

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

Д. С. Александров, Е. Ф. Щербаков

НАДЁЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

г. Ульяновск
2010

УДК 621. 31

ББК 31. 29

А 46

Рецензент, доцент УГУ Амброзевич А. С.

Одобрено в качестве учебного пособия секцией методических пособий научно-методического совета университета

Александров, Д. С.

Надёжность и качество электроснабжения предприятий: учебное

А 46 пособие / Д. С. Александров, Е. Ф. Щербаков.— Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 155 с.

ISBN 978 – 5 – 9795 –0828-3

Рассматриваются электротехнические устройства, представляющие собой источники и электроприёмники электроэнергии на предприятиях, их взаимное влияние друг на друга и электромагнитная совместимость в системах электроснабжения, качество и надёжность электроснабжения.

В разделе, посвящённом качеству электроэнергии, рассмотрены показатели качества электроэнергии, влияние качества электроэнергии на работу электроприёмников, методы улучшения показателей качества электроэнергии, поясняются основные положения ГОСТ 13109–97 на качество электроэнергии. Рассмотрены особенности вновь введённых стандартов ГОСТ Р 51317.4.7–08 и ГОСТ Р 51317.4.30–08.

В разделе, посвящённом надёжности систем электроснабжения предприятий, изложены основные положения теории надёжности, дана характеристика показателей надёжности систем электроснабжения предприятий.

Предназначена для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю подготовки «Электроснабжение», а так же студентам электротехнических специальностей образовательных учреждений высшего и среднего профессионального образования по дисциплине «Электроснабжение».

УДК 621. 31

ББК 31. 29

© Александров Д. С., Щербаков Е.Ф., 2010

©Оформление УлГТУ, 2010

ISBN 978 – 5 – 9795 – 0828-3

ВВЕДЕНИЕ

Электроприёмники (ЭП) в системе электропотребления различных предприятий (промышленных, добывающих и перерабатывающих отраслей экономики, предприятий агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства, транспорта, строительства, бытовых потребителей) широко потребляют электрическую энергию благодаря её универсальности, возможности преобразования в другие виды. Для обеспечения электроэнергией электроприёмников на предприятиях формируется система электроснабжения (СЭС).

Система электроснабжения представляет собой совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи и распределения электроэнергии (генераторы, трансформаторы, электрические аппараты распределения электроэнергии и управления электроприёмниками). Каждое из этих устройств является промышленной продукцией, должно обладать необходимым уровнем качества и быть надёжным в условиях выполнения функциональных функций.

Качеством любого технического объекта является совокупность его характеристик, определяющих потребительские свойства связанных с возможностью удовлетворения продукцией установленных и предполагаемых требований и ожиданий.

В системе электроснабжения каждый элемент может оказаться некачественно спроектированным, изготовленным, смонтированным, что скажется на надёжности его работы, на надёжности системы в целом. Качество и надёжность технических устройств взаимосвязаны.

Под надёжностью электроснабжения понимается непрерывное обеспечение электроэнергией СЭС электроприёмников, осуществляющих преобразование электроэнергии в другие виды энергии.

Электрическая энергия является также видом продукции, производимой на электростанциях и используемой во всех сферах человеческой деятельности. Однако она является особым видом продукции, которую нельзя производить впрок, складировать, возратить поставщику, если есть претензии к её показателям. Электроэнергия обладает определёнными характеристиками, позволяющими определять её пригодность в различных производственных и бытовых процессах.

Электроэнергия участвует при производстве других видов продукции, влияя на их качество, на надёжность работы и производительность технологического оборудования.

Потребители электроэнергии получают её от энергетических систем и собственных электростанций по распределительным сетям. Электроприёмниками электроэнергии являются нагреватели, электродвигатели, сварочные агрегаты, выпрямительные устройства, радиоэлектронная аппаратура, высокочастотные установки, осветительные установки. Все эти электроприёмники могут быть включены в одну распределительную электрическую сеть (ЭС) и оказывать определённое влияние друг на друга.

К электрическим сетям предприятий предъявляются следующие основные требования по обеспечению определённых показателей:

- качества передаваемой электроэнергии, как вида продукции;
- надёжности электроснабжения;
- безопасности электротехнического и неэлектротехнического персонала при эксплуатации сетей и электроустановок;
- экономичности, то есть снижения затрат при сооружении и эксплуатации сетей и установок;
- изменения конфигурации сетей в связи с изменением технологии производства;
- снижения потерь электроэнергии в сетях;
- экологичности, то есть отсутствия вредного влияния на окружающую среду.

При определённых режимах отдельные электроприёмники оказывают влияние друг на друга через электрическую сеть, к которой они присоединены. В этом случае необходимо говорить об электромагнитной совместимости электроприёмников и электрической сети.

Большинство электроприёмников потребляют из сети не только активную энергию (мощность), которая преобразуется в другие виды, но и реактивную мощность. Передача реактивной мощности по электрическим сетям предприятий приводит к повышенным потерям электроэнергии в сетях и к дополнительным затратам средств на оплату электроэнергии.

Применительно к СЭС эти свойства включают безопасность, непрерывность электроснабжения и быструю восстанавливаемость после повреждения каких-либо элементов, обеспечение необходимых показателей качества электроэнергии и минимальных её потерь, возможность замены и перестановки технологического оборудования.

СЭС должна быть надёжной, то есть обеспечивать бесперебойность электроприёмников электроэнергией.

При проектировании СЭС предприятий возникает необходимость решения задач, которые требуют совмещения ряда противоречивых требований – таких, как экономия капитальных затрат на сооружение и эксплуатацию СЭС и её высокий уровень качества и надёжности.

В системах электроснабжения уделяется большое значение качеству электроэнергии, показателям качества электроэнергии, установленным в нормативной документации. Показатели качества электроэнергии должны соблюдаться и поставщиками и потребителями электроэнергии.

При решении задач по оптимизации СЭС, должны определяться последствия нарушения нормального режима электроснабжения предприятий. Анализ СЭС по надёжности позволяет:

- выбрать вариант схем электроснабжения с более высокой надёжностью;
- выбрать различные виды оборудования;
- рассчитать показатели надёжности системы;
- оценить наработку на отказ элементов системы;
- определить экономические показатели при перерыве электроснабжения;
- задавать требования к надёжности для вновь разрабатываемых систем.

В основу оптимального выбора схем электроснабжения должны быть положены минимум приведённых капитальных затрат с ежегодными издержками на эксплуатацию и математическое ожидание ущерба от перерывов и ограничений электроснабжения.

Рассмотрению этих важных вопросов посвящено настоящее пособие.

1. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Все элементы в системах электроснабжения предприятий принадлежат каким-либо электроустановкам, среди которых можно выделить:

- установки, производящие электроэнергию – электрические станции;
- установки, предназначенные для передачи, преобразования и распределения электроэнергии;
- установки, потребляющие электроэнергию.

Важным параметром электроустановок является напряжение. Электроустановки по напряжению делят на установки напряжением до 1000 В (до 1 кВ) и выше 1000 В (выше 1 кВ).

Электроустановки до 1000 В имеют номинальные напряжения (380, 660, 1140) В. Напряжение 1140 В применяется в шахтных электроустановках, в ЭС добывающих отраслей промышленности. В однофазных установках применяется напряжение 220 В. В установках с повышенной опасностью применяется напряжение до 48 В, получаемое через трансформаторы.

Электроустановки выше 1 кВ, применяемые на предприятиях, имеют напряжение (6, 10, 20, 35, 110, 220) кВ. В энергосистемах для передачи электроэнергии на большие расстояния используются напряжение (330, 500, 750, 1150) кВ. При проектировании электроустановок при выборе напряжения отдают предпочтение напряжению 10 кВ по сравнению с напряжением 6 кВ, так как при этом обеспечивается снижение потерь мощности и напряжения в сетях. Напряжение 6 кВ продолжает использоваться в установках ранее введённых в эксплуатацию, когда их перевод на напряжение 10 кВ из-за замены большого количества оборудования становится не рациональным.

