунок 5.2 - Представление потока событий

Рассмотрим на оси 0_t простейший поток событий как неограниченную последовательность случайных точек (см. рисунок 5.2). Выделим произвольный участок времени длиной τ . Доказано [3], что при условиях стационарности, отсутствия последствия и ординарности потока событий, число точек, попадающих на участок τ , распределено по закону Пуассона с математическим ожиданием:

$$a = \lambda\tau, \quad (5.11)$$

где λ - плотность потока (среднее число событий, приходящееся на единицу времени).

Вероятность того, что за время τ произойдет ровно m событий, будет равна:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau} \quad (5.12)$$

Вероятность того, что участок окажется пустым (не произойдет ни одного события):

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau} \quad (5.13)$$

Вероятность появления хотя бы одного события:

$$P_{m \geq 1}(\tau) = P_1 + P_2 + \dots + P_\infty = \sum_{m=1}^{\infty} P_m = 1 - P_{(m=0)} \quad (5.14)$$

Вероятность того, что в интервале времени τ произойдет не менее k событий:

$$\begin{aligned} P_{m \geq k}(\tau) &= P_k + P_{k+1} + P_{k+2} + \dots = \\ &= \sum_{m=k}^{\infty} P_m = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} P_m. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Важным свойством закона Пуассона является то, что он является предельным для биномиального распределения:

$$P_n^m = C_n^m P^m (1-P)^{n-m}, \quad (5.16)$$

если одновременно устремлять число опытов n к бесконечности, а вероятность P — к нулю, причем их произведение np сохраняет постоянное значение:

$$np = a \quad (5.17)$$

Это предельное свойство биномиального распределения можно записать в виде:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C_n^m P^m (1-P)^{n-m} = \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (5.18)$$

Предельное свойство биномиального закона часто находит применение на практике. Допустим, что производится

большое количество независимых опытов n , в каждом из которых событие A имеет очень малую вероятность P . Тогда для вычисления вероятности P_n^m того, что событие A появится равно m раз, можно воспользоваться приближенной формулой:

$$P_n^m \approx \frac{(np)^m}{m!} e^{-np}, \quad (5.19)$$

где $np = a$ - параметр закона Пуассона, которым приближенно заменяется биномиальное распределение.

От этого свойства закона Пуассона - выражать биномиальное распределение при большом числе опытов и малой вероятности события - происходит его название, часто применяемое в учебниках статистики: **закон редких явлений**.

Уместно заметить, что если при биномиальном распределении вероятностей $(p + q)^n$, величины p и q не сильно отличаются друг от друга (не более чем на 2 порядка), например, $p = 0,1$ и $q = 0,9$ или $p = 0,5$ и $q = 0,5$, то при увеличении числа опытов $n \rightarrow \infty$ асимптотой биномиального распределения будет нормальный закон распределения.

Если же p и q резко отличаются, т. е. $p \rightarrow 0$ или $q \rightarrow 0$, то при $n \rightarrow \infty$ асимптотой биномиального распределения будет закон Пуассона (закон редких явлений).

Таким образом, биномиальное распределение сводится в пределе к двум - нормальному и пуассоновскому.

5.3 Экспоненциальное (показательное) распределение

Показательным (экспоненциальным) называют распределение вероятностей непрерывной СВ T , которое описывается плотностью [5]:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ \lambda e^{-\lambda t} & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (5.20)$$

где λ - постоянная положительная величина.

В определенных случаях принимают $\lambda = \lambda(t) = \text{const}$, это можно делать когда:

- есть оборудование, у которого контроль перед вводом в эксплуатацию отсеивает почти все дефектные элементы;
- есть элементы, которые практически не стареют;
- у большинства элементов имеется длительный период, на котором интенсивность отказов практически постоянна.

Из выражения (5.20) видно, что показательное распределение определяется одним параметром λ . Эта особенность показательного распределения указывает на его преимущество по сравнению с распределениями, зависящими от большего числа параметров.

Графики плотности и функции распределения показательного закона показаны на рисунке 5.3.

Найдем вероятность попадания в интервал (a, b) непрерывной СВ T . Эта вероятность есть приращение функции распределения непрерывной СВ T на заданном интервале (см. рисунок 5.4).

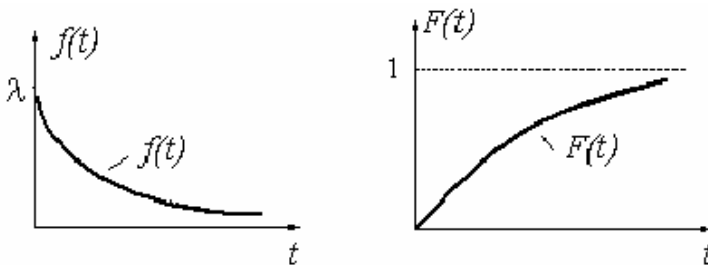


Рисунок 5.3 - Графики плотности $f(t)$ и функции распределения $F(t)$ показательного закона

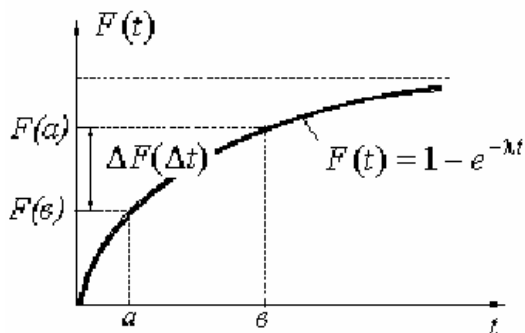


Рисунок 5.4 - Приращение функции распределения в интервале (a, b)

Учитывая, что: $F(a) = 1 - e^{-\lambda a}$, $F(b) = 1 - e^{-\lambda b}$.

Получим:

$$P(a < T < b) = e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b}. \quad (5.21)$$

Числовые характеристики показательного распределения следующие:

- математическое ожидание:

$$m_t = M(T) = 1/\lambda \quad (5.22)$$

- дисперсия величины T :

$$D(T) = 1/\lambda^2 \quad (5.23)$$

- среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_t = \sqrt{D(T)} = 1/\lambda \quad (5.24)$$

- среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа):

$$T_{cp} = 1/\lambda. \quad (5.25)$$

Показательное распределение широко применяется на практике, в частности в теории надежности, одним из основных понятий которой являются функция надежности и функция ненадежности.

