

## ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Надежность – одно из требований, предъявляемых к системам электроснабжения. Системы электроснабжения должны надежно и экономично обеспечивать потребителей электроэнергией в достаточном количестве, требуемого качества, с соблюдением требований безопасности, экологии, удобства эксплуатации.

Расчет надежности в системах электроснабжения проводится, как правило, относительно узлов нагрузки или конкретных потребителей. При этом определяются показатели, характеризующие частоту и длительность отключений, а также недопустимое отклонение режимных параметров. В зависимости от характера потребителей рассчитываются недоотпуск электроэнергии и ущерб.

Расчеты надежности позволяют сравнить варианты схем электроснабжения по затратам с учетом ущербов от отказов и недоотпуска электроэнергии, оценить соответствие принимаемых технических решений требованиям к надежности, экономическую целесообразность намечаемых мероприятий по повышению надежности с учетом стоимости этих мероприятий и их эффекта (сокращения количества и длительности ремонтов, снижения ущерба потребителей).

В ряде случаев проектная оценка надежности выполняется в обязательном порядке. Например, при проектировании автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии, потребляемой на оптовом рынке, а также при проектировании автоматизированных систем управления для производств повышенного риска (взрывоопасные; пожароопасные; взрывопожароопасные; химически опасные; радиационно-опасные; ядерно-опасные; биологически опасные).

Основные понятия, термины и определения в области надежности установлены в ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

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

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств

**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.

**Ремонтпригодность** - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

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

**Исправное состояние** - состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

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

**Работоспособное состояние** - состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

**Неработоспособное состояние** - состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Для сложных объектов возможны частично неработоспособные состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций.

**Предельное состояние** - состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно

**Отказ** - это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

**Повреждение** - событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние происходит из-за повреждений.

Отказы делят на различные виды: частичные и полные, независимые и зависимые, постепенные и внезапные, явные и скрытые и др.

При классификации отказов по последствиям могут быть введены две, три и большее число категорий отказов, например, критические; существенные или несущественные отказы.

Отказы функционирования релейной защиты, автоматики и коммутационных аппаратов бывают трех видов:

- отказы в срабатывании (невыполнение требований на срабатывание);
- излишние срабатывания (срабатывание при требовании на срабатывание, поступающем не на данное, а на другое устройство);
- ложные срабатывания (срабатывание при отсутствии требований на срабатывание).

**Внезапный отказ** - отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

**Постепенный отказ** - отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа и (или) принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Однако собственно отказ происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение дефекта оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все большее число отказов будет относиться к категории постепенных.

**Сбой** - самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

**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.

Эта классификация отказов по причинам возникновения введена с целью установления, на какой стадии создания или существования объекта следует провести мероприятия для устранения причин отказов.

**Деградационный отказ** - отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления в эксплуатации.

При анализе надежности различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и поздние, деградационных отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания и т. п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. Вероятность возникновения деградационных отказов в пределах планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса) должна быть достаточно мала. Это обеспечивается расчетом на долговечность с учетом физической природы деградационных отказов, а также надлежащей системой технического обслуживания и ремонта. В принципе можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку, технологический прогон и т. п. При этом соответственно может варьироваться цена объекта.

**Восстановление** – процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния. Восстановление включает в себя идентификацию отказа (определение его места и характера), наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительную операцию контроля работоспособности объекта в целом. Восстановление

работоспособности системы электроснабжения достигается заменой, ремонтом, наладкой ее элементов, переключениями, отключением или изменением режимов работы.

Отдельно взятые объекты могут быть восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми. Восстанавливаемый объект - объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Большинство объектов (элементов систем электроэнергетики, электроснабжения) являются восстанавливаемыми.

**Живучесть** - свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Применительно к электроэнергетике живучесть можно определить как свойство системы противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовыми нарушениями питания потребителей. Живучесть связана не только со структурой системы, но и с надежностью функционирования автоматики и коммутационной аппаратуры в аварийных режимах.

Надежность электроэнергетических систем, систем электроснабжения (СЭС) во многом связана с **избыточностью**, т.е. с дополнительными средствами и возможностями сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Формы избыточности:

1. Резервирование
2. Совершенствование конструкций и материалов, из которых изготовлены элементы, повышение запасов их прочности, долговечности, устойчивости к влияниям 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.

Резервирование - одно из основных средств обеспечения заданного уровня надежности объекта при недостаточно надежных компонентах и элементах. Цель резервирования - обеспечить безотказность объекта в целом, т. е. сохранить его работоспособность, когда возник отказ одного или нескольких элементов. Наряду с резервированием путем введения дополнительных (резервных) элементов находят широкое применение другие виды резервирования. Среди них временное резервирование (с использованием резервов времени), информационное резервирование (с использованием резервов информации), функциональное резервирование, при котором используется способность элементов выполнять дополнительные функции или способность объекта перераспределять функции между элементами, нагрузочное резервирование, при котором используется способность элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных, а также способность объекта перераспределять нагрузки между элементами.

## 1. КАТЕГОРИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

В отношении обеспечения надежности электроснабжения электроприемники разделяются на следующие три категории.

Электроприемники первой категории - электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения.

Из состава электроприемников первой категории выделяется *особая группа* электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров.

Электроприемники второй категории - электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

Электроприемники третьей категории - все остальные электроприемники, не подпадающие под определения первой и второй категорий.

Электроприемники первой категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников первой категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

В качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприемников первой категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем (в частности, шины генераторного напряжения), предназначенные для этих целей агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т. п.

Если резервированием электроснабжения нельзя обеспечить непрерывность технологического процесса или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, должно быть осуществлено технологическое резервирование, например, путем установки взаимно резервирующих технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного останова технологического процесса, действующих при нарушении электроснабжения.

Электроснабжение электроприемников первой категории с особо сложным непрерывным технологическим процессом, требующим длительного времени на восстановление нормального режима, при наличии технико-экономических обоснований рекомендуется осуществлять от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, к которым предъявляются дополнительные требования, определяемые особенностями технологического процесса.

Электроприемники второй категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Для электроприемников второй категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

Для электроприемников третьей категории электроснабжение может выполняться

от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают 1 суток.

Примеры электроприемников различной категории надежности:

- I категория: установки непрерывной разливки стали, санитарно-техническая вентиляция во вредных химических производствах, крупные электролизерные установки, котельные производственного пара, насосные для охлаждения печей, водоотливные и подъемные установки горнорудных предприятий; в городских сетях к электроприемникам первой категории относятся ответственные электроприемники театров, крупных кинотеатров, стадионов, операционные блоки больниц, родильных домов, пунктов неотложной помощи, технические и силовые электроприемники жилых зданий, имеющих более 16 этажей (пожарные насосы, лифты, средства автоматического дымоудаления), аварийное освещение лестничных клеток, вестибюлей, коридоров, заградительные огни на кровлях зданий высотой 50 и более метров, электроприемники узлов связи, телеграфа, водопроводных и канализационных станций.
- II категория: электрические дуговые печи, реверсивные прокатные станы, большинство основных цехов в машиностроительной, шинной, резинотехнической, целлюлозно-бумажной, текстильной промышленности, ряд установок цветной металлургии, обогатительные фабрики .
- III категория: вспомогательные производства, цехи несерийного производства, неответственные склады и т.п.

Понятие "категория ЭП" по надежности электроснабжения" не следует относить к потребителю в целом, в том числе к цехам, участкам, корпусам и т. д. Это понятие правомерно только в отношении индивидуального ЭП. Для потребителя характерно лишь сочетание в различных пропорциях ЭП категорий I, II и III.

Надежность электроснабжения потребителя обеспечивается выполнением требуемой степени резервирования. Для продолжения работы основного производства в послеаварийном режиме необходима работа всех ЭП, отнесенных к I и II категориям, следовательно питание этих ЭП должно резервироваться. Резервировать питание ЭП III категории не требуется. При проектировании следует для каждого потребителя определять требуемую степень резервирования, равную отношению электрической нагрузки ЭП, работа которых необходима для продолжения работы (ЭП I и II категорий), к суммарной электрической нагрузке потребителя.

Значение требуемой степени резервирования для промышленных предприятий может меняться от 1 (отсутствуют ЭП III категории, и должно быть обеспечено 100%-ное резервирование питания электрической нагрузки при нарушениях в системе электроснабжения) до 0 (отсутствуют ЭП I и II категорий, и резервирование питания нагрузки не требуется). Выбор элементов схемы электроснабжения, производимый, как правило, по данным послеаварийного режима, следует выполнять во всех случаях согласно требуемой степени резервирования с учетом перегрузочной способности устанавливаемого электрооборудования.

Надежность электроснабжения промышленного предприятия со сложным непрерывным технологическим процессом (НТП), требующим длительного времени на восстановление рабочего режима при нарушении системы электроснабжения, определяется помимо требуемой степени резервирования длительностью перерыва питания при нарушениях в системе электроснабжения и ее сопоставлением с предельно допустимым временем перерыва электроснабжения, при котором возможно сохранение НТП данного производства. При невозможности обеспечения НТП необходимо осуществлять технологическое резервирование. Разработка проекта электроснабжения предприятия с НТП должна производиться совместно с энергоснабжающей организацией и организацией, выполняющей проектирование технологии и технологической автоматики.