Источниками электроэнергии являются генераторы на электростанциях. Однако из-за их удалённого расположения от потребителей за источник электроэнергии, кроме выводов генераторов, принимают выводы трансформаторов, шины распределительных устройств.

1.1. Генераторы электростанций

Совокупность электроустановок, на которых вырабатывается электроэнергия, называется *электростанцией*. Электростанция может быть в составе предприятия или самостоятельным предприятием, имеющим статус юридического лица. В зависимости от технологии производства электроэнергии различают электростанции тепловые, атомные, гидравлические, ветровые, солнеч-

ные. Для выработки электроэнергии на электростанциях применяются синхронные генераторы трёхфазного переменного тока. Приводными двигателями синхронных генераторов могут быть паровые и газовые турбины, гидравлические турбины, двигатели внутреннего сгорания. Генераторы, рассчитанные на высокие частоты вращения (1500, 3000) об/мин и приводящиеся в движение от паровых турбин, называются турбогенераторами, рассчитанные на низкие частоты вращения (60 – 600) об/мин и приводящиеся от гидротурбин, – гидрогенераторами.

На электростанциях промышленных предприятий широко применяются дизель-генераторы. Турбо- и гидрогенераторы рассчитаны на большие мощности и напряжение (6,3; 10,5; 20) кВ, дизель-генераторы – на средние и малые мощности и напряжение до 1 кВ.

Для отвода тепла от обмоток статора и ротора применяется охлаждение (воздушное, водяное, масляное, водородное).

Для возбуждения синхронных генераторов в качестве возбuditелей применяются генераторы постоянного тока. Для возбуждения мощных генераторов применяются системы возбуждения с полупроводниковыми выпрямителями.

От мощных электростанций электроэнергия передаётся на большие расстояния для электроснабжения крупных предприятий, городов. Электроэнергия от электростанций предприятий используется, в основном, для нужд этих предприятий и может передаваться близко расположенным предприятиям, в жилые дома, объекты соцкультбыта.

1.2. Трансформаторы на подстанциях

Для передачи электроэнергии от электростанций на большие расстояния и её распределения применяются трансформаторы. Устанавливаются они на трансформаторных подстанциях. Подстанцией называется установка, содержащая трансформатор или иной преобразователь электроэнергии, распределительное устройство, электрооборудование управления, защиты, автоматики и измерений. Трансформаторные питающие подстанции могут входить в состав энергосистем (районные подстанции) или промышленных предприятий (главные подстанции предприятий). Они работают при напряжениях (35 – 220)/(6 – 20) кВ. Самыми массовыми являются потребительские подстанции с напряжениями (6 – 20)/(0,4 – 1,0) кВ. Следует отметить, что напряжение 20 кВ применяется весьма редко, наиболее распространённым на этом отрезке напряжений самым распространённым является напряжение 10 кВ. Кроме трансформаторных подстанций применяются преобразовательные подстанции (например, для электроснабжения электрифицированного транспорта), подстанции для электроснабжения технологических установок при нестандартных напряжениях.

На электростанциях устанавливаются повышающие трансформаторы, в местах распределения электроэнергии – понижающие. Трансформаторы по количеству фаз применяются трёхфазные (в основном) и однофазные. По количеству обмоток различного напряжения на каждую фазу трансформаторы разде-

ляются на двухобмоточные и трёхобмоточные. В некоторых конструкциях трансформаторов обмотки низшего напряжения могут иметь две ветви (трансформаторы с расщепленными обмотками).

В системах электроснабжения применяются также автотрансформаторы. Однофазные автотрансформаторы имеют электрически связанные обмотки. Объединённая обмотка, как правило, подключается к питающей линии, с части обмотки снимается нагрузка. Однофазные автотрансформаторы собираются в трёхфазную группу, применяются также и трёхфазные автотрансформаторы.

С целью повышения пропускной способности трансформаторов они имеют искусственное охлаждение (масляное, масляное с дутьём и циркуляцией масла; масляно-водяное).

Трансформаторы в процессе работы допускают систематические перегрузки (в период вечернего максимума нагрузки), если в другое время суток он не догружен до расчётного значения нагрузки. В аварийных режимах допускается аварийная перегрузка трансформаторов до 140 % в течение 6 ч. Максимальная аварийная нагрузка не должна превышать двукратной номинальной мощности трансформатора.

Для обеспечения нормальной работы потребителей необходимо поддерживать определённый уровень напряжения на шинах распределительных устройств. В трансформаторах предусматривается регулирование напряжения изменением коэффициента трансформации трансформаторов путём переключения ответвлений от обмоток. Переключение ответвлений от обмоток может происходить без возбуждения (ПБВ), после отключения всех обмоток от сети или под нагрузкой (РПН).

Устройство ПБВ трансформаторов малой мощности позволяет регулировать напряжение в пределах $\pm 5\%$, что обеспечивается наличием двух ответвлений от обмотки высшего напряжения: $+5\%$ и -5% . При необходимости повысить напряжение на вторичной обмотке U_2 нужно произвести переключение на ответвление -5% , то есть уменьшить количество витков первичной обмотки w_1 . На трансформаторах средней и большой мощности предусматривается четыре ответвления $\pm 2 \times 2,5\%$. Переключение ответвлений производится переключателем барабанного типа, установленным в каждой фазе. Устройство регулирования напряжения под нагрузкой позволяет переключать ответвления ступенями около $1,5\%$ в пределах от $\pm 10\%$ до $\pm 16\%$. Переключение производится без разрыва цепи. При этом не допускается наличие короткозамкнутых витков.

1.3. Системы электроснабжения и электрические сети предприятий

Электрическая энергия от электростанций передаётся потребителям на дальние расстояния по линиям электропередачи. Совокупность электрических и тепловых станций, трансформаторных подстанций, линий электропередачи и тепловых сетей называется энергетической системой. Часть энергетической системы, связанная с производством, передачей и распределением электроэнергии называется электроэнергетической системой.

Возможный вариант системы электроснабжения предприятия, включая обеспечение электроэнергией отдельных электроприёмников, представлен на рис. 1.1.

Электрической сетью предприятия называется совокупность электростанций, подстанций, распределительных устройств и электроприёмников, связанных между собой линиями электропередачи. Линии электропередачи выполняются голыми проводами на опорах (воздушные линии) или кабелями (кабельные линии).

Электрическая сеть предприятия является системой внутреннего электроснабжения предприятия. Она является продолжением электрической сети энергосистемы, которая представляет собой систему внешнего электроснабжения предприятия. В свою очередь система электроснабжения предприятия является подсистемой технологической системы предприятия. Электрическая энергия является движущей силой машин и механизмов и в то же время она входит в состав продукции предприятия наравне с трудозатратами, материалами, комплектующими изделиями.

Линией электропередачи называется устройство для передачи электроэнергии. Если передача осуществляется по проводам, закреплённым с помощью изоляторов на опорах, то такую линию называют воздушной линией электропередачи.

Воздушные линии. В качестве проводников воздушной линии, чаще всего, применяют голые (неизолированные) провода. Материалом проводов является медь, алюминий, их сплавы и сталь. По конструкции провода бывают однопроволочными, многопроволочными, полыми и биметаллическими. Однопроволочные провода выполняют сечением до 10 мм^2 , многопроволочные – до 700 мм^2 . Сталеалюминевые провода имеют стальную оцинкованную проволоку в качестве сердечника и два-три повива алюминиевых проволок вокруг сердечника. Применяют их при необходимости повысить механическую прочность и электрическую проводимость. Полые и биметаллические провода применяют очень редко.

Вместе с проводами на опорах линии закрепляются грозозащитные тросы.

В качестве опор воздушной линии электропередачи могут применяться металлические, железобетонные и деревянные опоры. Материал опор выбирается в зависимости от механических усилий, действующих на опоры от тяжения провода, воздействия силы ветровой нагрузки и от воздействия гололеда.

По назначению опоры делят на промежуточные, анкерные, угловые и концевые.

Наиболее распространёнными на линиях являются промежуточные опоры – (80 – 90) % от общего количества опор. Они воспринимают вертикальную нагрузку от тяжения проводов, изоляторов, льда и самой опоры. При обрыве провода промежуточная опора должна принять продольную силу неуравновешенного тяжения провода в одном из пролётов.