Вероятность безотказной работы за время длительностью t будет равна:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t). \quad (5.26)$$

Функцию $R(t)$, определяющую вероятность безотказной работы элемента за время длительностью t называют **функцией надежности**.

Функция распределения $F(t) = P(T < t)$ определяет вероятность отказа за время длительностью t и называется **функцией ненадежности**.

На практике длительность времени безотказной работы элемента часто имеет показательное распределение с функцией распределения:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (5.27)$$

Поэтому, согласно выражению (5.26), функция надежности в случае показательного распределения времени безотказной работы элемента будет иметь вид:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (5.28)$$

Функцию надежности, определяемую равенством (5.28), называют **показательным законом надежности**. Основное свойство этого закона состоит в том, что вероятность безотказной работы не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от рассматриваемого интервала времени. Это значит, что будущее поведение объекта не зависит от прошлого, если в настоящий момент он работоспособен.

Графики, характеризующие вероятность отказа $Q(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$, представлены на рисунке 5.5.

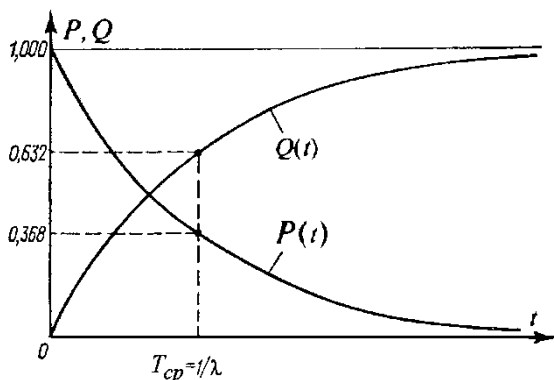


Рисунок 5.5 – Вероятность отказа $Q(t)$ и безотказной работы $P(t)$ при экспоненциальном законе распределения

5.4 Закон равномерного распределения вероятностей

В задачах практики встречаются непрерывные СВ, о которых заранее известно, что их возможные значения лежат в пределах некоторого определенного интервала. Кроме того известно, что в пределах этого интервала все значения СВ обладают одной и той же плотностью вероятности. О таких случайных величинах говорят, что они распределяются по **закону равной вероятности** или **закону равномерной плотности**. [5]

Приведем пример случайной величины, распределенной с равномерной вероятностью.

Поезда метрополитена идут с интервалом 2 мин. Пассажир выходит на платформу в некоторый момент времени. Время T , в течение которого ему придется ждать

поезда, представляет собой СВ, распределенную с равномерной плотностью на участке $(0, 2)$ минут.

Рассмотрим СВ X , подчиненную закону равномерной плотности на участке от a до b (см. рисунок 5.6). Плотность этой величины $f(x)$ постоянна и равна c на отрезке (a, b) ; вне этого отрезка она равна нулю:

$$f(x) = \begin{cases} c & \text{при } a < x < b, \\ 0 & \text{при } a > x > b. \end{cases} \quad (5.29)$$

Так как площадь, ограниченная кривой распределения, равна единице: $c(b-a)=1$. Отсюда получаем: $c=1/(b-a)$.

Поэтому плотность распределения $f(x)$ примет вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a < x < b, \\ 0 & \text{при } a > x > b. \end{cases} \quad (5.30)$$

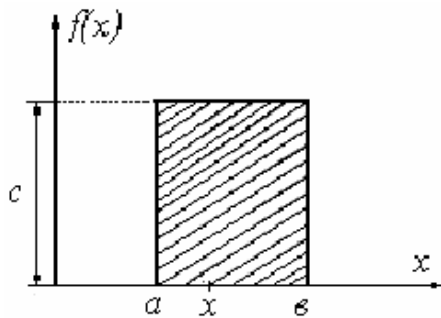


Рисунок 5.6 - График равномерной плотности распределения

Эта формула и выражает закон **равномерного распределения вероятностей (закон равномерной плотности)** на участке (a, b) .

Напишем выражение для функции распределения $F(x)$, которая выражается площадью, ограниченной кривой распределения и осью абсциссы, лежащей левее точки x (рисунок 5.6):

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a < x < b, \\ 1 & \text{при } x > b. \end{cases} \quad (5.31)$$

График функции распределения $F(x)$ приведен на рисунке 5.7.

Основные числовые характеристики СВ X на участке от a до b :

- математическое ожидание величины X :

$$m_x = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{a+b}{2}, \quad (5.32)$$

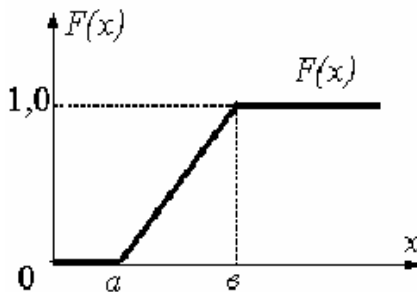


Рисунок 5.7 - Функция распределения

- дисперсия величины X :

$$D_x = \mu_2 = \frac{1}{b-a} \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx = \frac{b-a}{12}, \quad (5.33)$$

- среднее квадратическое отклонение:

$$\delta_x = \sqrt{D_x} = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}. \quad (5.34)$$

Найдем вероятность попадания СВ X распределенной по закону равномерной плотности, на участок (x_1, x_2) , представляющий собой часть участка (a, b) (рисунок 5.8).