## 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

### Единичные показатели

Основной количественной характеристикой безотказности является **вероятность безотказной работы  $p(t)$** , т.е. вероятность того, что в заданном интервале времени (или в пределах заданной наработки) при заданных условиях работе не произойдет отказа,  $p(t)=P(T \geq t)$  (вероятность того, что время  $T$  от момента включения объекта до его отказа будет больше или равно времени  $t$ , в течение которого определяется вероятность безотказной работы).

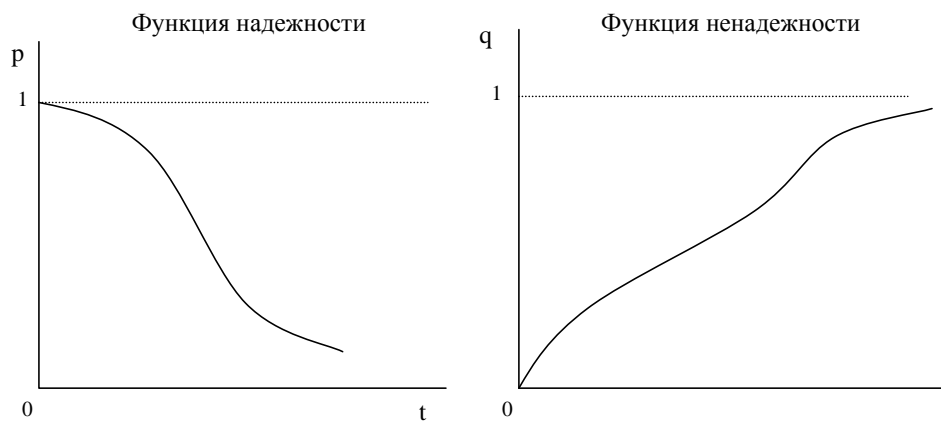
На практике этот показатель определяется статистической оценкой:

$$p(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

где  $N_0$  - число однотипных объектов (элементов), поставленных на испытания (находящихся под контролем); во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным;  $n(t)$  - число отказавших объектов за время  $t$ . Из определения вероятности безотказной работы видно, что эта характеристика является функцией времени, причем она является убывающей функцией и может принимать значения от 1 до 0.

**Вероятность отказа (ненадежность):  $q(t)=P(T < t)$** . (вероятность отказа есть функция распределения времени работы  $T$  до отказа)

$$p(t) + q(t) = 1$$



Производная от вероятности отказа по времени есть плотность вероятности или дифференциальный закон распределения времени работы объекта до отказа

$$q'(t) = \frac{dq(t)}{dt} = f(t)$$

Вероятность безотказной работы:

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

**Наработка** - продолжительность или объем работы объекта. Наработка 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.).

Различают понятия наработки до отказа и наработки между отказами. Нарботка до отказа - наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа. Нарботка между отказами - наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Нарботка до отказа вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов. Нарботка между отказами определяется объемом работы объекта от k-го до (k+1)-го отказа, где k=1, 2 ... Эта наработка относится только к восстанавливаемым объектам.

**Средней наработкой до отказа** называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа  $T_{отк}$ :

$$T_{отк} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt ,$$

откуда можно получить

$$T_{отк} = \int_0^{\infty} p(t) dt ,$$

т.е. средняя наработка до отказа равна площади под графиком  $p(t)$ .

Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяется по формуле

$$T_{отк} = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} t_j ,$$

где  $N_0$  - число работоспособных объектов при  $t = 0$  (в начале испытания);  $t_j$  - наработка до отказа j-го объекта. Эта формула соответствует плану испытаний, при котором все объекты испытываются до отказа.

**Интенсивность отказов** - это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не наступил:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - q(t)}$$

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{срi} \cdot \Delta t_i} ,$$

где  $n(\Delta t_i)$  - число отказов однотипных объектов на интервале  $\Delta t_i$ , для которого определяется  $\lambda(t)$ ;

$N_{срi}$  - число работоспособных объектов в середине интервала  $\Delta t_i$ ,  $N_{срi} = (N_i + N_{i+1})/2$ ;

$N_i$  - число работоспособных объектов в начале интервала  $\Delta t_i$ ;

$N_{i+1}$  - число работоспособных объектов в конце интервала  $\Delta t_i$ .

Обратная связь вероятности безотказной работы с интенсивностью:

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

### Средняя наработка на отказ

Этот показатель относится к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т.д. На оси



времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений - поток восстановлений.

Средняя наработка на отказ объекта (наработка на отказ) определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к числу отказов, происшедших за суммарную наработку:

$$T_{отк} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n(t)},$$

где  $t_i$  - наработка между  $i-1$  и  $i$ -м отказами,  $n(t)$  - суммарное число отказов за время  $t$ .

**Параметр потока отказов** также характеризует восстанавливаемый объект и по статистическим данным определяется с помощью формулы:

$$\omega(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1},$$

где  $n(t_1)$  и  $n(t_2)$  - количество отказов объекта, зафиксированных соответственно, по истечении времени  $t_1$  и  $t_2$ .

Если используются данные об отказах по определенному количеству восстанавливаемых объектов, то

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i},$$

где  $n(\Delta t_i)$  - количество отказов по всем объектам за интервал времени  $\Delta t_i$ ;

$N_0$  - количество однотипных объектов, участвующих в эксперименте (отказавший объект восстанавливается,  $N_0 = \text{const}$ ).

Выражение для  $\omega(t)$  похоже на выражение для  $\lambda(t)$  с той лишь разницей, что при определении  $\omega(t)$  предполагается моментальное восстановление отказавшего объекта или замена отказавшего однотипным работоспособным, то есть  $N_0 = \text{const}$ .

Параметр потока отказов представляет собой плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта. Отказы объектов возникают в случайные моменты времени и в течение заданного периода эксплуатации наблюдается поток отказов. Существует множество математических моделей потоков отказов. Наиболее часто при решении задач надежности электроустановок используют простейший поток отказов - пуассоновский поток. Простейший поток отказов удовлетворяет одновременно трем условиям: стационарности, ординарности, отсутствия последствий.

**Стационарность** случайного процесса (времени возникновения отказов) означает, что на любом промежутке времени  $\Delta t_i$  вероятность возникновения  $n$  отказов зависит только от  $n$  и величины промежутка  $\Delta t_i$ , но не зависит от сдвига  $\Delta t_i$  по оси времени. Следовательно, при равных интервалах  $\Delta t_i$  вероятность появления  $n$  отказов по всем интервалам будет одинакова.

**Ординарность** случайного процесса означает, что отказы являются событиями случайными и независимыми. Ординарность потока означает невозможность появления в один и тот же момент времени более одного отказа.

**Отсутствие последствия** означает, что вероятность наступления  $n$  отказов в течение промежутка  $\Delta t_i$  не зависит от того, сколько было отказов и как они распределялись до этого промежутка. Следовательно, факт отказа любого элемента в системе не приведет к изменению характеристик (работоспособности) других элементов системы, если даже система и отказала из-за какого-то элемента.

Опыт эксплуатации сложных технических систем показывает, что отказы элементов происходят мгновенно и если старение элементов отсутствует ( $\lambda = \text{const}$ ), то поток отказов в системе можно считать простейшим.

Случайные события, образующие простейший поток, распределены по закону Пуассона:

$$p_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \text{ при } n \geq 0.$$

где  $p_n(t)$  - вероятность возникновения в течение времени  $t$  ровно  $n$  событий (отказов);  $\lambda$  - параметр распределения, совпадающий с параметром потока событий.

Если принять  $n = 0$ , то получим безотказной работы объекта за время  $t$  при интенсивности отказов  $\lambda = \text{const}$ :

$$p(t) = e^{-\lambda t}$$

Нетрудно доказать, что если восстанавливаемый объект при отсутствии восстановления имеет характеристику  $\lambda = \text{const}$ , то, придавая объекту восстанавливаемость, мы обязаны записать  $\omega(t) = \text{const}$ ;  $\lambda = \omega$ . Это свойство широко используется в расчетах надежности ремонтируемых устройств. В частности, во многих случаях важнейшие показатели надежности оборудования электроустановок даются в предположении простейших потоков отказов и восстановлений, когда  $\lambda = \omega = 1/T$ .

#### Экспоненциальный закон распределения

Наиболее часто в расчетах надежности применяется экспоненциальный закон распределения, по которому

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

Тогда

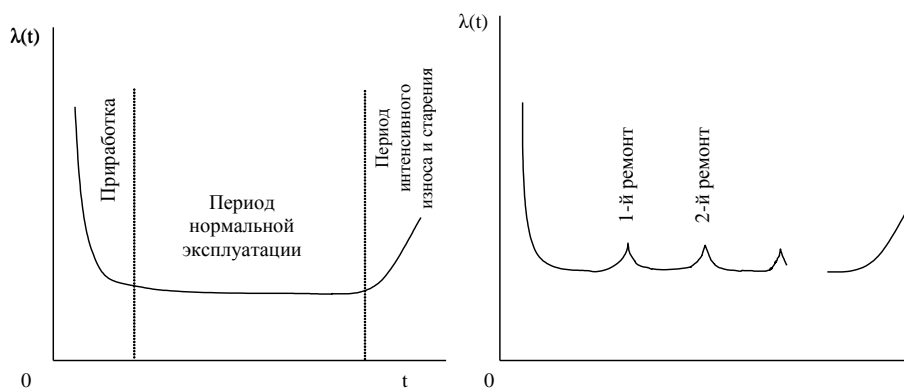
$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad q(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  - параметр потока отказов.