Анкерные опоры устанавливают через (2 – 3) или (3 – 5) км и рассчиты-

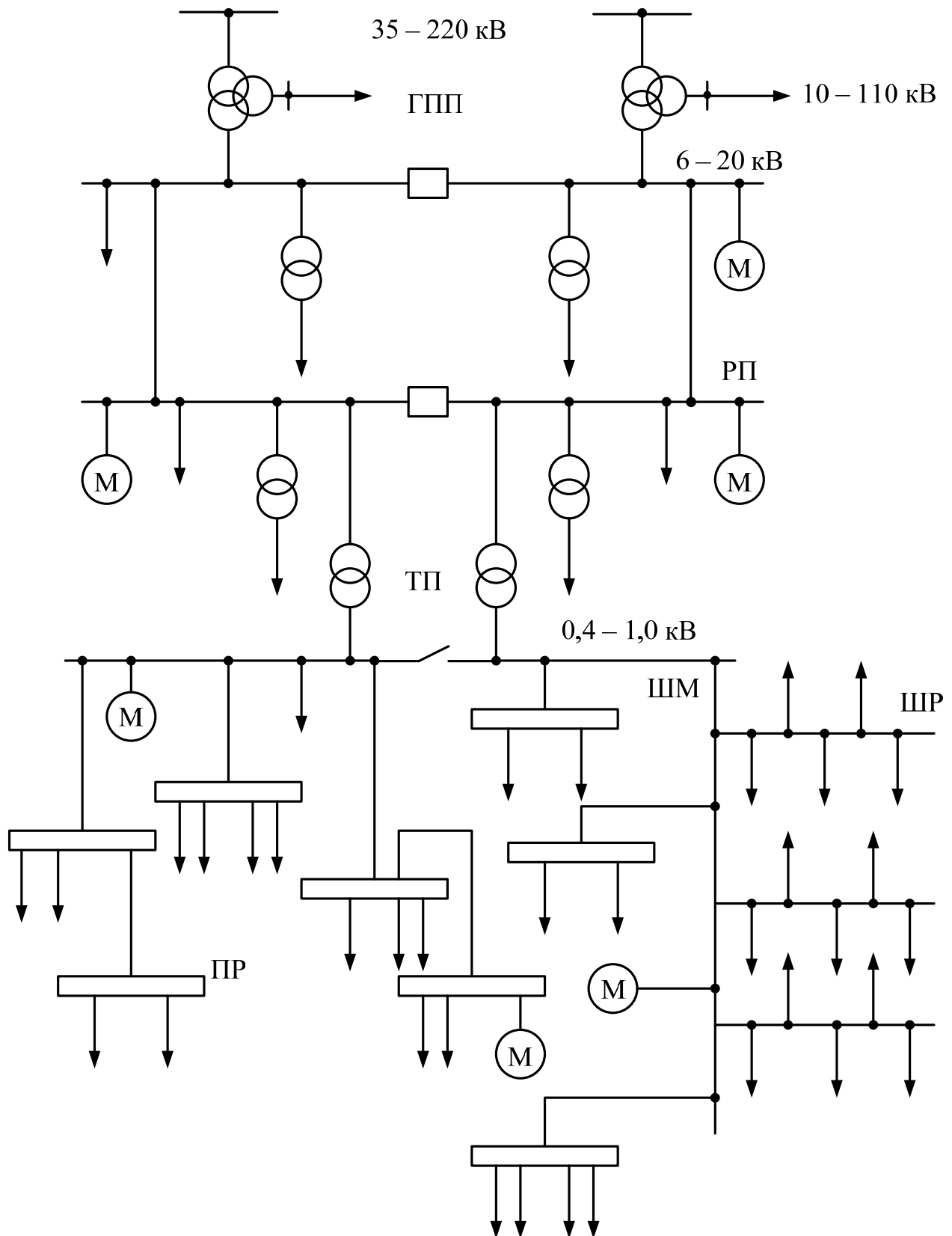


Рис. 1.1. Система электроснабжения предприятия:
 ГПП – главная понизительная подстанция; ТП – трансформаторная подстанция;
 М – двигатель; ШМ – магистральный шинопровод; ШР – распределительный
 шинопровод; РП – распределительный пункт

вают на обрыв всех проводов. В местах поворота линии устанавливают угловые опоры. Концевыми опорами являются опоры ближайшие к подстанциям. На промышленных предприятиях обычно применяются промежуточные и концевые опоры.

На опорах закрепляются провода одной трёхфазной цепи (одноцепные линии) или двух цепей (двухцепные линии).

Провода на опорах закрепляются с помощью изоляторов. Применяются штыревые и подвесные изоляторы. Материалом изоляторов является фарфор и стекло. Изоляторы крепятся на штырях и крюках, закрепляемых на траверсах, перекладинах или непосредственно в теле деревянной опоры. Изоляторы могут собираться в гирлянды. Применяются натяжные и подвесные гирлянды.

Кабельные линии. Кабель состоит из изолированных токоведущих жил, находящихся в защитной герметичной оболочке, которая может быть защищена от механических повреждений броней. Силовые кабели выпускаются на напряжение до 110 кВ. Кабели могут иметь от одной до четырёх медных или алюминиевых жил. Жилы сечением до 16 мм² однопроволочные, свыше – многопроволочные. Преимущественное применение находят кабели с алюминиевыми жилами. Кабели с медными жилами применяются только для подвижных механизмов, во взрывоопасных и загрязнённых средах.

Изоляция жил выполняется из кабельной бумаги, пропитанной маслоканифольным составом, резины, поливинилхлорида и полиэтилена. Защитная оболочка предохраняет изоляцию от воздействия влаги, газов, кислот и механических повреждений. Броня кабелей выполняется из стальных лент или проволок. Поверх брони кабели имеют джутовый покров. Джут (кабельная пряжа) пропитывается битумом. При прокладке кабелей в помещениях джут снимается во избежание возможного возгорания. Возможен покров кабелей в виде шланга из поливинилхлорида.

Для применения в цепях управления, контроля и сигнализации применяются контрольные многожильные кабели.

Кабели прокладываются в траншеях, каналах, туннелях, блоках, на галереях и эстакадах, по стенам зданий и конструкциям.

Электропроводки. Электропроводками называют сети напряжением до 1 кВ, выполненные изолированными проводами и небронированными кабелями с резиновой и пластмассовой изоляцией сечением до 16 мм². Они применяются для электроснабжения осветительных установок и силовых электроприёмников небольшой мощности. Электропроводки являются распространённым видом ЭС внутри помещений, а также для прокладки по стенам снаружи зданий. Проводки делят на открытые и скрытые.

Открытые электропроводки прокладываются открыто по поверхностям стен и потолков, по конструкциям сооружений. Крепление проводов и кабелей осуществляется скобами. Основными видами открытой электропроводки являются прокладка в коробах, лотках, трубах. В обоснованных случаях применяется электропроводка внутри помещений на роликах и изоляторах. Применяются тросовые электропроводки с креплением проводов и кабелей на тросах.

Скрытая электропроводка выполняется в специальных каналах бетонных

и кирпичных стен, полов и потолков, в скрыто проложенных трубах.

Наружные электропроводки прокладываются по наружным стенам зданий и сооружений, под навесами и между зданиями. К наружным электропроводам относится также прокладка изолированных проводов на опорах, аналогичных опорам воздушных линий, между зданиями.

В электропроводах промышленных предприятий, в зданиях бытового, культурно – массового назначения преимущественно применяются провода и кабели с алюминиевыми жилами, кроме помещений с взрывоопасной, пожароопасной и химически агрессивной средой. В таких помещениях применяются провода и кабели с медными жилами. Все виды электропроводок должны обеспечивать возможность замены проводов и кабелей в условиях эксплуатации.

Шинопроводы. Шинопроводом называется жёсткий токопровод напряжением до 1 кВ, предназначенный для присоединения одиночных и групповых электроприёмников. Шинопроводы делят на магистральные, распределительные, троллейные и осветительные.