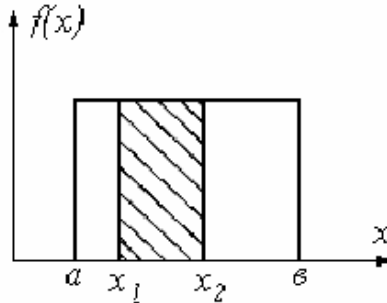


Рисунок 5.8 - Вероятность попадания величины X на участок (x_1, x_2)

Геометрически, как это видно из рисунка 5.8, вероятность представляет собой заштрихованную площадь и равна:

$$P(x_1 < X < x_2) = \frac{x_2 - x_1}{b - a}. \quad (5.35)$$

5.5 Нормальное распределение (распределение Гаусса)

Нормальное распределение (распределение Гаусса) используется при оценке надежности изделий, на которые воздействует ряд случайных факторов, каждый из которых незначительно влияет на результирующий эффект (нет доминирующих факторов). Доказывается [3], что сумма достаточно большого числа независимых (или слабо

зависимых) СВ, подчиненных каким угодно законам распределения (при соблюдении некоторых нежестких ограничений), приближенно подчиняется нормальному закону, и это выполняется тем точнее, чем большее количество СВ суммируется. Основное ограничение, налагаемое на суммируемые СВ, состоит в том, чтобы они все равномерно играли в общей сумме относительно малую роль. Если это условие не выполняется и, например, одна из СВ окажется по своему влиянию на сумму резко преобладающей над всеми другими, то закон распределения этой преобладающей СВ наложит свое влияние на сумму и определит в основных чертах ее закон распределения.

Нормальный закон распределения характеризуется частотой отказов $a(t)$ или плотностью вероятности отказов $f(t)$ вида:

$$a(t) = f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5.36)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение СВ x ;

m_x – математическое ожидание СВ x . Этот параметр часто называют центром рассеивания или наиболее вероятным значением СВ X .

x – случайная величина, за которую можно принять время, значение тока, значение электрического напряжения и других аргументов.

Нормальный закон – это двухпараметрический закон, для записи которого нужно знать m_x и σ .

Вероятность безотказной работы при данном законе распределения определяется по формуле:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(t - m_x)^2}{2\sigma^2}\right] dt. \quad (5.37)$$

Интенсивность отказов можно определить по следующей формуле:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \quad (5.38)$$

Кривая распределения по нормальному закону имеет симметричный холмообразный вид (рисунок 5.9).

Выясним, как влияет на форму и расположение нормальной кривой значения параметров m и σ . Из формулы (5.36) видно, что центром симметрии распределения является центр рассеивания m . Это ясно из того, что при изменении знака разности $(x - m)$ на обратный результат в выражении (5.36) не меняется. Если изменять центр рассеивания m , кривая распределения будет смещаться вдоль оси абсцисс, не изменяя своей формы (рисунок 5.10).

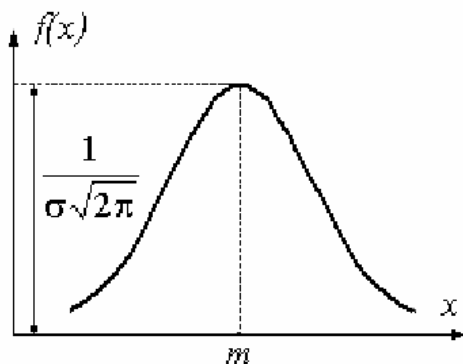


Рисунок 5.9 – Кривая распределения нормального закона

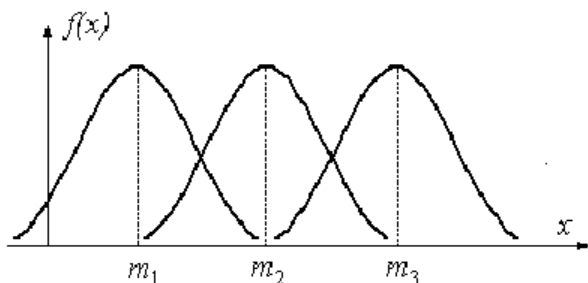


Рисунок 5.10 - Смещение кривой нормального распределения с изменением m

Размерность центра рассеивания - та же, что и размерность случайной величины X .

Параметр σ (среднее квадратическое отклонение) характеризует не положение, а саму форму кривой распределения. С увеличением σ кривая растягивается и становится более плоской, с уменьшением σ она вытягивается вверх и сжимается. Это объясняется тем, что площадь под кривой распределения всегда остается равной единице, несмотря на изменение максимума плотности вероятности. На рисунке 5.11 показаны три нормальные кривые при различных σ .

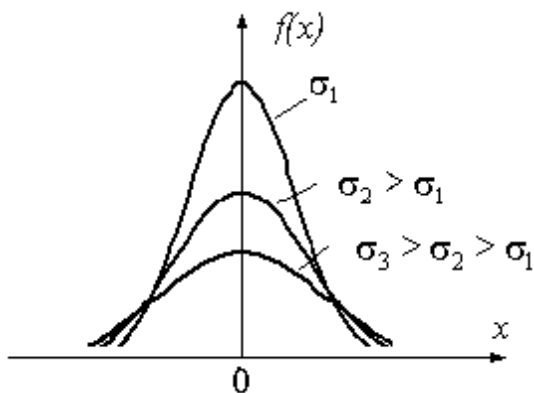


Рисунок 5.11 – Изменение формы кривой распределения с изменением σ

Размерность параметра σ совпадает с размерностью СВ X . Во многих задачах практики приходится определять вероятность попадания СВ X , подчиненной нормальному закону с произвольными параметрами m и σ на участок от α до β . Для вычисления этой вероятности используют общую формулу:

$$P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha), \quad (5.39)$$

где $F(x)$ – функция распределения величины X .

С помощью математических преобразований получаем, что:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - m}{\sigma}\right), \quad (5.40)$$

где Φ - интеграл вероятностей, который рассчитывается следующим образом:

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (5.41)$$

Принято называть функцию $\Phi(x)$ также **нормальной (нормированной) функцией распределения** или **стандартной функцией распределения**.

Согласно формуле (5.39) выразим вероятность попадания СВ X на участок от α до β :

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right). \quad (5.42)$$

Таким образом, получили вероятность попадания на интересующий нас участок СВ X , распределенной по нормальному закону с любыми параметрами, через

стандартную функцию распределения $\Phi(x)$, которая соответствует простейшему нормальному закону с параметрами $m = 0$ и $\sigma = 1$.

Заметим, что аргументы функции $\Phi(x)$ в формуле (5.42) имеют очень простой смысл: $\frac{\beta-m}{\sigma}$ есть расстояние от правого конца участка до центра рассеивания, выраженное в средних квадратических отклонениях; $\frac{\alpha-m}{\sigma}$ – такое же расстояние до левого конца участка α , причем это расстояние считается положительным, если конец расположен справа от центра рассеивания, и отрицательным, если слева.