Математическое ожидание времени безотказной работы:

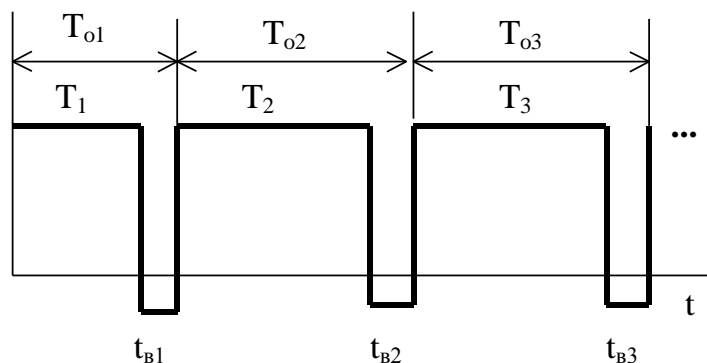
$$T = \frac{1}{\lambda}.$$

В общем случае  $\lambda$  зависит от времени эксплуатации:  $\lambda = f(t)$ .



В практических расчетах обычно используют среднее значение параметра потока отказов, которое получают по статистическим или паспортным данным, например, по среднему времени наработки до отказа.

Аналогично вероятности безотказной работы  $p(t)$  характеризуется вероятностью восстановления объекта  $q_b(t) = P(T_b < t)$  и вероятностью невозможности восстановления  $p_b(t) = P(T_b \geq t)$ , интенсивность восстановления  $\mu(t)$ .



$T_o$  – время между последовательными событиями отказа и восстановления.

Т.к. для электроэнергетических систем  $t_b \ll T$ , то  $\lambda(t) \approx \Omega(t)$ , где  $\Omega(t)$  – суммарный параметр потока отказов (с учетом восстановления).

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

**Срок службы** - календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние

#### Пример определения показателей надежности при экспоненциальном законе распределения

Пусть объект имеет экспоненциальное распределение времени возникновения отказов с интенсивностью отказов  $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$  1/час.

Требуется вычислить основные показатели надежности невозстанавливаемого объекта за  $t = 2000$  час.

Решение.

1. Вероятность безотказной работы за время  $t = 2000$  час равна

$$p(2000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,9512$$

2. Вероятность отказа за  $t = 2000$  ч равна

$$q(2000) = 1 - p(2000) = 1 - 0,9512 = 0,0488.$$

3. Вероятность безотказной работы в интервале времени от 500 час до 2500 час при условии, что объект проработал безотказно 500 ч равна

$$p(500;2500) = \frac{e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2500}}{e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500}} = 0,9512$$

4. Средняя наработка до отказа

$$T = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час.}$$

## Комплексные показатели надежности

В отличие от единичного показателя надежности комплексный показатель надежности количественно характеризует не менее двух свойств, составляющих надежность, например безотказность и ремонтпригодность.

**Коэффициент готовности** - это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Для одного ремонтируемого объекта коэффициент готовности

$$k_r = \frac{\sum T_i}{\sum T_i + \sum t_{Bi}}$$

При  $t \rightarrow \infty$

$$k_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{t}_B}$$

Коэффициент готовности объекта может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ и уменьшения среднего времени восстановления. Коэффициент готовности является удобной характеристикой для объектов, которые предназначены для длительного функционирования, а решают поставленную задачу в течение короткого промежутка времени (находятся в ждущем режиме), например, релейная защита, контактная сеть (особенно при относительно малых размерах движения), сложная контрольная аппаратура и т.д.

**Коэффициент вынужденного простоя** - вероятность того, что в произвольный момент времени  $t$  объект будет в неработоспособном состоянии:  $k_{\Pi} = 1 - k_r$ .

**Коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени  $\tau$ :

$$k_{OG} = k_r e^{-\lambda \tau}.$$

**Коэффициент технического использования** - отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием, т.е. плановыми отключениями и ремонтом (восстановлением) за тот же период:

$$k_{TI} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{t}_{\Pi} + \bar{t}_B}.$$

### Примеры требований к надежности элементов систем электроснабжения

Для силовых трансформаторов устанавливают следующие показатели надежности (ГОСТ 11677-85 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия»):

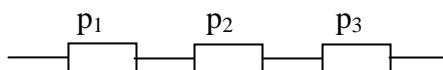
- установленная безотказная наработка — не менее 25000 ч;
- вероятность безотказной работы за наработку 8800 ч — не менее 0,995;
- срок службы до первого капитального ремонта — не менее 12 лет;
- полный срок службы — не менее 25 лет.

Для трансформаторов тока и напряжения (ГОСТ 1983-2001 «Трансформаторы напряжения. Общие технические условия» и ГОСТ 7746-2001 «Трансформаторы тока. Общие технические условия»):

- средняя наработка до отказа должна быть установлена по ГОСТ 27.003 («Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности») и указана в стандартах на трансформаторы конкретных типов;
- средний срок службы трансформаторов — 25 лет;
- требования по ремонтпригодности должны быть указаны в стандартах на трансформаторы конкретных типов.

### РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЭС

При последовательном соединении элементов система работоспособна только в том случае, когда работоспособны одновременно все элементы. Вероятность безотказной работы системы как произведение независимых событий определяется произведением вероятностей безотказной работы всех ее элементов:



$$P = \prod_{i=1}^N p_i$$

Вероятность отказа системы:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^N p_i$$

Т.к. при  $\lambda_i = \text{const}$

$$p(t) = e^{-\lambda t},$$

то

$$P = e^{-\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i\right)t}$$

$\sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda$  - интенсивность отказов системы, состоящей из N последовательных элементов.

При параллельном соединении отказ системы происходит в случае отказа всех элементов, т.е. вероятность отказа определяется произведением вероятностей отказов всех элементов:

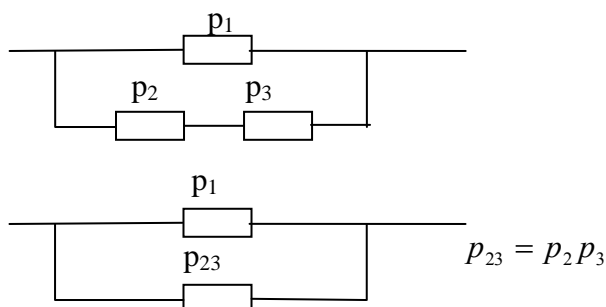
$$Q = \prod_{i=1}^N q_i$$

Вероятность безотказной работы:

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^N q_i = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i)$$

При смешанном соединении выполняется последовательное преобразование системы.

Пример 1.



$$P = 1 - \prod_{i=1}^N q_i = 1 - (1 - p_1)(1 - p_{23}) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2 p_3)$$

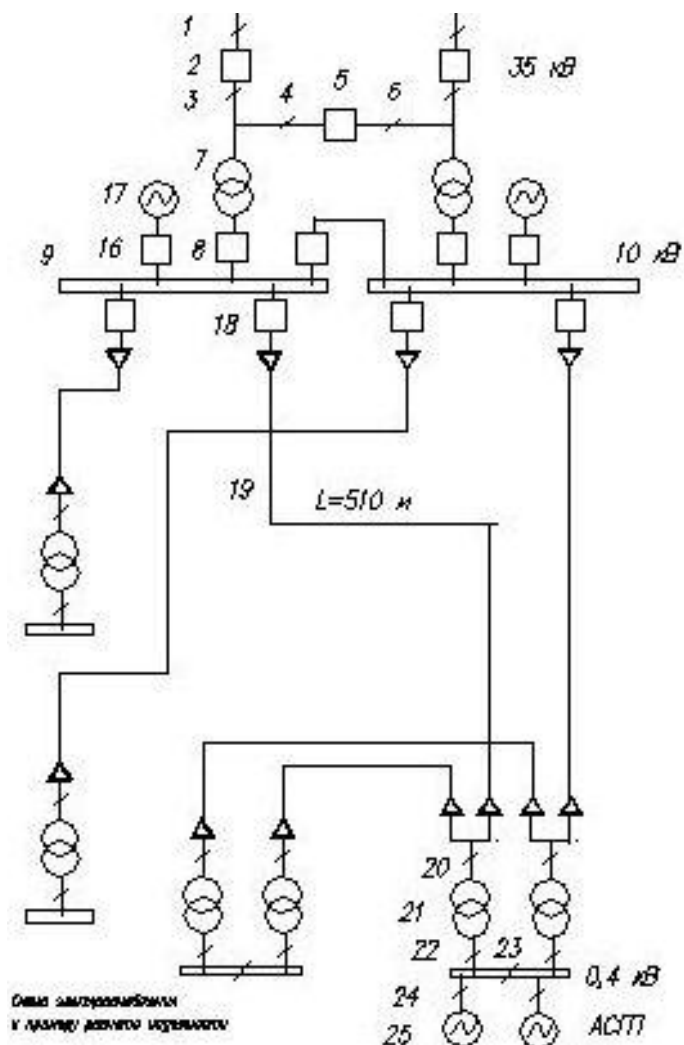
Применяя последовательные преобразования можно рассчитать вероятность безотказной работы системы электроснабжения.

Пример 2.