К магистральным шинопроводам присоединяются распределительные шинопроводы, распределительные пункты (шкафы, шиты) и отдельные электроприёмники большой мощности.

Распределительные шинопроводы служат для распределения электроэнергии к электроприёмникам при напряжении до 1000 В.

В магистральных и распределительных шинопроводах применяются алюминиевые (преимущественно) и медные шины. Шинопроводы закрепляют на стойках, кронштейнах, подвесах.

Троллейные шинопроводы применяются для электроснабжения подвижных подъемно-транспортных механизмов. Съём тока осуществляется с троллеев через подвижный (скользящий) токосъёмник.

Осветительные шинопроводы используются в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземлённой нейтралью для электроснабжения осветительных приборов, электрифицированного инструмента и силовых электроприёмников небольшой мощности.

1.4. Коммутационные и защитные аппараты в системах электроснабжения

Для осуществления связи электроприёмников с источниками питания, с электрическими сетями предприятия служат электрические аппараты.

Электрическим аппаратом называется электротехническое устройство, предназначенное для управления потоком электроэнергии.

Любой электрический аппарат представляет собой совокупность токоведущих частей, способных замыкать и размыкать электрическую цепь, разделённых между собой и от соседних конструкций надёжной изоляцией, механизмов для управления режимом работы и устройств для обеспечения надёжности работы.

Классификация электрических аппаратов проводится по ряду признаков:

по функциональному назначению; области применения; роду тока и значения напряжения; исполнению защиты от внешних воздействий окружающей среды; конструктивным особенностям.

По функциональному назначению аппараты делятся на:

- коммутационные, предназначенные для коммутации (включения и отключения электрических цепей. К ним относятся выключатели, разъединители, контакторы и др.);
- защитные, выполняющие защиту электрических сетей и электрооборудования от перегрузок, токов короткого замыкания и других ненормальных режимов работы (автоматические выключатели, предохранители);
- пускорегулирующие, осуществляющие пуск, регулирование частоты вращения, тока и напряжения электрических машин (контакторы, пусковые и регулирующие реостаты);
- ограничивающие, предназначенные для ограничения тока (резисторы) в том числе при коротких замыканиях (реакторы) и перенапряжений (разрядники);
- контролирующие, выполняющие контроль заданных электрических и неэлектрических параметров (реле, датчики), применяются в системах автоматического управления;
- регулирующие и стабилизирующие, предназначенные для автоматического регулирования заданного параметра по определённому закону или его стабилизации (регуляторы, стабилизаторы);
- измерительные, предназначенные для расширения пределов измерения приборов и отделения цепей измерительных приборов от цепей главного тока (трансформаторы тока и напряжения, делители напряжения).

По областям применения аппараты можно разделить на аппараты распределения электроэнергии высокого и низкого напряжения и аппараты управления приводами и электротехнологическими установками. Это разделение условное, так как многие аппараты применяются и в установках распределения электроэнергии, и в устройствах управления. Например, автоматические выключатели, контакторы, трансформаторы тока, реле.

По роду тока аппараты делят на аппараты постоянного и переменного тока. По напряжению – аппараты низкого напряжения (до 1000 В) и аппараты высокого напряжения (выше 1000 В). В распределительных сетях предприятий напряжение выбирается из ряда (380, 660, 1140) В и (6, 10, 20) кВ.

Номинальный ток аппаратов выбирается из ряда: (10; 16; 25; 40; 63; 100) А (основной ряд – R_a 5) или (10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100) А (расширенный ряд – R_a 10) с учётом дробных или кратных значений от 0,1 до 10000 А. (Приведённые значения токов умножаются или делятся на 10 и на 100).

По исполнению защиты от окружающей среды аппараты изготавливают

в оболочках и без оболочек.

По принципу работы аппараты делят на контактные и бесконтактные.

По способу действия – электромагнитные, магнитоэлектрические, индукционные, тепловые и другие воздействия. Электрические аппараты могут быть разделены и по другим признакам (способу гашения дуги, быстродействию, использованию определённых эффектов). По виду привода – с ручным и двигательным приводом (электродвигательным, электромагнитным, электродинамическим, пневматическим и т. п.). Аппараты могут иметь (1 – 3) полюса, но иногда и 4 полюса.

Самыми распространёнными аппаратами в системах электроснабжения являются коммутационные и защитные аппараты. В ЭС напряжением до 1000 В широко применяются автоматические и неавтоматические выключатели, разъединители и предохранители. Разъединители включают и отключают электрические цепи без нагрузки, они не имеют дугогасительных устройств. Неавтоматические выключатели могут отключать нагрузку вплоть до номинального значения оперативным путём. Автоматические выключатели отключают нагрузку не только оперативным путём, но и в автоматическом режиме. Причём отключаемая нагрузка может достигать предельных значений токов короткого замыкания, которые могут появиться в местах установки выключателей. Автоматические выключатели могут отключать электрооборудование в автоматическом режиме и при снижении или исчезновении напряжения в сети. Для отключения они снабжаются дополнительными устройствами, называемыми расцепителями (тепловыми, электромагнитными, электронными).

Предохранители служат для защиты оборудования от токов короткого замыкания путём разрушения плавкой вставки. Если вставка разрушается расплавлением, предохранитель называют плавким.

В электроустановках напряжением свыше 1000 В применяются разъединители, отделители, короткозамыкатели, выключатели, предохранители.

Для защиты оборудования от аварийных режимов служат выключатели и предохранители. Выключатели на напряжение свыше 1000 В расцепителями не комплектуются, а в автоматическом режиме отключаются и включаются под воздействием аппаратов релейной защиты и автоматики.

В качестве аппаратов релейной защиты и автоматики, применяются реле различного конструктивного и функционального назначения. В качестве аппаратов управления применяются контакторы, магнитные пускатели и реле.

1.5. Источники оперативного тока в системах электроснабжения

В электрических сетях предприятий возможно возникновение коротких замыканий с появлением больших значений токов, что может привести к выходу из строя участков сетей и электрооборудования. Для защиты электрообору-

дования и сетей и управления режимом электроснабжения применяются электрооборудование релейной защиты и автоматики. Это электрооборудование питается от специальных источников оперативного тока.

К источникам переменного тока относятся трансформаторы собственных нужд подстанций, трансформаторы тока и напряжения.

В качестве источника выпрямленного оперативного тока используются блоки питания. Блоки напряжения подключаются к трансформаторам собственных нужд или трансформаторам напряжения. Токовые блоки включаются в цепь трансформаторов тока. В некоторых схемах используются источники импульсного напряжения (блок заряженных конденсаторов).

В качестве источников постоянного оперативного тока широко применяются также аккумуляторные батареи.

2. ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

2.1. Классификация электроприёмников

Приёмником электроэнергии называется электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электроэнергии в другие её виды. Чаще всего, электроприёмники являются частью технологической установки. Среди технологических установок можно выделить производственные машины и механизмы, термические установки, установки электроосвещения, электрохимические установки; установки электростатического и электромагнитного поля, установки электроискровой обработки металлов, электробытовые установки, электрооборудование контроля и диагностики (рентгеновские, ультразвуковые аппараты и т. д.). В некоторых установках преобразование электроэнергии происходит в несколько видов энергии. В электродуговых установках (электросварка, дуговые печи, электроосвещение) электрическая энергия преобразуется одновременно в световую и тепловую энергию [1].

Потребителем электроэнергии называется один или совокупность электроприёмников технологических установок, присоединённых с помощью электрических сетей к общему источнику электропитания. Потребителями являются станок, сварочная установка, жилой дом, производственный цех, предприятие, населённый пункт.

В процессе работы ЭП могут оказывать влияние на работу ЭС и окружающее пространство и, в свою очередь, их работа может зависеть от режима работы ЭС. Электроприёмники должны иметь электромагнитную совместимость с другими ЭП, включёнными в общую ЭС.

Все ЭП можно разделить на следующие группы [2]:

1. Электроприёмники с резистивными элементами – потребители активной мощности (печи сопротивления, нагреватели, лампы накаливания).
2. Электроприёмники с асинхронными и синхронными электродвигателями, работающими в трёхфазном режиме (привод станков и механизмов,

насосов, лифтов).