5.6 Распределение Вейбулла

Это распределение чаще всего используется для исследования интенсивности отказов для периодов приработки и старения. [5]

Надежность наиболее распространенных элементов электрических сетей, таких, как силовые трансформаторы, КЛ, в значительной степени определяется надежностью работы изоляции, «прочность» которой изменяется в течение эксплуатации. Прочность изоляции в зависимости от условий эксплуатации и вида изделия определяется механической прочностью, эластичностью, исключающей возможности образования остаточных деформаций, трещин, расслоений под воздействием механических нагрузок, т. е. неоднородностей.

Однородность и монолитность структуры изоляции и ее высокая теплопроводность исключают возникновение повышенных местных нагревов, неизбежно приводящих к увеличению степени неоднородности электрической прочности. Разрушение изоляции при функционировании элемента происходит в основном в результате нагревания токами нагрузок и температурных воздействий внешней среды. Механические нагрузки (вибрации, деформации, удары и др.) также приводят к разрушению изоляции.

Среди перечисленных факторов, определяющих срок службы изоляции указанных элементов электрических сетей, одним из основных факторов, является *тепловое старение*. На основании экспериментальных исследований было получено известное «восьмиградусное» правило, согласно которому повышение температуры изоляции, выполненной на органической основе, на каждые восемь градусов в среднем вдвое сокращается срок службы изоляции. В настоящее время в зависимости от класса применяемой изоляции используются шести-, восьми-, десяти- и двенадцатиградусные правила.

Срок службы изоляции в зависимости от температуры нагревания:

$$T_n = A e^{-\gamma \zeta}, \quad (5.43)$$

где A - срок службы изоляции при $\zeta = 0$ - некоторая условная величина;

γ - коэффициент, характеризующий степень старения изоляции в зависимости от класса;

ζ - температура перегрева изоляции.

Другим важным фактором, вызывающим интенсивное старение изоляции, является *механическая нагрузка*, обусловленная электрическими процессами при резких изменениях тока, например при резкопеременной нагрузке силового трансформатора, набросах и сбросах нагрузки, сквозных токах КЗ. Механические характеристики прочности изоляции также зависят от температуры. Предел механической прочности изоляции быстро снижается по мере ее нагревания, но в то же время она становится более эластичной.

При воздействии переменных неблагоприятных условий неоднородности материала увеличиваются, например микротрещина распространяется в глубь изоляции и при случайном повышении напряжения может вызвать пробой изоляции. Причиной отказа может быть даже небольшая неоднородность материала.

Число неблагоприятных воздействий (тепловых или электромеханических), вызывающих пробой изоляции, есть функция, убывающая в зависимости от размеров неоднородности. Это число минимально для наибольшей по размерам неоднородности (трещины, расслоения и др.). Т.о., число неблагоприятных воздействий, или срок службы изоляции, должно подчиняться закону распределения минимального числа из числа независимых СВ - чисел неблагоприятных воздействий, соответствующих различным по размерам неоднородностям, т. е. если $T_{и}$ - время безотказной работы всей изоляции, а $T_{иi}$ - время безотказной работы i -го участка ($i = 1, 2, \dots, n$), то:

$$T_{и} = \min(T_{и1}, T_{и2}, \dots, T_{ин}). \quad (5.44)$$

Таким образом, для определения закона распределения времени безотказной работы такого объекта, как изоляция элемента электрической сети, необходимо найти вероятность распределения минимальных времен безотказной работы совокупности всех участков. Причем наибольший интерес представляет случай, когда законы распределения времени безотказной работы отдельных участков имеют произвольный характер, но вид законов распределения одинаков, т. е. резковыраженных отличающихся участков нет.

В смысле надежности участки такой системы соответствуют последовательному соединению. Поэтому функция распределения времени безотказной работы такой системы:

$$q_c(t) = 1 - [1 - q(t)]^n. \quad (5.45)$$

Далее математическими преобразованиями выводится формула, при которой основным параметром является «порог чувствительности», т. е. элемент гарантированно не откажет в интервале времени $(0, t_0)$ (в частном случае $t_0 = 0$). Если распределение не имеет порога чувствительности t_0 , то закон распределения называется **распределением Вейбулла**:

$$q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0. \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (5.46)$$

где $c > 0$ – некоторый постоянный коэффициент;
 α – параметра распределения.

Этот закон распределения довольно часто используется при аппроксимации распределения времени безотказной работы систем с конечным числом последовательно (в смысле надежности) соединенных элементов (длинные КЛ со значительным числом муфт и др.).

Плотность распределения:

$$f(t) = \begin{cases} \alpha c t^{\alpha-1} e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0. \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (5.47)$$

При $\alpha = 1$ плотность распределения превращается в обычную показательную функцию (см. рисунок 5.12).

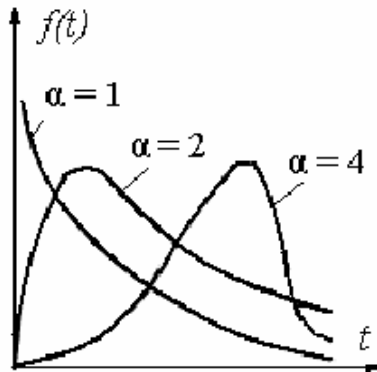


Рисунок 5.12 - Дифференциальная функция распределения времени безотказной работы изоляции по закону Вейбулла

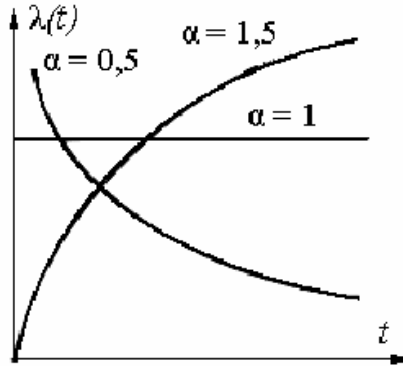


Рисунок 5.13 - Интенсивность отказов при распределении по закону Вейбулла

Интенсивность отказов при распределении плотности по закону Вейбулла (см. рисунок 5.13):

$$\lambda(t) = \alpha t^{\alpha-1}. \quad (5.48)$$

Интенсивность отказов для этого закона в зависимости от параметра распределения может расти, оставаться постоянной (показательный закон) и уменьшаться.