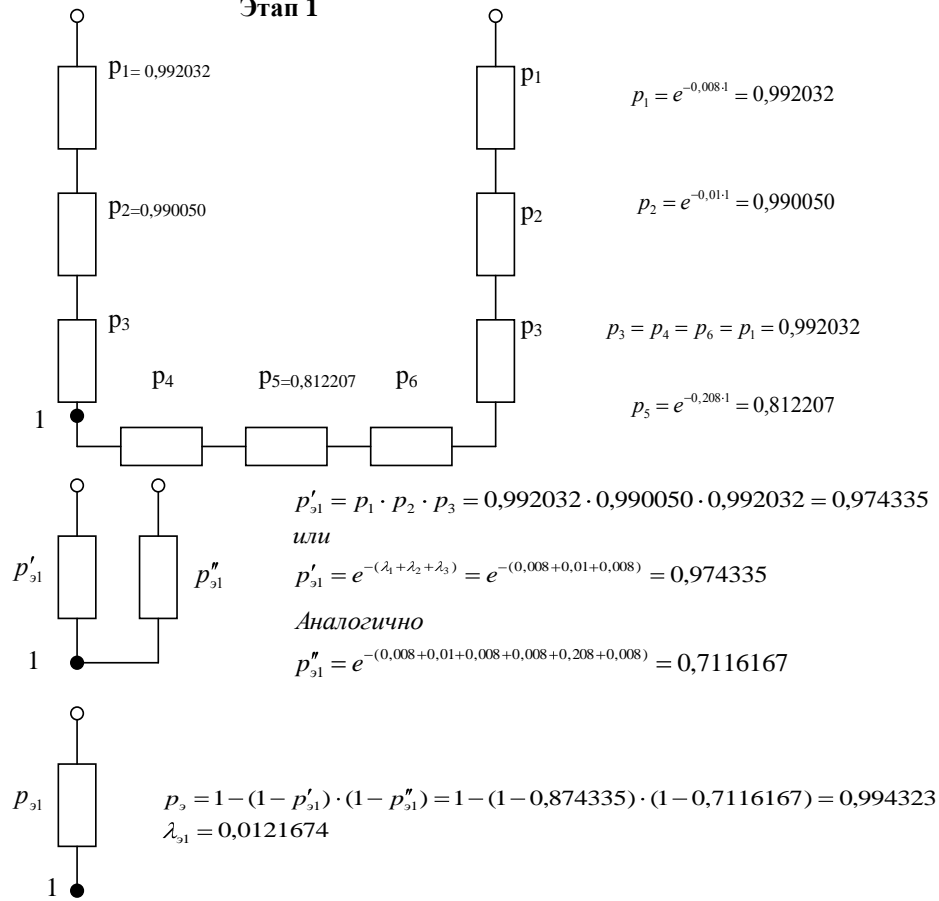
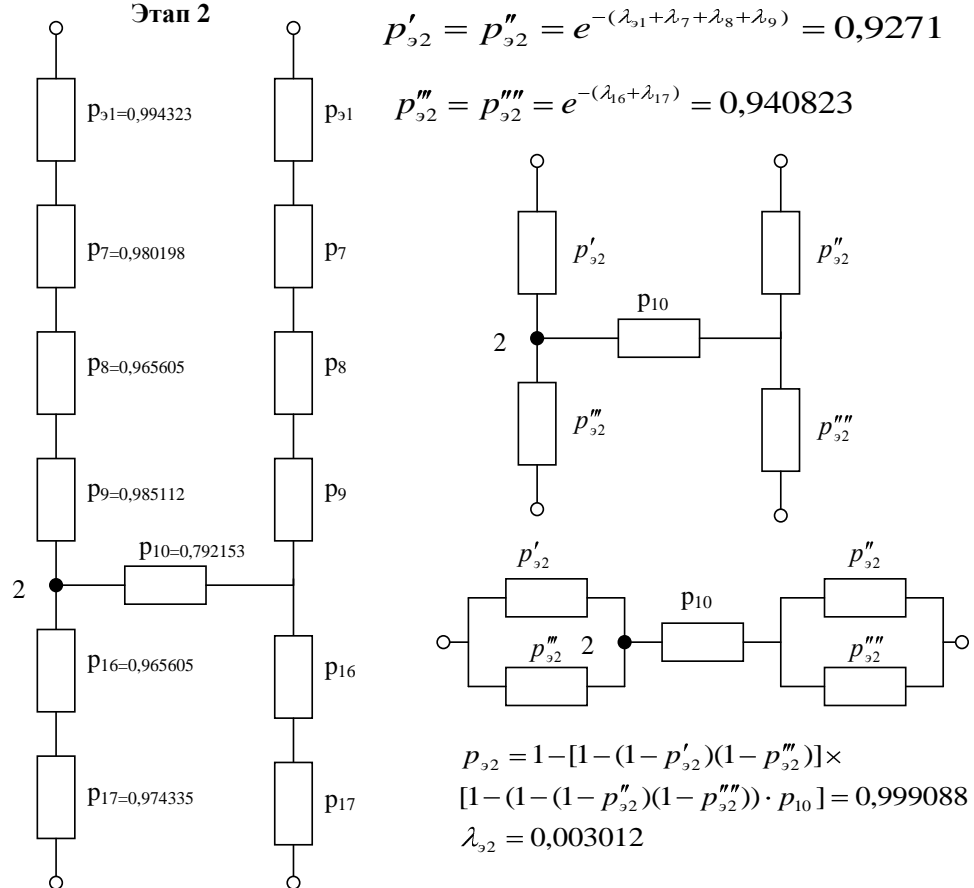
Рассчитать вероятность безотказной работы для системы электроснабжения, схема которой представлена на рисунке. Для питания электроприемников особой группы первой категории надежности в системе предусмотрен третий независимый источник – дизельная электростанция (ДЭС), генераторы которой подключены к шинам ЗРУ 10 кВ ГПП. Для электроприемников особой группы первой категории, не допускающих разрыва кривой напряжения, предусматривается автоматизированная система гарантированного электропитания (АСГП), подключенная к шинам 0,4 кВ ТП.

Значения параметра потока отказов для элементов схемы приведены в таблице.

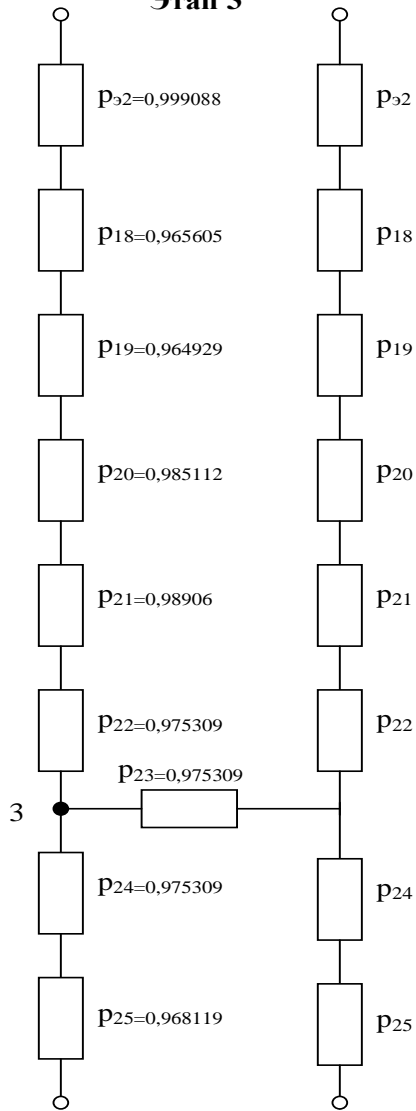
Наименование объекта	$\lambda$ , 1/год
Разъединитель 35 кВ	0,008
Масляный выключатель 35 кВ с РЗА	0,01
Масляный выключатель 35 кВ с РЗА и АВР	0,208
Трансформатор 35 кВ	0,02
Масляный выключатель 10 кВ с РЗА	0,035
Масляный выключатель 10 кВ с РЗА и АВР	0,233
Шины 10 кВ	0,015
Кабель в земле (на 1 км $\lambda=0,07$ )	0,0357
Выключатель нагрузки 10 кВ	0,015
Трансформатор 10 кВ	0,011
Автоматический выключатель	0,025
Агрегат АСГП	0,0324
Агрегат ДЭС	0,026



По схеме электроснабжения для расчетной точки (шин 0,4 кВ ТП-3) составляем схему замещения по надежности. Затем путем последовательных эквивалентных преобразований схема приводится к одному элементу, связывающему источник питания и расчетную точку. В результате получаем вероятность безотказной работы  $P=P_{33}=0,999891$ , параметр потока отказов  $\lambda=\lambda_{33}=0,000199$  1/год.