3. Электроприёмники, с асинхронными электродвигателями, работающими в однофазном режиме (привод компрессоров холодильников, кондиционеров).

4. Электроприёмники с коллекторными двигателями (привод станков, электроинструмента).

5. Электродуговые печи, сварочные агрегаты переменного и постоянного тока.

6. Индукторы (установки индукционного нагрева тел, индукционные плавильные печи).

7. Выпрямительные устройства (преобразовательные установки электрифицированного транспорта, зарядные устройства аккумуляторов, электролизных ванн).

8. Высокочастотное электрооборудование (установки для закалки и сквозного нагрева, печи СВЧ, жарочные шкафы).

9. Радиоэлектронная аппаратура (радиоприёмники, телевизоры, компьютеры, телефонно-телеграфная связь, электрооборудование диагностики и физиотерапевтического лечения).

10. Лампы люминесцентного освещения.

2.2. Характеристика электроприёмников

Электроприёмники с резистивными элементами первой группы относятся к электроприёмникам, создающим спокойную нагрузку, без бросков тока в момент включения (пуска). Оказывают незначительное влияние на работу смежных ЭП. Электрические *печи сопротивления* применяют прямого и косвенного нагрева, которые включаются к сети с напряжением 380 В.

Электродвигатели. В приводах различных рабочих механизмов применяются электродвигатели, осуществляющие перемещение рабочих органов механизмов. При этом требуется либо постоянная, либо регулируемая частота вращения двигателя. В приводах, не требующих регулирования скорости, применяются асинхронные или синхронные двигатели переменного тока. Применение тех или других двигателей зависит от напряжения распределительной сети и мощности двигателей. При напряжении до 1 кВ при мощности до 100 кВт целесообразно применять асинхронные двигатели, при мощности выше 100 кВт – синхронные двигатели. При напряжении 6 (10) кВ асинхронные двигатели применяют при мощности до 400 кВт и синхронные двигатели – при мощности свыше 400 кВт.

Электроприёмники 2, 3 и 4 групп характеризуются активно – индуктивной нагрузкой с частыми пусками, реверсами и отключениями, что является причиной загрузки ЭС реактивной мощностью и появления колебания напряжения при частых пусках. Электродвигатели 4-й группы генерируют низко- и высокочастотные гармоники тока, обусловленные реакцией якоря и пульсацией его э.д.с. Возникающее под щётками коллектора искрение вызывает радиопомехи.

Асинхронные электродвигатели обладают простотой конструкции и обслуживания при эксплуатации. В то же время синхронные двигатели обладают рядом преимуществ по сравнению с асинхронными двигателями. Они позволяют сокращать потребление реактивной мощности и участвовать в компенсации реактивной мощности в сетях. Они имеют более высокий коэффициент мощности, чем у асинхронных двигателей.

При необходимости плавного регулирования скорости перемещения рабочих органов машин и механизмов широко применяют приводы постоянного тока. Двигатели постоянного тока конструктивно сложнее и дороже двигателей переменного тока, но их применение экономически оправдано при необходимости высокой точности обработки материалов, резкого изменения частоты и реверсирования двигателей. Источником питания двигателей постоянного тока являются преобразовательные (выпрямительные) установки.

Дуговые печи делятся на сталеплавильные, рудно-термические и печи для плавки цветных металлов. Дуговые электрические печи работают при нестандартном напряжении (110 – 750) В. Они подключаются к сети с напряжением (6 – 35) кВ и (110 – 220) кВ через печные трансформаторы. Мощность дуговых печей достигает 125 МВА. Дуговые печи относятся к резкопеременной электрической нагрузке и вызывают появление в электрической сети высших гармоник.

Электросварочные установки дуговой и контактной сварки включаются в сеть через трансформаторы и представляют собой однофазную неравномерную нагрузку. Они создают в сети несинусоидальные режимы.

Индукционные плавильные печи, установки индукционного нагрева относятся к электрической нагрузке «спокойного» режима, которая в процессе работы при промышленной частоте 50 Гц мало изменяется.

Выпрямительные устройства применяются для питания технологических установок, работающих на постоянном токе (установки для электроокраски, улавливания твёрдых частиц в газе с помощью электрофильтров, отделения ферромагнитных частиц в смесях; электролитические ванны для электролиза воды, растворов, расплавов цветных металлов; ванны для гальванических покрытий; зарядное электрооборудование). Электроприёмники этой группы являются потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник в ЭС, оказывают влияние на работу смежных электроприёмников.

Высокочастотные устройства генерируют в ЭС высшие гармоники и повышают напряжённость электромагнитного поля в окружающем пространстве.

Радиоэлектронные устройства маломощны, являются потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник. Многие из них реагируют на изменение напряжённости электромагнитного поля окружающего пространства. В телевизорах с цветным изображением возможно искажение изображения, появление цветных пятен на экране. В устройствах электронной связи изменение напряжённости электромагнитного поля вызывает появление шумов и искажение изображения.

Лампы люминесцентного освещения с нелинейными элементами –

дресселями и стартерами – являются потребителями реактивной мощности, генераторами помех в ЭС в виде высших гармонических (150 – 550) Гц и (150 – 1650) кГц, применяются для внутреннего освещения.

Электроприёмники в системах электроснабжения могут работать в продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах.

В процессе работы электроприёмников в сети наблюдаются спокойный и резкопеременный режимы, синусоидальный и несинусоидальный режимы с наличием высших гармоник тока и напряжений, симметричный и несимметричный режимы.

2.3. Режимы работы электроприёмников

Эффективность работы электроприёмников, то есть процесс преобразования электроэнергии зависит от качества электроэнергии, поступающей из ЭС. В свою очередь качество электроэнергии и эффективность работы ЭС зависит от режима работы ЭП.

Электроприёмники с резистивными элементами создают в ЭС спокойный режим, без бросков тока в момент включения (пуска). Оказывают незначительное влияние на работу смежных ЭП.

Большинство электроприёмников представляют для ЭС активно-индуктивную нагрузку, когда ток отстаёт от напряжения. Характерным представителем таких электроприёмников являются асинхронные электродвигатели и другие электроприёмники с наличием индуктивных элементов. Нагрузка может быть спокойной и резко переменной в момент пуска электродвигателя. Электродвигатели работают в продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах.

Продолжительный режим характеризуется практически неизменной или мало изменяющейся нагрузкой в течение времени необходимого для достижения установившегося превышения температуры греющихся частей электроприёмника $\tau_{уст}$ над температурой окружающей среды, которая в рассматриваемом процессе остаётся неизменной (рис. 2.1, а).

Кратковременный режим – такой режим, при котором работа с неизменной или изменяющейся нагрузкой продолжается меньшее время, чем требуется для достижения установившейся температуры при неизменной температуре окружающей среды и чередуется с отключениями, во время которых температура греющихся частей электроприёмника успевает снизиться до температуры окружающей среды (рис. 2.1, б).

Повторно-кратковременный режим – режим, при котором работа с неизменной нагрузкой чередуется с паузами. Во время работы температура не успевает достичь установившегося значения, а во время пауз – снизиться до температуры, окружающей среды (рис. 2.1, в). Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения (ПВ)

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_p}{t_p + t_{\text{п}}} 100 \%,$$

где t_p – время работы; $t_{\text{п}}$ – время пауз; $t_{\text{ц}}$ – время цикла.