Как видно из рисунков 5.12 и 5.13 экспоненциальный закон распределения является частным случаем закона Вейбулла при $\alpha = 1$ ($\lambda = \text{const}$). При $\alpha = 2$ функция распределения времени безотказной работы совпадает с законом Рэлея, при $\alpha \gg 1$ достаточно хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения в окрестности среднего времени безотказной работы.

При соответствующем подборе параметра α можно с помощью закона Вейбулла описывать надежность и стареющих элементов (период старения и износа), у которых $\lambda(t)$ возрастает, и надежность элементов, имеющих скрытые дефекты (период приработки), у которых $\lambda(t)$ убывает с течением времени.

Математическое ожидание (среднее время) безотказной работы и дисперсия при распределении по закону Вейбулла:

$$T_{и.ср} = \Gamma(1+1/\alpha)c^{-1/\alpha}, \quad (5.49)$$

$$D(T_{и}) = c^{-2/\alpha} [\Gamma(1+2/\alpha) - \Gamma^2(1+1/\alpha)]. \quad (5.50)$$

где $\Gamma(x)$ - гамма-функция [5].

Глава 6 Повышение надежности систем электроснабжения

6.1 Влияние качества электроэнергии на надежность систем электроснабжения

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

В нормальном режиме работы системы ЭСН показатели качества электроэнергии (ПКЭ) не должны выходить за пределы допустимых значений, которые приведены в ГОСТ 13109-98. [8]

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

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

- изменение режимов работы приемников электроэнергии;
- изменение режима работы ИП;
- нерациональное подключение однофазных и ударных нагрузок к элементам системы ЭСН.

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

Существенное влияние оказывают отклонения напряжения на надежность работы асинхронных двигателей

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

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

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

Практический интерес представляет зависимость потребляемой двигателем активной и реактивной мощности от напряжения на его зажимах. При отклонениях напряжения $\pm 10\%$ активная мощность на валу двигателя меняется незначительно. В то же время потери активной и реактивной мощностей в двигателе колеблются в значительных пределах. Изменения потерь активной мощности в АД соизмеримы с потерями в цеховой электрической сети и оказывают при этом заметное влияние на электропотребление.

Непостоянство активной и реактивной мощностей и напряжения вызывает изменение тока двигателя. При полной нагрузке двигателя и отклонении напряжения на + 10 % его ток незначительно отличается от $I_{ном}$. При отклонении же напряжения на —10 % от $U_{ном}$ ток двигателя увеличивается на 10 %. Поэтому с точки зрения нагрева более опасными являются отрицательные отклонения напряжения. [8]

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

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

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

в 5 % располагаемая мощность АД уменьшается на 5 - 10 %.
[8]

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

Несимметрия напряжения не оказывает заметного влияния на работу КЛ и ВЛ, однако у трансформаторов наблюдается значительное сокращение срока службы.

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

Несинусоидальные режимы, обусловленные протеканием токов высших гармоник по элементам системы ЭСН промышленного предприятия, вызывают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Наибольшие потери имеют место в трансформаторах, двигателях и генераторах. При наличии высших гармоник в кривой напряжения более интенсивно протекает процесс старения изоляции.

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

Если силовые кабели используются в качестве каналов связи между полуккомплектами диспетчерского и контролируемого пунктов, то высшие гармоники тока и

напряжения ухудшают работу телемеханических устройств, вызывая сбои в их работе. Кроме того, высшие гармоники вызывают ложную работу устройств РЗ, в которой используются фильтры токов обратной последовательности, до 10 % увеличивают погрешность индукционных счетчиков электроэнергии.

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

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

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

Для достоверной количественной оценки надежности требуется надлежащая организация сбора статистических данных о повреждаемости с развернутыми формами и актами, отражающими нарушения в работе данного электрооборудования. С помощью этих данных можно установить функциональную зависимость повреждаемости от

внешних условий и режимов работы (нагрузки, температуры и прочих климатических условий, частоты операций, качества применяемых материалов и т.д.).

С развитием и совершенствованием договорных рыночных отношений с потребителями электрической энергии такой учёт случаев нарушения ЭСН потребует не только для получения оценок надёжности работы электрической сети, но и для разрешения спорных вопросов по претензиям потребителей к имевшему место уровню надёжности энергоснабжения за год, который согласован и утверждён в договорных обязательствах.

К числу задач, решаемых на уровне проектирования и эксплуатации электрической сети, относятся:

- обеспечение требуемого уровня надёжности ЭСН при перспективном планировании развития электрической сети;
- экономические аспекты надёжности ЭСН потребителей;
- составление графика проведения профилактических работ на электросетевых объектах с учётом обеспечения надёжности ЭСН;
- разработка политики по страхованию ответственности за нарушение договорных обязательств по надёжности ЭСН;
- создание централизованного аварийного запаса материалов в электрической сети для аварийного ремонта на ВЛ;
- разработка требований к поставщикам электрической энергии с позиций обеспечения надёжности ЭСН;
- разработка взаимодействия органов управления электрической сетью и оперативно-диспетчерским управлением системой;
- использование регулировочных возможностей потребителей энергии;
- выявление "узких" мест в электрической сети и обоснование мероприятий для обеспечения надёжности ЭСН;
- разработка нормативной базы для надёжности ЭСН потребителей;

- выявление территориальных зон повышенной опасности для работы электрической сети.

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

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

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

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

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

6.2 Качественный анализ надежности схем распределительств

Анализ схем РУ с точки зрения надежности обычно проводится с помощью расчетов вероятности отказов оборудования с последующим определением условного недоотпуска электроэнергии с шин ЭС [14]. Однако на первой стадии рекомендуется проводить качественный (опосредованный) анализ схем РУ, заключающийся в том, что рассматриваются отказы элементов схем: присоединений, СШ или секций, выключателей - в нормальном и ремонтном режимах схемы. Анализируются последствия отказов при КЗ на данных элементах. Последствиями могут быть: отключение

блока или линий, нарушение транзита, отключение АТС. За ремонтный режим принимается ремонт одного из выключателей или системы шин. Наиболее надежной схемой можно считать схему, у которой при КЗ элементов будут минимальные последствия. Качественный анализ способствует наиболее полной характеристике различных схем РУ.