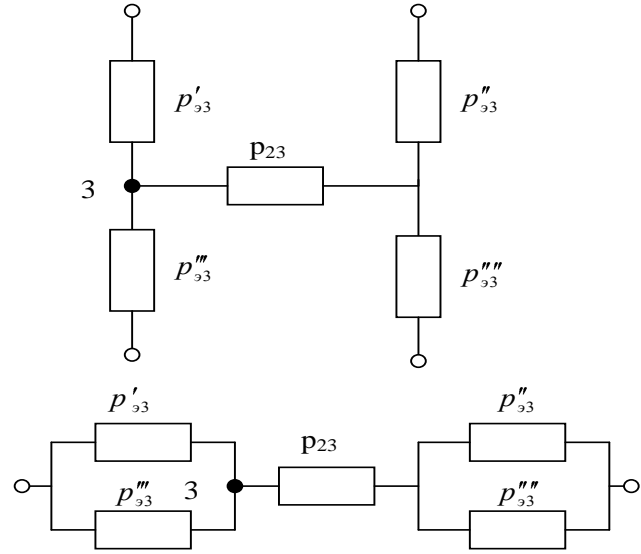
**Этап 1****Этап 2**



**Этап 3**

$$p'_{93} = p''_{93} = e^{-(\lambda_{92} + \lambda_{18} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{22})} = 0,884604$$

$$p'''_{93} = p''''_{93} = e^{-(\lambda_{24} + \lambda_{25})} = 0,944215$$



$$p_{93} = 1 - [1 - (1 - p'_{93})(1 - p'''_{93})] \times [1 - (1 - (1 - p''_{93})(1 - p''''_{93})) \cdot p_{23}] = 0,999801$$

$$\lambda_{93} = 0,000199$$

## РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

### Последовательное соединение элементов

Для случая  $\lambda(t) = \omega(t) = \lambda = \text{const}$  средняя частота (интенсивность) отказов

$$\lambda_c = \sum \lambda_i$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-t \sum \lambda_i}$$

Вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - e^{-t \sum \lambda_i}$$

Среднее время безотказной работы

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum \lambda_i}$$

Среднее время восстановления

$$t_{ec} = \frac{\sum \lambda_i \cdot t_{ei}}{\lambda_c}$$

является математическим ожиданием времени восстановления, взвешенным по частоте отказов и последовательно соединенных элементов.

Пример. Определить показатели надежности системы, состоящей из пяти последовательно соединенных элементов:

$\lambda_1 = 0,50$ год <sup>-1</sup>	$t_{B1} = 16,0$ ч;
$\lambda_2 = 0,32$ ;	$t_{B2} = 8,0$ ;
$\lambda_3 = 0,30$ ;	$t_{B3} = 6,0$ ;
$\lambda_4 = 0,64$ ;	$t_{B4} = 12,5$ ;
$\lambda_5 = 0,001$ ;	$t_{B5} = 15,0$ ;

Решение. Частота отказов

$$\lambda_c = \sum \lambda_i = 0,5 + 0,32 + 0,3 + 0,64 + 0,001 = 1,761 \text{ год}^{-1}$$

Среднее время восстановления

$$t_{ec} = \frac{0,5 \cdot 16 + 0,32 \cdot 8 + 0,3 \cdot 6 + 0,64 \cdot 12,5 + 0,001 \cdot 15}{1,761} = 11,57 \text{ ч.}$$

Среднее время безотказной работы

$$T_c = \frac{1}{1,761} = 0,568 \text{ лет} \quad \text{или} \quad T_c = 0,568 \cdot 8760 = 4974 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы системы за  $t=1$  год

$$P(t) = e^{-1 \cdot 1,761} = 0,172$$

Вероятность отказа системы за  $t=1$  год

$$Q(t) = 1 - 0,172 = 0,83$$

### Параллельное соединение элементов

Для структуры, состоящей из двух параллельно соединенных элементов 1 и 2, частота отказов

$$\lambda_c \approx \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (t_{e1} + t_{e2})$$

или

$$\lambda_c \approx \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (t_{e1} + t_{e2}) / 8760,$$

если значения имеют размерность 1/год, а  $t_{e1}$  - час.

Среднее время восстановления

$$t_{ec} = \frac{t_{e1} \cdot t_{e2}}{t_{e1} + t_{e2}}$$

Данные формулы применимы для определения показателей надежности высоконадежных структур, т.е. таких, для которых соблюдается условие

$$T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}} \gg t_{e\max}$$

Пример. Дана система, состоящая из двух параллельно соединенных элементов,  $\lambda_1=1,2$  год<sup>-1</sup>;  $t_{e1}=16$  ч;  $\lambda_2=2,7$  год<sup>-1</sup>;  $t_{e2}=6$  ч. Требуется определить надежность системы.

Решение. Переведем размерность частоты отказов в ч<sup>-1</sup>:

$$\lambda_1 = 1,2 / 8760 = 137 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda_2 = 2,7 / 8760 = 308 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Формулы могут быть использованы в расчетах, поскольку

$$t_{e\max} = t_{e1} = 16 \ll T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{308 \cdot 10^{-6}} = 3247.$$

Частота отказов

$$\lambda_c = 137 \cdot 10^{-6} 308 \cdot 10^{-6} \cdot (16 + 6) = 928 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$$

или

$$\lambda_c = 928 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1} \cdot 8760 = 8,13 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$$

Среднее время восстановления

$$t_{ec} = \frac{16 \cdot 6}{16 + 6} = 4,36 \text{ ч.}$$

Среднее время безотказной работы

$$T_c = \frac{1}{928 \cdot 10^{-9}} = 1077586 \text{ ч} = 123 \text{ года}$$

Вероятность безотказной работы системы за  $t=1$  год

$$P(t) = e^{-1 \cdot 0,00813} = 0,9919.$$

Вероятность отказа системы за  $t=1$  год

$$Q(t) = 1 - 0,9919 = 0,0081$$

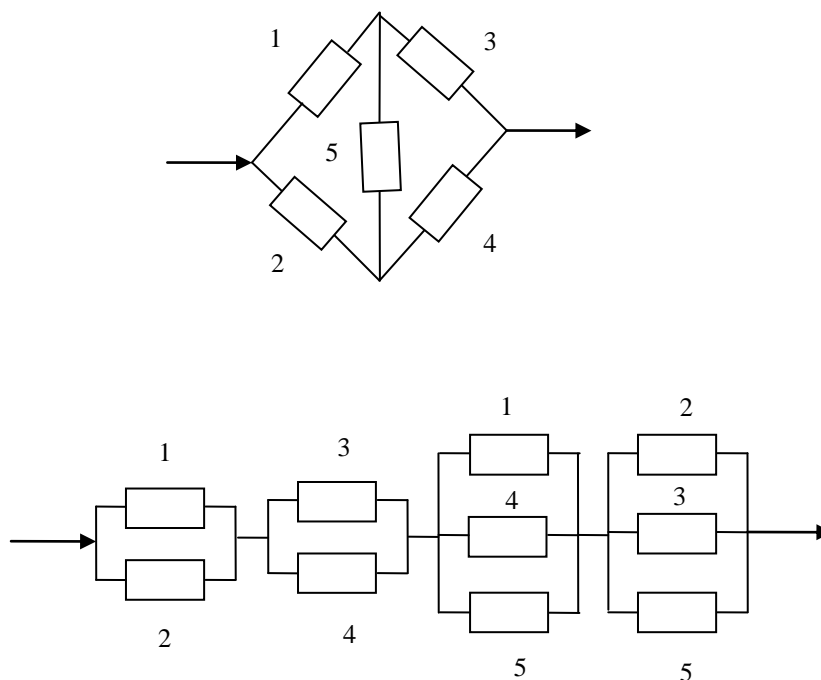
Коэффициент готовности

$$K_r = \frac{1077586}{1077586 + 4,36} = 0,999996$$

## МИНИМАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ

Существуют некоторые группы элементов, одновременный отказ которых приводит к разрыву всех путей, связывающих вход и выход структуры. Набор элементов, отказ которых приводит к отказу структуры (т.е. разрыву всех связей между входом и выходом) в теории надежности называется сечением. Если выявить все сечения, содержащиеся в исследуемой структуре, и определить их надежность, то можно определить надежность всей структуры.

В структуре, представленной на рис., сечения образуют наборы элементов: 1,2; 3,4; 1,2,5; 1,3,4; 1,4,5; 2,3,4; 2,3,5; 3,4,5; 1,2,3,4; 1,2,3,5; 1,2,4,5; 2,3,4,5; 1,2,3,4,5.



Среди множества сечений сложных структур имеются такие, которые образованы минимальным набором элементов – это минимальные сечения. Для структуры, представленной на рис. минимальными сечениями являются 1,2; 3,4; 1,4,5; 2,3,4. Действительно, если в любом из этих наборов убрать хотя бы по одному элементу, оставшийся набор уже не будет сечением.

В теории надежности выполнены исследования, которые доказывают, что надежность последовательно соединенных минимальных сечений структуры определяет нижнюю границу ее надежности. Причем, чем надежнее элементы, входящие в систему, тем точнее надежность совокупности минимальных сечений  $S$  отражает надежность всей структуры. Считаем с достаточной степенью точности, что для высоконадежных структур при соблюдении соотношения

$$\sum_{i \in S} t_{ei} \ll T_{\min}$$

надежность последовательно соединенных минимальных сечений является надежностью всей структуры.

Таким образом, приведенную на рис. структуру можно преобразовать в схему последовательно соединенных минимальных сечений, каждое из которых является параллельным соединением.

## МЕТОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМУЛЫ ПОЛНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ

По формуле полной вероятности определяется вероятность  $P(A)$  события  $A$  при известных условных вероятностях  $P(A|H_i)$  наступления события  $A$  и известных вероятностях гипотез  $P(H_i)$

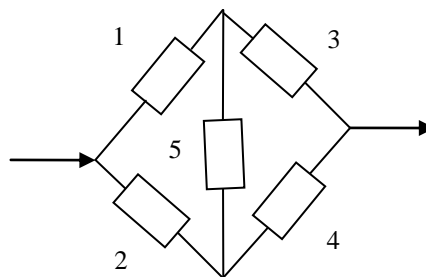
$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/H_i)H_i$$

С помощью формулы полной вероятности можно представить сложную схему в виде эквивалентной последовательно-параллельной. Рассмотрим основную идею этого способа на примере конкретной схемы без учета преднамеренных отключений элементов.