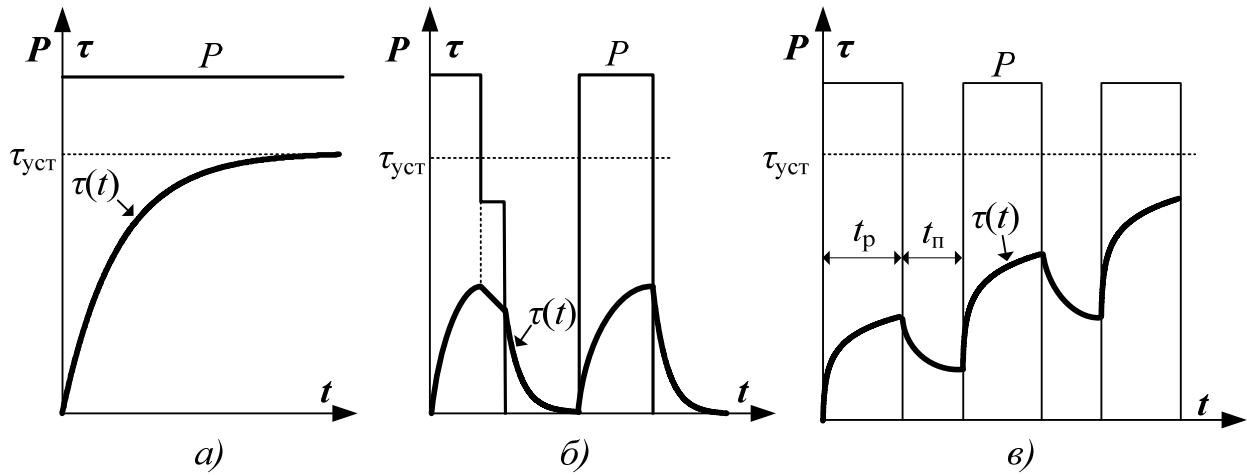


Рис. 2.1. Режимы работы электроприёмников:

a – продолжительный; $б$ – кратковременный; $в$ – повторно-кратковременный;
 P – мощность; $\tau(t)$ – зависимость превышения температуры над температурой окружающей среды от времени приложения мощности P ; $\tau_{\text{уст}}$ – установившееся превышение температуры; t_p – время работы; $t_{\text{п}}$ – время пауз

Значение $t_{\text{ц}}$ не должно превышать 10 мин. $ПВ$ имеет стандартные значения 15, 25, 40, и 60 %.

Реже встречаются прерывисто-продолжительный и перемежающийся режимы работы электроприёмников.

В продолжительном режиме работают большинство электродвигателей, обслуживающих технологические линии и агрегаты непрерывных производств, например, электродвигатели компрессоров, насосов, вентиляторов, механизмов непрерывного транспорта.

В кратковременном режиме работают электропривода вспомогательных механизмов металлорежущих станков, задвижек, затворов и т. п.

В повторно-кратковременном режиме работают электродвигатели подъёмно-транспортных механизмов, вспомогательных приводов прокатных станов, сварочные установки.

Мощность электроприёмников, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, может быть представлена эквивалентной мощностью продолжительного режима ($ПВ = 100 \%$)

$$P = P_{\text{пв}} \sqrt{ПВ},$$

где P – мощность, соответствующая продолжительному режиму; $P_{\text{пв}}$ – мощность при заданной $ПВ$.

В процессе работы электроприёмников характер нагрузки в сети может оставаться неизменным, изменяться в отдельных или всех фазах, сопровож-

даться появлением высших гармоник тока или напряжения. В связи с этим нагрузку в сети можно разделить на спокойную симметричную (преобладающее большинство трёхфазных электроприёмников), резкопеременную, несимметричную и нелинейную. Резкопеременная, несимметричная и нелинейная нагрузка относятся к специфическим нагрузкам.

Резкопеременная нагрузка характеризуется резкими увеличением и уменьшением мощности или тока. Несимметричная нагрузка вызывается однофазными и реже трёхфазными электроприёмниками с неравномерной загрузкой фаз. При несимметричной нагрузке в сети возникают токи прямой, обратной и нулевой последовательности. Нелинейная нагрузка создаётся электроприёмниками с нелинейной входной вольт-амперной характеристикой. При нелинейной нагрузке в сети появляются высшие гармоники тока или напряжения, искажается синусоидальная форма тока или напряжения.

Специфические нагрузки обычно создаются электродуговыми печами, сварочными установками, полупроводниковыми преобразовательными установками.

2.4. Потребление реактивной мощности

Активная мощность, потребляемая электроприёмниками из сети, совершает полезную работу. В то же время электроприёмники потребляют из сети реактивную мощность, необходимую для создания магнитных полей, которая полезной работы не совершает, а циркулирует между электрической сетью и электроприёмниками. Потребителями реактивной мощности в электроприёмниках являются индуктивные элементы. Источниками реактивной мощности наряду с генераторами электростанций являются конденсаторы. Реактивная мощность, передаваемая по сети, вызывает увеличение тока за счёт реактивной его составляющей и приводит к увеличению потерь мощности (электроэнергии) в сети. Показателем потребления активной мощности является коэффициент мощности $\cos\varphi$

$$P = \sqrt{3} UI \cos\varphi = S \cdot \cos\varphi.$$

Показателем потребления реактивной мощности является коэффициент реактивной мощности $\tan\varphi$

$$Q = P \cdot \tan\varphi,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Коэффициент реактивной мощности можно определить из выражения

$$\tan\varphi = \sqrt{\frac{1 - \cos^2\varphi}{\cos\varphi}},$$

где U – напряжение сети; I – потребляемый электроприёмником из сети ток; P – активная мощность; Q – реактивная мощность; S – полная мощность.

Так как реактивная мощность не совершает полезной работы, о её потреблении говорится условно.

Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные электродвигатели, силовые и специальные трансформаторы (преобразовательные, печные, сварочные). Как в электродвигателях, так и в трансформаторах, реактивная мощность расходуется на намагничивание магнитопровода (основной магнитный поток) и на создание полей рассеяния. Потребителями реактивной мощности являются все электротехнические устройства, в которых имеет место сдвиг по фазе между током и напряжением. В структуре потребления реактивной мощности значительная доля приходится на потери в распределительных сетях предприятия (линиях электропередачи при напряжении до 1000 В и выше 1000 В, трансформаторах и электроприёмниках).

3. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

3.1. Электротехнические устройства в системах электроснабжения

В системах электроснабжения присутствует следующее электрооборудование: трансформаторы, распределительные устройства высокого и низкого напряжения, коммутационные и защитные аппараты, приборы контроля и учёта, представляющие собой в совокупности электротехническое оборудование. Всё это электрооборудование является промышленными изделиями, выпускаемыми в соответствии с государственными стандартами или техническими условиями, определяющими их качество.

Понятие качества¹ относится, в первую очередь, к продукции (товару) и представляет собой сложное свойство продукции, определяемое соответствием совокупности характеристик продукции установленным и предполагаемым требованиям и ожиданиям.

Примечание. Свойство – философская категория, выражающая такую объективную сторону материального объекта, которая обуславливает его общность или различие с другими материальными объектами, то есть общее в качественном отношении для многих материальных объектов, но в количественном отношении обнаруживается в его отношении к ним.

Свойство продукции – объективная особенность продукции, которая может проявляться при её создании, эксплуатации и потреблении, то есть при разработке, производстве (изготовлении), испытаниях, хранении, транспортировании, техническом обслуживании, ремонтах и использовании.

Термин «эксплуатация» применяется к такой продукции, которая в процессе использования расходует свой ресурс. Термин «потребление» относится к продукции, которая при её использовании по назначению расходуется сама.

Свойства продукции условно можно разделить на простые и сложные разных уровней сложности – первый, второй, третий и так далее вплоть до простого свойства.

¹ Техничко-экономическое понятие термина «качество продукции» отличается от философского понятия «качество» в части охвата перечня свойств продукции. Техничко-экономическое понятие термина «качество продукции» охватывает лишь часть свойств продукции связанных с возможностью удовлетворения продукцией установленных и предполагаемых требований и ожиданий.

Примером сложного свойства первого уровня сложности является качество продукции, которое включает более простые свойства: *назначения, надёжности, эргономичности, эстетичности, технологичности, транспортабельности, стандартизации и унификации, патентно-правовые, экологические, безопасности*. В свою очередь перечисленные свойства являются, как правило, являются сложными. Например, надёжность продукции в свою очередь является сложным свойством второго уровня, обусловленная такими простыми свойствами такими, как *безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость*. Простые свойства нельзя представить в виде совокупности ещё более простых свойств.