Последовательность качественного анализа схем РУ следующая:

- намечаются точки КЗ, вследствие которых возможны максимальные потери, т.е. отключения присоединений или погашения шин;

- для выключателей принимаются двухсторонние отказы с отключением смежных элементов;

- определяются последствия действия КЗ;

- сопоставляются результаты различных схем РУ.

В качестве примера рассмотрим схемы ОРУ-500 кВ (рис. 11). В данных схемах приняты обозначения:

1, 2, 3- энергоблоки (ЭБ);

4, 5 - линии электропередачи (ЛЭП);

6 - автотрансформатор связи (АТС);

7, 8 - системы сборных шин (СШ);

9-17 - выключатели высшего напряжения (ВН).

Вариант I (рисунок 6.1, схема 3/2 В).

Нормальный режим

КЗ на присоединениях приведет к отключению двух выключателей с потерей присоединения (ЭБ, ЛЭП или АТС).

КЗ на шинах отключается ряд выключателей без потери присоединений.

КЗ на выключателе среднего ряда отключаются выключатели крайних рядов с потерей двух присоединений (ЛЭП и ЭБ, ЭБ и АТС).

Ремонтный режим

Рассматривается ремонт выключателей. Например, при ремонте выключателя 9 и КЗ на присоединении 1 приведут к

потере двух присоединений (ЛЭП и ЭБ или АТС и ЭБ при ремонте выключателя 17 и КЗ на выключателе 15).

КЗ на шинах 7 и ремонте выключателя 10 приведет к потере энергоблока 1, т.к. выключатель 11 отключится. Также можно рассмотреть ремонт выключателей 13 или 16 при КЗ на шинах 8. Во всяком случае, отключится одно из присоединений (ЛЭП, ЭБ или АТС).

При КЗ на выключателях крайних или среднего рядов и ремонте одного из выключателей противоположного крайнего ряда приводит к потере двух присоединений (ЭБ и ЛЭП или ЭБ и АТС).

Вариант II (рисунок 6.1, схема два связанных треугольника).

Нормальный режим

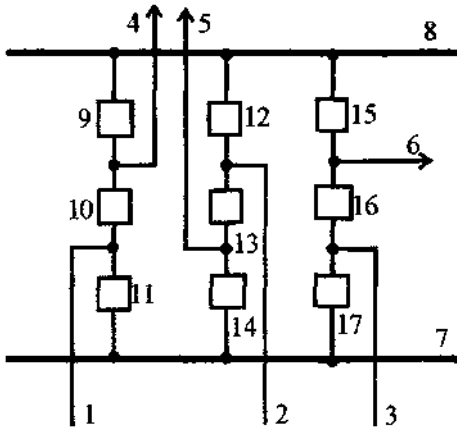
При КЗ на любом присоединении отключается рассматриваемое присоединение (ЛЭП, ЭБ или АТС).

При КЗ на шинах 7 или 8 отключается также одно присоединенное (ЛЭП, ЭБ или АТС). КЗ на любом выключателе приведет к потере двух присоединений (ЛЭП и ЭБ или АТС и ЭБ).

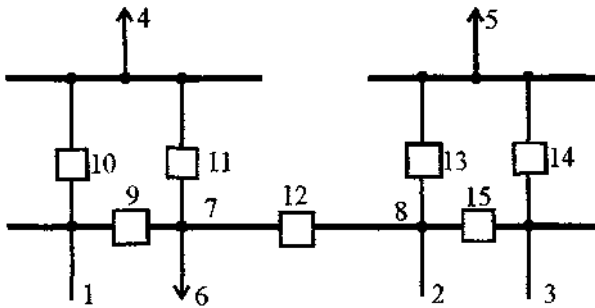
Ремонтный режим

В ремонте выключателя 10 или 14. КЗ на присоединении 6 (2) приведет к отключению 1, 6, 4 (2, 3, 5), т.е. АТС, ЭБ, ЛЭП или 2ЭБ и ЛЭП.

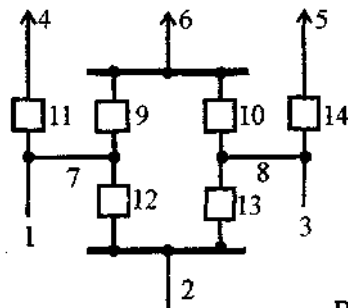
КЗ на шинах 7 (8) будет иметь те же последствия. При КЗ на выключателе 12 последствия усугубляются отключением еще одного присоединения 2 (6).



Вариант I



Вариант II



Вариант III

Рисунок 6.1 - Варианты схем ОРУ-500 кВ

Вариант III (рисунок 6.1, расширенный четырехугольник).

Нормальный режим

КЗ на присоединениях приведет к потере двух присоединений, например, при КЗ на ЭБ 1 отключается выключатель 11 и линия 4 теряет питание (ЭБ и ЛЭП). КЗ на шинах 7 или 8 даст тот же результат (ЭБ и ЛЭП).

КЗ на выключателе 12 (9, 10, 13) приведет к отключению трех присоединений 2ЭБ и ЛЭП (2ЛЭП и ЭБ или ЛЭП, АТС и ЭБ).

Ремонтный режим

Ремонт выключателя 12 (9, 10, 13). КЗ на присоединении 3 приведет к отключению 2ЭБ и ЛЭП.

КЗ на шинах 8 дает тот же результат 2ЭБ и ЛЭП. При КЗ на выключателе 10 дополнительно отключается АТС (6).

Итоги анализа сводятся в таблице 6.1. Сопоставляя результаты, можно сделать вывод, что наиболее надежная схема ОРУ-500 кВ по варианту I - 3/2 В на присоединение. Однако нужно отметить, что по капиталовложениям эта схема самая дорогая, т.к. имеет 9 выключателей. Вариант II - 7 выключателей, Вариант III - 6 выключателей.

После проведения качественного предварительного анализа выбор схемы завершает технико-экономическое обоснование.