Формула полной вероятности для определения надежной работы схемы интерпретируется следующим образом. Вероятность любого события (в нашем случае работы системы относительно узла) вычисляется как сумма произведений вероятностей несовместимых гипотез (в качестве гипотезы рассматриваются либо работа, либо отказ любого элемента) и вероятности события (т.е. работы оставшейся части цепи) при этой гипотезе.

Применяя формулу полной вероятности к расчету вероятности безотказной работы любой схемы, можно сформулировать так называемую теорему разложения на множители. Надежность цепи с избыточностью равна произведению вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента цепи на вероятность безотказной работы оставшейся цепи (места подключения  $i$ -го элемента замкнуты накоротко) плюс произведение вероятности отказа того же  $i$ -го элемента на вероятность безотказной работы оставшейся цепи (места подключения  $i$ -го элемента разомкнуты), т. е. для выделенного в схеме элемента рассматриваются две независимые гипотезы.

Рассмотрим на примере мостиковой схемы (см. рис.) применение теоремы разложения, а следовательно, и формулы полной вероятности для определения показателей надежности сложных схем. Отказы узловых пунктов не учитываются. Относительно любого элемента схемы можно рассмотреть две несовместимые гипотезы: работа с вероятностью  $p$  и отказ его с вероятностью  $q$ .



В качестве такого элемента выбираем элемент 5. Тогда, применяя теорему разложения, нетрудно свести мостиковую схему к сумме двух цепей: параллельно-последовательной и последовательно-параллельной (рис.), методы расчета которых хорошо разработаны.

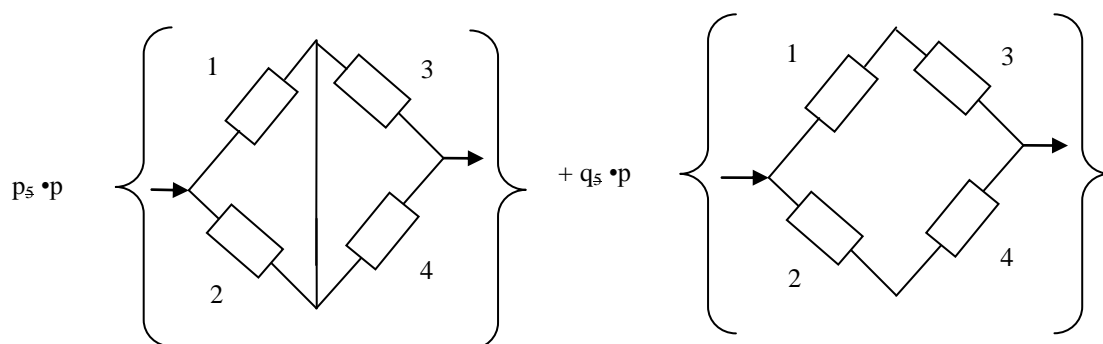


Рис. Диаграмма, иллюстрирующая применение теоремы разложения для схемы типа «мостик»

Вероятность безотказной работы этой схемы:

$$P = p_5(1-q_1q_2)(1-q_3q_4) + q_5(1-p_1p_3)(1-p_2p_4)$$

В этом выражении  $(1-q_1q_2)(1-q_3q_4)$  – вероятность безотказной работы схемы при первой гипотезе – безотказной работе элемента 5; а  $(1-p_1p_3)(1-p_2p_4)$  – вероятность безотказной работы схемы при второй гипотезе – отказе элемента 5;  $p_5$  – вероятность первой гипотезы;  $q_5$  – вероятность второй гипотезы.

Формула полной вероятности и основанная на ней теорема разложения на множители играют большую роль при анализе надежности сложных схем, поскольку позволяют свести любую сложную схему к совокупности элементарных. Причем в сложной схеме эту теорему приходится применять многократно.

Метод оценки надежности, основанный на формуле полной вероятности, достаточно удобен, прост и нагляден в расчетах даже без применения ЭВМ относительно не больших по объему схем с небольшим числом ветвей и узлов, к которым можно отнести схемы внутризаводского электроснабжения.

Для схемы сложной конфигурации реализация этого метода с использованием ЭВМ осложняется выбором элементов, относительно которых производится разложение.

(из книги Волков Н. Г. Надежность электроснабжения. Учеб. пособие/ Том. политех. унт. – Томск, 2003. – 140 с.)

## УЧЕТ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ

### Последовательное соединение элементов

Если преднамеренные отключения считать независимыми событиями, то для последовательно соединенных элементов частота преднамеренных отключений, как и частота отказов, соответствует сумме преднамеренных отключений элементов

$$\lambda_{\Pi c} = \sum \lambda_{\Pi i}$$

при среднем времени обслуживания

$$t_{\Pi c} = \frac{\sum \lambda_{\Pi i} \cdot t_{\Pi i}}{\lambda_{\Pi c}},$$

где  $\lambda_{\Pi i}$ ,  $t_{\Pi i}$  - показатели преднамеренных отключений  $i$ -го элемента.

Однако при ремонте электрооборудования обычно отключаются несколько взаимосвязанных элементов, например, ЛЭП и понизительная подстанция, питающаяся по данной линии, трансформатор и шины распреустройства. Это означает, что суммарная частота преднамеренных отключений цепочки меньше суммы частот отдельных элементов.

Один из элементов цепочки, который чаще отключается, назовем базовым, а относительную частоту преднамеренных отключений остальных элементов по отношению к базовому – коэффициентом совпадения. Статистически он определяется как

$$K_{i/\bar{o}} = m_{i/\bar{o}}(t) / M_i(t),$$

где  $m_{i/\bar{o}}$  - число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента, произведенных совместно с преднамеренными отключениями базового элемента, за период  $t$ ;

$M_i$  - общее число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента.

С учетом коэффициента совпадения для цепочки последовательных элементов частота преднамеренных отключений

$$\lambda_{nc} = \lambda_{n\bar{o}} + \sum_{i=1, i \neq \bar{o}}^n \lambda_{ni} (1 - k_{i/\bar{o}}),$$

среднее время обслуживания

$$t_{nc} = \frac{\lambda_{n\bar{o}} \cdot t_{n\bar{o}} + \lambda_{n\max} \cdot (t_{n\max} - t_{n\bar{o}}) + \sum_{i=1, i \neq \bar{o}}^n \lambda_{ni} \cdot t_{ni} \cdot (1 - k_{i/\bar{o}})}{\lambda_{nc}}$$

где  $\lambda_{n\bar{o}}$  и  $t_{n\bar{o}}$  - частота преднамеренных отключений и среднее время обслуживания базового элемента;

$\lambda_{n\max}$  и  $t_{n\max}$  - то же элемента цепочки, у которого максимальное время обслуживания;  $n$  - число элементов в цепочке.

### Параллельное соединение

При параллельном соединении в случае простоя одного из элементов, неважно, по какой причине, второй элемент не выводится из работы.

Возможен случай, когда один элемент простаивает, а второй – отказывает. В этом случае, если система состоит из двух параллельных элементов, она отказывает. Частота отказов тогда представляется в виде трех слагаемых

$$\lambda_c = \lambda^0 + \lambda' + \lambda''$$

где

$$\lambda^0 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (t_{e1} + t_{e2})$$

$$\lambda' = \lambda_1 \cdot \lambda_{n2} \cdot n_2$$

$$\lambda'' = \lambda_2 \cdot \lambda_{n1} \cdot n_1$$

т.е. складывается из следующих возможностей отказа одного элемента во время простоя другого из-за отказа ( $\lambda^0$ ), отказа 1-го во время планового простоя второго ( $\lambda'$ ) и отказа 2-го во время планового простоя первого ( $\lambda''$ ).

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТАБЛИЧНО-ЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА

Расчет надежности таблично-логическим методом включает следующие этапы:

1. Задается расчетное время  $t_p$ , например, это может быть год или полное время эксплуатации схемы электрических соединений.
2. Задаются режимы работы рассматриваемой системы. Режимы могут отличаться как составом работающих элементов, так и показателями их надежности. С увеличением числа режимов  $\tau$  увеличивается трудоемкость расчетов, поэтому целесообразно ограничиться только существенно отличными режимами. Каждому  $j$ -му режиму ставится в соответствие вероятность (весовой коэффициент)

$$p_j = \frac{t_j}{t_p},$$

где  $t_j$  - длительность  $j$ -го режима, так, что  $\sum_{j=0}^m p_j = 1$ .

3. Определяется вектор расчетных событий  $i = 1, \dots, n$ , сочетание которых может привести к авариям. Расчетными событиями являются отказы элементов системы.

4. Определяется вектор аварий (видов отказов системы)  $k = 1, \dots, l$  системы, например: погашение первой секции; второй секции; третьей ...; полное погашение секций и т.п.

5. Составляется матрица расчетных связей с числом элементов  $m \times n$ . Элементы матрицы обозначают номера  $k$  видов отказов системы, к которому приводит отказ  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме работы системы.

6. Составляются матрицы  $n \times n$  развития аварий при повреждениях  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме, учитывающие отказы в срабатывании релейной защиты  $s$ -го элемента, ложные действия защит остальных элементов ( $s \neq i$ ), отказы автоматики и коммутационной аппаратуры. Общее число таких матриц равно  $m$ . Элементы матрицы соответствуют номеру  $k$ -виду отказа системы, к которому приводит отказ защиты или автоматики  $s$ -го элемента при повреждении  $i$ -го элемента.