Из определения термина «свойство» следует, что определённое свойство объекта, может выполнять двоякую роль:

- выражать общее для многих объектов, и это общее есть эквивалентность объектов в качественном отношении по данному свойству;
- иметь количественное значение, индивидуальное для каждого объекта.

Таким образом, определение понятия «свойство» потребовало привлечения таких понятий, как качество и количество.

Качество – философская категория, выражающая внутреннюю определённость объекта, благодаря которой он является именно этим, а не иным объектом.

Количество – философская категория, выражающая внешнюю определённость свойства объекта: его размер, число, объём, степень развития и т. п. Изменение количественной определённости свойства (совокупности свойств), достигнув определённой меры, ведёт к изменению качества объекта. Таким образом, свойство в количественном отношении, имеет количественную определённость или размер.

Размер, определяющий количественную определённость свойства может быть либо измерен, либо оценён в зависимости от того выделена или нет единица измерения характеристики рассматриваемого свойства.

Качественная определённость свойства продукции, выражающая внутреннюю определённость объекта, благодаря которой он является именно этим, а не иным объектом.

Например, к качественной определённости свойства продукции можно отнести геометрическую протяжённость, то есть способность занимать определённую часть пространства. Количественная определённость свойства продукции в данном примере выражается такой характеристикой, как длина конкретного объекта. Изменение длины до определённого размера приводит к изменению качественной определённости свойства. В данном примере уменьшение длины в пределе приводит к появлению новой качественной определённости свойства – возможность считать объект, как имеющим некоторую длину, так в тоже самое время принимать его безразмерным². Такое изменение внутренней определённости объекта называется диалектическим скачком.

Количественная определённость свойства продукции – его размер определяется *характеристиками*³ *свойств* продукции или по-другому называемыми *признаками* продукции. Именно размер определяет различие объектов и выражает внешнюю определённость свойства объекта.

² В математическом анализе подобными изменениями качественной определённости свойства протяжённости имеет дифференциал, который можно одновременно считать размерным и безразмерным.

³ Характеристики свойств материального объекта (явления или процесса) в самом общем случае подразделяются на *реальные* и *идеальные* в зависимости от того с чем имеют дело. Если имеют дело с материальным объектом, то характеристики свойств объекта реальные.

Если единица измерения характеристики рассматриваемого свойства выделена, то говорят о *количественной* характеристике данного свойства, которое можно измерить. Поэтому для количественной характеристики размер её выражается *значением* в виде некоторого числа принятых для неё единиц. Таким образом, значение количественной характеристики свойства продукции определяется с помощью средств измерения.

Количественная характеристика свойств продукции даёт численную характеристику отдельных свойств. Так номинальная мощность, номинальный ток, пусковой ток электродвигателя свидетельствуют о функциональных возможностях электродвигателя и, следовательно, характеризуют свойство назначения. Средний ресурс и средний срок службы электродвигателя характеризуют свойство долговечности. Среднее время восстановления работоспособного состояния электродвигателя характеризуют свойство ремонтпригодности.

Если единица измерения характеристики рассматриваемого свойства не выделена, то говорят о *качественной* характеристике данного свойства, размер которого можно лишь *оценить*. Поэтому для качественной характеристики размер её выражается в виде некоторых вариантов, уровней, имён, рангов. По количеству уровней *качественные* характеристики подразделяются на двухуровневые (альтернативные) и многоуровневые. Таким образом, значение качественной характеристики свойства продукции получается с помощью средств оценки и с помощью органов чувств человека.

Примерами *качественных* характеристик свойств продукции могут служить цвет материала, форма изделия, наличие на поверхности детали защитного покрытия, способ соединения деталей (сварка, склейка, клёпка, свинчивание и другие).

Количественные характеристики свойств продукции иначе называют *параметрами* или *показателями* свойств продукции. Параметр и показатель свойств продукции не одно и то же.

Параметр – характеристика свойства продукции, количественно определяющая *любые* её свойства, как входящие в состав качества продукции, так и не входящие в состав качества продукции.

*Показатель*⁴ *качества* – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, определяющих *качество* (например, отклонение напряжения), то есть рассматриваемого конкретного свойства.

Из сравнения определений терминов «параметр» и «показатель качества» следует, что показатель качества может быть частным случаем параметра продукции.

Если имеют дело с математической моделью материального объекта, то характеристики свойств объекта идеальные.

⁴ Очень часто под показателями свойств, определяющих качество продукции, понимают не только количественные характеристики свойств, но и качественные характеристики свойств продукции, что является ошибкой. Термин «показатели» обычно используют при обозначении количественных характеристик, определяющих качество продукции. Термин «параметры» обычно используют при обозначении количественных характеристик, определяющих другие свойства продукции.

При оценке качества большое значение отводится основным характеристикам качества.

Характеристики назначения – характеризуют функционально-конструктивные возможности электрооборудования, полезный эффект от его использования по назначению в соответствии с областью применения и условиями эксплуатации.

Под условиями эксплуатации понимается совокупность климатических и механических факторов внешней среды, существенно влияющих на работоспособность электрооборудования (температура окружающей среды, влажность, давление, атмосферные явления, вибрация, удары).

Характеристики надёжности – характеризуют надёжность устройств в конкретных условиях их использования.

Для промышленной продукции характеристики надёжности включает в себя:

- безотказность (вероятность безотказной работы в течение заданного времени при определённых условиях и режимах работы, длительность наработки на отказ, интенсивность отказов и прочие);
- долговечность составных частей электрооборудования (ресурс, срок службы до первого капитального ремонта и прочее);
- ремонтпригодность (вероятность восстановления, среднее время восстановления, средняя трудоёмкость технического обслуживания и прочие);
- сохраняемость (срок сохраняемости, средний срок сохраняемости и прочее).

Эргономические характеристики – характеризуют систему «человек – изделие – среда» и учитывают комплекс производственных и физических свойств человека: гигиенических (освещённость, температура, влажность и прочие), антропометрических (соответствие конструкции размерам, форме тела человека и прочие), физиологических (соответствие конструкции силовым, скоростным возможностям человека и прочие), психофизиологических свойств человека (соответствие изделия возможностям восприятия и переработки информации и прочие).

Эстетические характеристики – характеризуют информационную выразительность (цветовое оформление, оригинальность, стилевое соответствия моде), рациональность формы (функционально-конструктивной и эргономической обусловленности), гармоничность, целостность композиции.

Характеристики технологичности – характеризуют системно-структурные свойства продукции, определяют эффективность конструктивно-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте устройств. Основными характеристиками технологичности являются удельные характеристики трудоёмкости изготовления и ремонта, материалоёмкости, в том числе дефицитных материалов, коэффициент использования рациональных материалов, коэффициент сборности электрооборудования.

Характеристики транспортабельности – характеризуют свойства при упаковке, транспортировке, погрузке и выгрузке.

Характеристики стандартизации и унификации – характеризуют степень использования в продукции стандартизованных изделий и уровень унификации составных частей изделия, предусматривают рациональное сокращение количества типоразмеров составных частей в проектируемых и изготавливаемых изделиях. Степень стандартизации и унификации изделия определяется следующими характеристиками: коэффициенты применяемости по типоразмерам и по составным частям изделия, стоимостный коэффициент по стандартизованным составным частям, коэффициент повторяемости.

Патентно-правовые характеристики – характеризуют степень патентной защиты изделия, а также его патентную чистоту. Патентно-правовой уровень изделия оценивается с помощью показателей патентной защиты и патентной чистоты.

Экологические характеристики – характеризуют уровень вредного воздействия электрооборудования на окружающую среду.

Характеристики безопасности – характеризуют особенности продукции, обуславливающие безопасность обслуживающего персонала и её пользователей.

Экономические характеристики – характеризуют затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию электрооборудования.

Технико-экономические показатели качества делят на:

- характеристики качества технического уровня разработки (основные технические характеристики);
- производственно-технологические характеристики качества изготовления (удельная себестоимость, удельная трудоёмкость, удельная материалоёмкость по видам материалов, рентабельность);
- эксплуатационные характеристики качества (коэффициент экономической эффективности, оптимальная продолжительность эксплуатации, средний ресурс).