Таблица 6.1 - Сравнительный анализ схем ОРУ-500 кВ

Вид КЗ в ОРУ	Последствия КЗ по вариантам в режимах					
	I		II		III	
	нормальный	ремонтный	нормальный	ремонтный	нормальный	ремонтный
На присоединении	ЭБ (ЛЭП или АТС)	ЭБ и ЛЭП (ЭБ или АТС)	ЭБ (ЛЭП или АТС)	2 ЭБ и ЛЭП (ЭБ, АТС, ЛЭП)	ЭБ и ЛЭП	2 ЭБ и ЛЭП (ЭБ, ЛЭП, АТС)
На шинах	-	ЭБ (ЛЭП или АТС)	ЭБ (ЛЭП или АТС)	2 ЭБ и ЛЭП (ЭБ, АТС, ЛЭП)	ЭБ и ЛЭП	2 ЭБ и ЛЭП (ЭБ, ЛЭП, АТС)
На выключателях	ЛЭП и ЭБ (ЭБ и АТС)	ЛЭП и ЭБ (ЭБ и АТС)	ЛЭП и ЭБ (ЭБ и АТС)	2 ЭБ, ЛЭП и АТС	2 ЭБ, ЛЭП (2 ЛЭП и ЭБ)	2 ЭБ, ЛЭП и АТС

6.3 Рекомендации по повышению надежности систем электроснабжения

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

Основные пути повышения надежности можно свести к следующему. [8]

1 Рациональное резервирование:

- в цеховых сетях по высокому или низкому напряжению в ТП (рисунок 6.2);

- за счет раздельной или параллельной работы линий, трансформаторов в зависимости от условий и требований (рисунок 6.3);

- за счет выбора числа независимых ИП с учетом категории потребителей (рисунок 6.4). В случае аварии на одной из магистралей цеховые ТП переключаются на магистраль, оставшуюся в работе. При необходимости это может быть сделано с помощью АВР на секционном автоматическом выключателе (резервирование по НН).

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

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

4 Повышение качества ремонта оборудования, что увеличивает межремонтные сроки, снижает затраты труда и

материальных средств. Такой ремонт должен производиться квалифицированным персоналом, хорошо знающим конструкцию оборудования, современную технологию ремонта, а также обладающим высокой профессиональной подготовкой и практическими навыками.

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

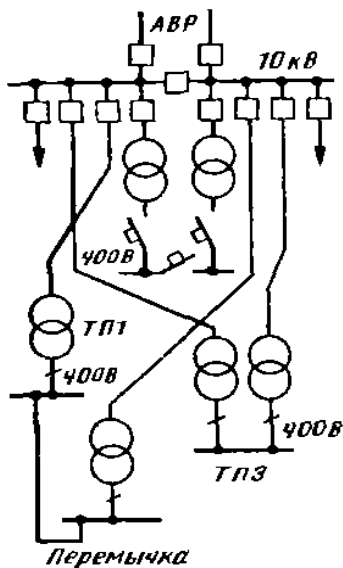


Рисунок 6.2 - Фрагмент схемы ЭСН с резервированием по ВН и НН (наличие резервной перемычки, отдельное питание секций шин).

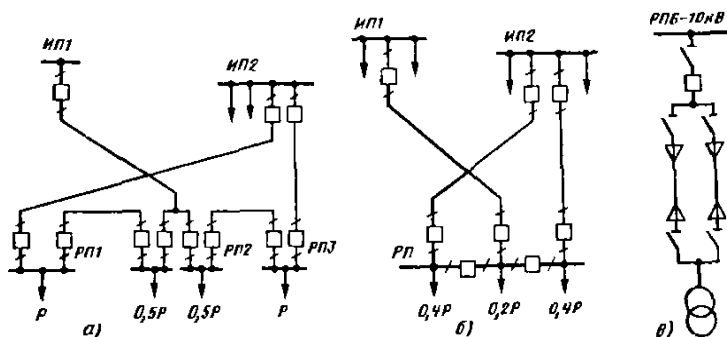


Рисунок 6.3 - Схема радиального питания (РП):
а - группы РП с резервированием от второго источника; *б* — одного РП от двух источников; *в* — обособленной
 однотрансформаторной ТП по одиночной линии (по
 двухкабельной линии)

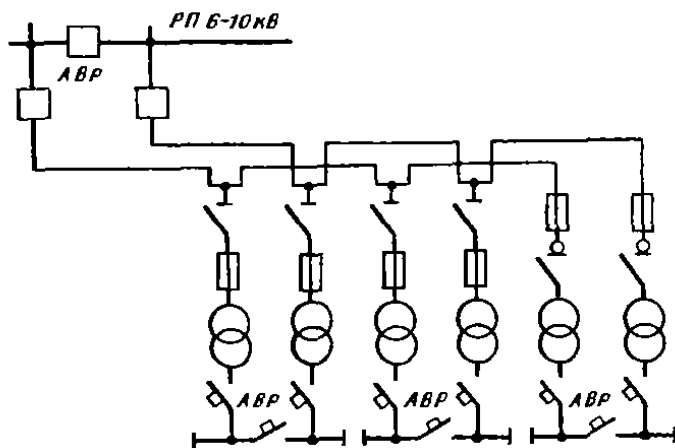


Рисунок 6.4 - Двойная магистральная схема с
 односторонним питанием при отсутствии СШ на цеховых ТП

б Внедрение автоматизации и телемеханизации, что позволяет повысить еще и безопасность обслуживания, эффективность управления объектами ЭСН и избежать ошибочных действий персонала.

При наличии СД целесообразно в качестве пускового органа устройств АВР применять реле минимального напряжения совместно с реле минимальной частоты.

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

Опыт эксплуатации микропроцессорных устройств РЗА за рубежом показал, что эти устройства имеют равные или лучшие показатели надежности и значительно меньшие трудозатраты на техобслуживание по сравнению с традиционными системами. При применении микропроцессорных устройств РЗА в системах ЭСН наравне с релейноконтактными устройствами особое внимание необходимо обращать на готовность этой системы по обеспечению электромагнитной совместимости.

На рисунке 6.5 показана простая схема защиты параллельных линий одностороннего питания на традиционной элементной базе, которую целесообразно использовать вместо сложной и дорогой дифференциальной защиты. Схема позволяет отключать любую из двух параллельных линий в зависимости от места КЗ.