7. Определяется среднее число отказов  $k$ -го вида для системы за время  $t_p$ :

$$\lambda_{CK} = t_p \cdot \sum_{j=0}^m \cdot \sum_{i=1}^n \cdot p_j \cdot (\lambda_{ij} \cdot x_{ij}^{(k)} + \lambda_{ij} \cdot S_{ijs}^{(k)} \cdot p_{si})$$

где  $x_{ij}^{(k)} = 1$ , если в матрице расчетных связей на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца находится элемент  $k$ ;  $x_{ij} = 0$  в остальных случаях;  $S_{ijs}^{(k)} = 1$ , если в матрице развития отказа системы в  $j$ -м режиме на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца находится элемент  $k$ ;  $S_{ijs}^{(k)} = 0$  в остальных случаях;



$\lambda_{ij}$  - интенсивность отказов  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме, включая ложные отключения от защиты и ошибочные отключения персоналом;  $p_{si}$  - вероятность отказа устройства релейной защиты и автоматики  $s$ -го элемента при повреждении  $i$ -го элемента.

К отказам выключателей относят и их отказы при отключении КЗ на присоединениях, поэтому в матрице развития аварий отказы выключателей не учитывают.

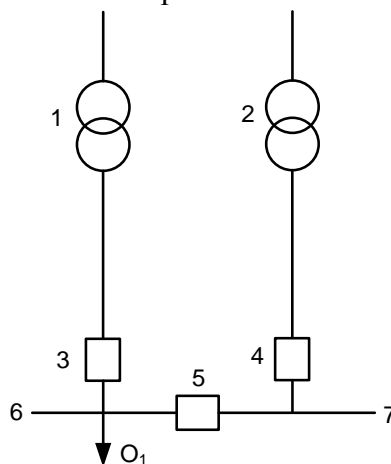
8. Определяется среднее время восстановления нормального режима работы системы после отказа  $k$ -го вида

$$T_{BK} = \frac{t_p \cdot \left( \sum_{j=0}^m \cdot \sum_{i=1}^n \cdot p_j \cdot (\lambda_{ij} \cdot x_{ij}^{(k)} \cdot \tau_{ij} + \lambda_{ij} \cdot S_{ij}^{(k)} \cdot p_{si} \cdot \tau_{ijs}) \right)}{\lambda c_K},$$

где  $\tau_{ij}$  - время восстановления нормальной работы при повреждении  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме (переключения, замена, ремонт);  $\tau_{ijs}$  - время восстановления при повреждении  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме и развития аварии из-за отказа РЗА  $s$ -го элемента.

### Пример расчета надежности электроснабжения таблично-логическим методом

Рассмотрим фрагмент схемы электроснабжения



Трансформаторы – элементы с порядковыми номерами 1 и 2.

Выключатели – элементы с порядковыми номерами 3, 4 и 5.

Секции шин – элементы с порядковыми номерами 6 и 7.

Необходимо определить надежность электроснабжения (среднее число отказов системы  $\lambda c_1$  и среднее время восстановления нормального режима работы системы  $T_{B1}$ ) для потребителя  $O_1$ , питающегося от секции шин (элемент 6), при известных параметрах надежности элементов 1 – 7.

1. Из справочных материалов получаем величины  $\lambda$  и  $\tau$  для всех элементов:

$\lambda_1=0.1$  1/год;  $\lambda_2=0.15$  1/год;  $\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5=0.05$  1/год;  $\lambda_6=\lambda_7=0.05$  1/год;

$\tau_1=80$  ч;  $\tau_2=100$  ч;  $\tau_3=\tau_4=\tau_5=4$  ч;  $\tau_6=\tau_7=5$  ч.

Количество профилактических ремонтов трансформаторов Т1, Т2  $\lambda_n=2$ , длительность ремонтов  $\tau_n=20$  ч.

2. Определяем вероятности для режимов.

Режимы - это длительные периоды времени, при которых происходит изменение в электрической схеме или временное изменение надежности элементов (режим «плохой погоды» и др.), в нашем случае это период ремонтных работ на трансформаторах.

Вероятности режимов  $j_1$  (в ремонте Т1),  $j_2$  (в ремонте Т2) составят:

$$p_1 = p_2 = \frac{\lambda_n \cdot \tau_n}{8760} = \frac{2 \cdot 20}{8760} = 0.0046.$$

Вероятность нормального режима  $j_0$ :

$$p = 1 - (p_1 + p_2) = 0.9908.$$

Рассмотрим один вид отказа системы:  $k1$  – потеря питания объекта О1.

Составим матрицу расчетных связей.

Матрица расчетных связей состоит из номеров элементов  $i$  (по вертикали) и видов режимов  $j$  (по горизонтали). На пересечении указан вид аварии системы, вызванный отказом  $i$ -го элемента в  $j$ -м режиме.

Матрица расчетных связей.

I	Номер аварий в режимах		
	$j_0$	$j_1$	$j_2$
1	-	-	1
2	-	1	-
3	-	-	1
4	-	1	-
5	-	1	-
6	1	1	1
7	-	1	-

Составим матрицу развития событий.

Матрица развития событий содержит информацию о развитии аварии из-за отказа в срабатывании РЗА в нормальном режиме ( $j_0$ ). Учтем отказы защит элементов 1 и 2. Величины вероятностей  $p_{si}$  примем равными 0.05, величины  $\tau_{ijs}$  равными 1 ч.

Матрица развития событий.

I	Номер аварий при отказах защит s-го элемента						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-

Ввиду малой длительности ремонтных режимов развития аварий в них при определении надежности системы не учитываем.

Среднее число отказов системы составит:

$$\lambda c_1 = p_1(\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) + p_2(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_6) + p_0(\lambda_6 + \lambda_1 \cdot p_{11}) = 0,057$$

1/год.

Среднее время восстановления нормального режима работы системы после отказа:

$$T_{B1} = 1 \cdot \frac{p_1(\lambda_2 \cdot \tau_2 + \lambda_4 \cdot \tau_4 + \lambda_5 \cdot \tau_5 + \lambda_6 \cdot \tau_6 + \lambda_7 \cdot \tau_6) + p_2(\lambda_1 \cdot \tau_1 + \lambda_3 \cdot \tau_3 + \lambda_6 \cdot \tau_6)}{\lambda_{ср}} + \frac{p_0(\lambda_6 \cdot \tau_6 + \lambda_1 \cdot p_{11} \cdot \tau_{11})}{\lambda_{ср}} = 6.377 \text{ ч}$$

## ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

(из книги Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: в 5 кн.: Практическое пособие/Под ред. В.А.Веникова. Кн. 3. Надежность и эффективность сетей электрических систем/Ю.А. Фокин. – М.: Высш. Шк., 1989. – 151 с.)

Линии электропередач (ЛЭП) – наиболее часто повреждаемые элементы электрических систем из-за территориальной рассредоточенности и подверженности влиянию внешних неблагоприятных условий среды.

Основные причины повреждений *воздушных* ЛЭП: наличие гололедно-ветровых нагрузок, перекрытий изоляции вследствие грозových разрядов; повреждение опор и проводов автотранспортом и другими механизмами; дефекты изготовления опор, проводов, изоляторов; перекрытия изоляции из-за птиц; несоответствия опор, проводов, изоляторов природно-климатическим зонам страны; неправильный монтаж опор и проводов; несоблюдение сроков ремонта и замены оборудования.

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

Вибрация, «пляска» и обрыв проводов, разрушение опор или их частей сопровождаются, как правило, короткими замыканиями (одно – и многофазными) ЛЭП.

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

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

Вследствие старения и износа изоляции (междуфазной и поясной), попадания влаги в кабельную линию, коррозии металлических частей, усиливающейся при появлении блуждающих токов, возникновения неравномерностей в вязкой пропитке по длине кабеля из-за разности уровней по горизонту повреждения возникают существенно реже.

Повреждения кабельных линий также сопровождаются короткими замыканиями.

Продолжительность восстановления кабельных линий существенно больше по сравнению с воздушными и составляет десятки часов.

*Силовые трансформаторы* повреждаются реже, чем ЛЭП, по их восстановлению требует более продолжительного времени.

Основными причинами повреждения трансформаторов являются:

- нарушения изоляции обмоток вследствие воздействия внешних и внутренних перенапряжений, сквозных токов коротких замыканий, дефектов изготовления. Причинами повреждения изоляции обмоток трансформаторов зачастую являются износ и старение ее вследствие перегрузок, недостаточного охлаждения. Трансформаторы выходят из строя также вследствие повреждения устройств, регулирующих напряжения (особенно автоматических под нагрузкой);
- повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции;
- повреждения контактных соединений;
- упуска масла.

Ремонт трансформаторов малых габаритов (до 20 кВ) производится централизованно, а поврежденный трансформатор заменяется в течение короткого времени (единицы часов). Ремонт трансформаторов больших габаритов осуществляется на месте достаточно длительное время (десятки и сотни часов), при этом применяются подъемные механизмы.

*Коммутационные аппараты* являются более сложными с точки зрения надежности объектами электрической системы. Они подразделяются на автоматические (выключатели, отделители с короткозамыкателями, автоматы, предохранители) и неавтоматические (разъединители и рубильники). Повреждения коммутационных аппаратов происходят при выполнении ими операций (отключение коротких замыканий, нагрузок, оперативных переключениях и др.) и в стационарном состоянии.

Основными причинами повреждения коммутационных аппаратов являются: несрабатывание приводов, механические повреждения, износ дугогасительных камер, обгорание контактов, перекрытие изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях.

Отказы устройств релейной защиты и автоматики в расчетах надежности электрических сетей часто также учитываются в отказах выключателей. При моделировании отказов выключателей все повреждения целесообразно привести к двум видам (с точки зрения последствий для системы): отказы выключателя, приводящие к необходимости срабатывания смежных выключателей с одной стороны (левой или правой, в том числе и его ложное срабатывание), и отказы выключателей, приводящие к необходимости срабатывания смежных выключателей с двух его сторон (левой и правой, в том числе и отказы в стационарном состоянии). Отказы также подразделяются на отказы при отключении и включении, например при автоматическом вводе резерва (ABP).

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

Коммутационные аппараты в отличие от ЛЭП и трансформаторов относятся к элементам дискретно-непрерывного действия, поэтому их модели в расчетах надежности, как правило, более сложных по сравнению с моделями элементов непрерывного действия.

Элементы электрических сетей, которые подвергаются аварийному ремонту после возникновения повреждений, нередко подвергаются также и профилактическому, предупредительному ремонту, осуществляемому в тех случаях, когда отдельные части элементов изношены. Такой ремонт увеличит интервал времени между отказами. Это обстоятельство позволяет сделать предположение, что элемент после аварийного ремонта восстанавливается до состояния «нового».

Работа реального элемента электрической сети в установившемся режиме практически не зависит от вида распределений продолжительности работы и продолжительности восстановления и достаточно хорошо отражается поведением элемента с показательными распределениями этих интервалов времени.

Для неустановившихся значений вероятностей состояния (работы или отказа) виды распределений оказывают более существенное влияние, особенно на вероятность нахождения в состоянии отказа. Однако следует иметь в виду, что значительное усложнение математических моделей по сравнению с показательными часто не оправдывается достигаемыми значениями уточнений результатов.

## УЩЕРБ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОСНАБЖАЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИЙ ОТ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В результате расчета показателей надежности можно определить ущерб, связанный с перерывами электроснабжения, и сравнить варианты систем электроснабжения по величине приведенных затрат:

$$Z = e_n K + I + Y.$$

Ущерб от перерыва электроснабжения складывается из двух составляющих: ущерба, связанного с самим фактом перерыва электроснабжения, и ущерба, связанного с длительностью перерыва электроснабжения. Ущерб разделяют также на первичный и вторичный. Первичный ущерб – ущерб, вызванный перерывом электроснабжения данного агрегата или объекта. Вторичный ущерб – ущерб, вызванный перерывом электроснабжения предыдущего агрегата или объекта по ходу технологии производства.

**Для потребителей можно** выделить следующие существенные факторы, определяющие величину ущерба от перерывов электроснабжения [ Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Магнитогорск, 2006 г. ]:

- тип потребителя и характер его производства;
- величину недополученной электроэнергии ( $\Delta W$ );
- глубину ограничения по мощности ( $\Delta P$ );
- время ограничения ( $t_{огр}$ );
- момент наступления ограничения (степень внезапности);
- наличие технологических и иных резервов.

Перерыв электроснабжения приводит к нарушению технологического процесса, простоя рабочих и оборудования, недоиспользованию, непроизводительному расходу или уничтожению сырья, снижению качества продукции и т.п.

Расчетный экономический ущерб потребителя от перерыва электроснабжения имеет три составляющих:

$$Y = Y_0 + Y' + Y'',$$

где  $Y_0$  – ущерб внезапности, т.е. ущерб потребителя, связанный с нарушением технологического процесса, повреждением технологического оборудования и сырья при непредсказуемом аварийном отказе электроснабжения;

$Y'$  – первичный ущерб, вызванный перерывом электроснабжения данного потребителя (предприятия или технологического агрегата);

$Y''$  – вторичный ущерб в результате вынужденного простоя следующей технологической ступени или смежного предприятия.

Ущерб внезапности зависит от того, к отключению каких электроприемников приводит отказ в системе электроснабжения. Потеря питания электроприемников аварийной брони связана с повреждением оборудования, инструмента, возможностью взрывов, пожаров и других аналогичных последствий. Внезапные отключения электроприемников технологической брони приводят к порче сырья и потере продукции (если время ограничения больше допустимого, после которого наступает срыв технологического процесса), а также к затратам времени и ресурсов на восстановление нормального технологического режима.

Для оценки первичного ущерба в приближенных расчетах и при проектировании удобно пользоваться относительной величиной удельного ущерба на единицу потребляемой электроэнергии или на единицу продукции, которая является примерно постоянной для родственных предприятий каждой отрасли:

а) если известна величина удельного ущерба  $y_t$  (руб./ед.прод.):

$$Y' = y_t \cdot t_{\text{вс}} \cdot \lambda_c \cdot \Pi = y_t \cdot k_{\Pi} \cdot \Pi,$$

где  $\lambda_c$  – средняя частота отказов;

$t_{\text{вс}}$  – среднее время восстановления;

$\Pi$  – средний выпуск продукции предприятия (ед.прод.);

$k_{\Pi}$  – коэффициент простоя ( $k_{\Pi} = t_{\text{вс}} \cdot \lambda_c$ ).

б) если известна величина удельного ущерба  $y_{t/W}$  (руб./кВт·ч)

$$Y' = y_{t/W} \cdot t_{\text{вс}} \cdot \lambda_c \cdot P_c = t_{\text{вс}} \cdot \lambda_c \cdot \Delta W$$

где  $P_c$  – средняя электрическая нагрузка предприятия в нормальном режиме;

$\Delta W$  – недоотпуск электроэнергии ( $\Delta W = t_{\text{вс}} \cdot \lambda_c \cdot P_c$ ).

Аналогично определяется вторичный ущерб.

Ущерб энергоснабжающих организаций из-за отказов в электрических сетях складывается из следующих составляющих:

- затраты на аварийный ремонт(восстановление) оборудования или потери, связанные с его недоамортизацией при досрочной ликвидации;
- стоимость дополнительных потерь электроэнергии в сети из-за отклонения электрического режима от оптимального;
- стоимость топлива, расходуемого на пуск энергоблоков, растопку котлоагрегатов и поддержание горения в топках во время аварийной разгрузки или останова агрегатов электростанций;
- затраты на демонтаж и транспортировку оборудования при отправке на ремонт;
- дополнительные затраты на выработку электроэнергии на замещающих агрегатах;
- затраты на содержание резервного оборудования;
- потери, связанные с простоем оборудования и обслуживающего персонала, при аварийном отключении потребителей;
- ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям при отключении с предупреждением во время прохождения максимума;
- ущерб от внезапного отключения потребителей и недоотпуска энергии за время восстановления электроснабжения.

## Литература

1. ГОСТ 27.002-89.Надежность в технике. Основные определения.
2. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: в 5 кн.: Практик. пособие/Под ред. В.А.Веникова. Кн. 3. Надежность и эффективность сетей электрических систем/Ю.А. Фокин. – М.: Высш. Шк., 1989. – 151 с.
3. Надежность систем электроснабжения. Учебное пособие для ВУЗов. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984.
4. Меньшов Б.Г. Ершов М.С. Надежность электроснабжения газотурбинных компрессорных станций. – М.: Недра, 1995. – 283 с.
5. Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. - М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. - 92 с; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик"; Вып. 12(36)]

В зарубежной и отечественной литературе по надежности в электроэнергетике можно выделить три основных направления исследований:

- а) надежность электрических станций и подстанций;
- б) надежность электрических сетей энергосистем;
- б) надежность систем электроснабжения.

Наиболее отработаны инженерные методы расчета надежности распределительных устройств. Меньше единства в подходах к формализованному расчету надежности распределительных сетей, что подтверждается и значительным числом существующих методик, хотя эти методики тоже находят применение в инженерной практике.

Аналитический метод расчета надежности электроснабжения основан на принципе представления связи между элементами в виде расчетных схем последовательного и параллельного соединений. Такими схемами можно описать отключение потребителей, как из-за отказов элементов питающей цепи, так и из-за отказов элементов одной цепи с ремонтом элементов другой цепи. Метод позволяет также учитывать различную длительность отключения составлением расчетных схем для разных видов отключений. Метод позволяет оценить следующие показатели надежности схемы электроснабжения: частоту и длительность отключений различных потребителей. Недостатком метода является то, что он не учитывает влияние релейной защиты на надежность системы и обладает громоздким математическим аппаратом.

Логико-вероятностный метод расчета надежности электроснабжения с использованием дерева отказов является дедуктивным методом и применяется, когда число различных видов отказов системы сравнительно невелико. Метод позволяет определить вероятностную частоту отказов системы. Недостатками метода является проблематичность его использования при наличии относительно большого числа различных видов отказов системы, не учитывается вероятное время, которое потребуется на восстановление нормального режима работы оборудования.

Метод с использованием формулы полной вероятности позволяет с помощью формулы полной вероятности представить сложную схему в виде эквивалентной последовательно параллельной. Метод позволяет определить вероятную частоту отказов системы. Недостатками метода являются то, что он не учитывает вероятное время, которое потребуется на восстановление нормального режима работы оборудования и громоздкий математический аппарат.

Таблично-логический метод является одним из наиболее удачных методов расчетов надежности схем главных электрических соединений систем электроснабжения. Данный метод учитывает аварийные ситуации в системе, возникающие при наложении

отказов одних элементов на ремонтные и аварийные простои других. Метод позволяет определить вероятное число отказов элемента за определенный период времени и вероятное время, которое потребуется на восстановление нормального режима работы оборудования.