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

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

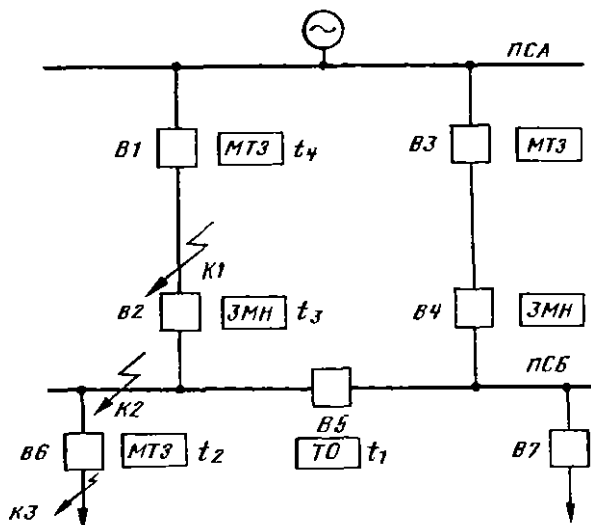


Рисунок 6.5 - Защита параллельных линий
одностороннего питания в системах промышленного ЭСН:

МТЗ— максимальная токовая защита; *ЗМН*— защита минимального напряжения; *ТО* — токовая отсечка без выдержки времени; $t_1 = 0$; $t_2 = 0,5$ с; $t_3 = 1,0$ с; $t_4 = 1,5$ с; в исходном положении *B5* включен

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

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

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

10 Применение самозапуска ответственных двигателей (АД и СД). Самозапуск необходим для обеспечения устойчивости технологических процессов непрерывных производств при КЗ, отключениях выключателя в цепи питания узла нагрузки и т.д. Самозапуск возникает после кратковременного перерыва и автоматического восстановления ЭСН. Двигатели, участвующие в самозапуске, при кратковременных перерывах ЭСН от сети не отключаются.

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

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

13 Внедрение ремонтов под напряжением.

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

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

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

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

- рациональным пофазным распределением однофазных нагрузок;

- применением симметрирующих устройств.

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

- раздельное питание приемников с нелинейной ВАХ и общепромышленных приемников, которое осуществляют от разных секций шин подстанций;

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

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

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

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

Список литературы

- 1 Барг И.Г. Предложения по определению эксплуатационных показателей надёжности основных видов электрооборудования и линий электропередачи. / И.Г. Барг, И.П. Плясуля, О.В. Хотеевкова, В.И. Трубицын, Б.Н. Неклепаев. - М.: Изд-во ОРГРЭС, 1997.
- 2 Биллингтон Р. Оценка надёжности электроэнергетических систем: Пер. с англ. / Р. Биллингтон, Р. Аллан. – М.: Энергоатомиздат, 1988, -288 с.
- 3 Вентцель Е. С. Теория вероятностей. - М.: Наука. 1969. - 576 с.
- 4 Вентцель Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения. / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: ВШ, 2000, -480 с.
- 5 Волков Н.Г. Надёжность электроснабжения. Учеб. пособие/ Том. политех. ун-т. – Томск, 2003. – 140с.
- 6 Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. Изд. 5-е перераб. и доп. - М: Высш. школа, 1977. - 479 с.
- 7 Зорин В.В. Надёжность систем электроснабжения. / В.В. Зорин и др. - К.: Вища шк.. 1984. - 192 с.
- 8 Конюхова Е.А. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий. / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. - 92с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 12 (36)]
- 9 Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. — М: Энергоатом издат. 1995.
- 10 Лебедев А. П. Вероятностные методы в инженерных задачах: Справочник. / А. П. Лебедев и др. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2000. - 333 с.
- 11 Руденко Ю.Н. Надёжность систем энергетики. / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – М.: Наука, 1986.

- 12 Савоськин Н.Е. Надежность электрических систем. Учебное пособие/ Пензенский гос. ун-т. – Пенза, 2004. – 102с.
- 13 Трубицын В.И. Надежность электростанций: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1997.
- 14 Трубицын В.И. Оценка надежности схем электрических соединений станций и подстанций: Учебно-методическое пособие. – М.: ИУЭ ГУУ, ВИПКЭнерго, ИПКГосслужбы, 2003. – 100с.
- 15 Фокин Ю. А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. — М.: Высш.шк. 1989.
- 16 Фокин Ю. А. Оценка надежности систем электроснабжения. / Ю. А. Фокин, В. А. Туфанов. - М.: Энер-гоиздат, 1981.-224 с.
- 17 Эндрени Дж. Моделирование при расчётах в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1983, -336 с.
- 18 ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия, термины, и определения. Издательство стандартов, 1990.
- 19 Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей. РД 153-34.0-2.801-2000. – РАО «ЕЭС России».

Список сокращений

- АВР – автоматический ввод резерва
- АД – асинхронный двигатель
- АПВ – автоматическое повторное включение
- АТС – автотрансформатор связи
- ВЛ – воздушные линии
- ГПП – главная понижающая подстанция
- ИП – источник питания
- КЗ – короткое замыкание
- КЛ – кабельные линии
- КРМ – компенсация реактивной мощности
- ЛЭП – линия электропередачи
- НТД – нормативно-техническая документация
- ОРУ – открытое (наружное) распределительное устройство
- ПКЭ – показатель качества электроэнергии
- РЗ – релейная защита
- РУ – распределительное устройство
- РЭ – расчетный элемент
- СВ – случайная величина
- СД – синхронный двигатель
- СН – собственные нужды
- СШ – сборные шины
- ТТ – трансформатор тока
- ТН – трансформатор напряжения
- ТП – трансформаторная подстанция
- ЭПН – эксплуатационный показатель надежности
- ЭС - электростанция
- ЭСН – электроснабжение
- ЭЭС – электроэнергетическая система

Учебное издание

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие

Автор-разработчик:
Белоусова Олеся Владимировна

В авторской редакции

Компьютерный набор О.В. Белоусовой
Подписано в печать . Формат 60x84/16
Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз.
Заказ №

Международный институт компьютерных технологий
394026 Воронеж, ул.Солнечная, 29 б