Качество электрооборудования может определяться *единичными характеристиками*, которые относятся к единице продукции или к совокупности единиц однородной продукции.

Однако качество продукции не всегда можно оценить по отдельным единичным характеристикам, потому, что по одним из них качество продукции выигрывает (стало лучше), а по другим проигрывает (ухудшилось). В таких случаях целесообразно использовать комплексные характеристики качества, характеризующие несколько её простых свойств или одно сложное свойство продукции.

Комплексные показатели в зависимости от способа построения различают:

- обобщённый, относящийся к совокупности свойств продукции, по которой оценивается её качество;
- групповой, охватывающий определённую группу свойств;
- интегральный, отражающий соотношение суммарного полезного эффекта

от производства и эксплуатации продукции и суммарных затрат на её создание, производство и эксплуатацию.

Методика определения комплексных показателей качества продукции изложена в [5].

3.2. Формирование качества электротехнических устройств на стадии разработки

Разработка новых образцов электротехнических устройств начинается при моральном устаревании выпускаемых изделий. Субъектами разработки новой техники выступают «Заказчик» – организация, заказывающая проект и, «Исполнитель» – организация, выполняющая проектные работы, разработку конструкторско-технологической документации на изготовление изделия.

Взаимоотношения между этими организациями и организациями-соисполнителями регламентируются договором (контрактом), являющимся юридическим документом, в котором определяются права и ответственность сторон, объём, этапы и сроки выполнения работ, объёмы и источники финансирования.

Техническая сторона договора отражается в техническом задании на разработку. Техническое задание разрабатывается исполнителем на основании общих технических требований, представляемых заказчиком. Договор и техническое задание подписываются всеми заинтересованными сторонами.

Разработка конструкторской документации на устройство делится на два крупных этапа: научно-исследовательская работа и опытно-конструкторская разработка. Часто их объединяют в одно название – НИОКР. Иногда, когда теоретические вопросы разработки достаточно ясны, этап научно-исследовательской работы может быть заменён экспериментальными работами для увязки составных частей электрооборудования и подтверждения технических требований испытаниями.

ГОСТ 2.103–68 устанавливает следующие стадии разработки конструкторской документации для всех отраслей промышленности:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочий проект.

Техническое задание является основанием для разработки конструкторской документации электрооборудования. В нём излагаются следующие разделы:

- назначение;
- технические требования;
- состав изделия;
- порядок приёмки и испытаний опытного образца;
- сроки разработки;
- объём и источники финансирования.

Назначение определяет характер выполняемых функций электрооборудования, области его применения.

В разделе *Технические требования* излагаются:

- технические требования, которые должны быть достигнуты в процессе проектирования и определять технический уровень электрооборудования при сопоставлении его с аналогами, приводятся показатели надёжности, быстродействия и безопасности;
- конструктивно-технические требования, определяющие массо-габаритные показатели, требования к модульности конструкции. Определяется номенклатура конструкторской документации;
- технологические и производственные требования, определяющие технологичность изготовления деталей, сборочных единиц и комплектов, удельные показатели материалоёмкости и трудоёмкости изготовления, сокращение номенклатуры элементов, основные технологии, в том числе, осваиваемые впервые, уровень механизации при монтаже;
- метрологические требования, определяющие возможность контроля качества в процессе производства и эксплуатации;
- требования к условиям эксплуатации, транспортирования и хранения с характеристиками механических и климатических воздействий. В эксплуатационные требования входят удобство осмотра, регулировки и ремонта, минимум внешних соединений, защита от помех.

Состав изделия определяет перечень составных частей, входящих в устройство, комплект запасных частей, инструмента и приспособлений (ЗИП), упаковочных средств.

Порядок приёмки и испытаний опытного образца регламентируется программой испытаний, в которой устанавливаются основные проверяемые характеристики и методы их проверки.

Стадия **Техническое предложение** выполняется для проведения предварительных расчётов, технического и технико-экономического обоснования целесообразности разработки. Как правило, техническое предложение сопровождается проведением научно-исследовательской работы. Результаты технического предложения оформляются Пояснительной запиской технического предложения, результаты научно-исследовательской работы – научно-техническим отчётом о проведённой научно-исследовательской работе.

На стадии технического предложения устанавливаются варианты возможных технических решений и выбор оптимального решения, основные технические и организационные мероприятия, рациональные приёмы проектирования, патентная чистота.

Этап **научно-исследовательские работы** предполагает проведение исследовательских испытаний. *Исследовательские испытания* проводят для изучения определённых свойств, выявления параметров и поведения устройств и их функциональных сборочных единиц в работе. Как правило, исследовательские испытания проводят в лабораторных условиях в процессе разработки или усовершенствования электротехнических устройств.

Исследовательские испытания (исследования) проводят также для подтверждения гипотезы, предположения о физических явлениях в электрооборудовании, о поведении в определённых условиях материалов, оптимальности технологических процессов.

Эскизный проект выполняется по ГОСТ 2.119–73 для выявления основных технических решений, которые наиболее полно обеспечивают требования технического задания. На стадии технического задания проводят следующие работы:

- проверяют правильность принципиальных, конструктивных, схемных и других решений и выбирают оптимальный вариант;
- выполняют расчёты основных технических параметров и уровня качества, расчёты надёжности, технологичности, уровня стандартизации и унификации;
- изготавливают и испытывают макеты для проверки частных технических решений;
- проверяют на соответствие эргономичности, безопасности, производственной санитарии и экологии
- составляют перечень дополнительных работ, не учтённых техническим заданием.

Технический проект выполняется в соответствии с ГОСТ 2.120–73.

В нём находят воплощение окончательные технические решения по функционированию, структуре и конструкции изделия. В техническом проекте производится детальная проработка конструктивных и схемных решений, разрабатываются чертежи деталей, сборочных единиц, общие виды изделий, конструкция органов управления. Представляются материалы по защите электрооборудования от внешних воздействий, по возможности осуществления ремонтных операций, по привязке к промышленной установке. Уточняются принципиальные вопросы технологии и стоимости изготовления электрооборудования с учётом особенностей предприятия-изготовителя.

На стадии технического проекта изготавливаются опытные образцы устройств, которые предъявляются для испытания приёмочной комиссией, в которую включаются представители всех заинтересованных организаций (заказчик, исполнитель, производитель, проектные организации, применяемые проектируемое устройство в проектах электроснабжения). Программа и методики испытаний подготавливаются исполнителем и принимаются приёмочной комиссией.

На стадии **рабочего проекта** разрабатывается весь комплект конструкторской, технологической и эксплуатационной документации, изготавливается установочная партия (серия) образцов, которые предъявляются приёмочной комиссии. Приёмочной комиссии представляется проект технических условий на устройство. По результатам испытаний корректируется конструкторская документация и технологическая документация, выпускаются технические условия на устройство.

Испытания электротехнических устройств проводятся по завершению

проектных работ на стадиях технического и рабочего проектов. Испытания проводятся для проверки соответствия проектируемых устройств требованиям технического задания в процессе разработки или техническим условиям на устройство при рекомендации его промышленного производства.

Недостатки, допущенные в процессе разработки и не выявленные при приёмочных испытаниях, могут позднее отразиться на качестве электрооборудования и на надёжности в СЭС.

3.3. Формирование качества электротехнических устройств при промышленном производстве

Для промышленного производства продукции на предприятии-изготовителе проводится **технологическая подготовка производства**. Она направлена на разработку технологической документации, изготовление технологической оснастки и инструмента для производства нового изделия.

Типичный график технологической подготовки производства включает в себя следующие стадии:

- разработка технического задания на технологическую подготовку производства;
- разработка технического предложения, эскизного, технического и рабочего проектов;
- изготовление моделей, макетов;
- разработка маршрутных карт;
- изготовление оснастки, стендов, приспособлений, инструмента;
- изготовление опытных образцов (партий);
- испытание опытных образцов (партий);
- корректировка конструкторской документации на технологическую оснастку и технологической документации.

Технологическая документация включает в себя разработку:

- типовых технологий на базе существующих;
- обозначений и классификационных групп деталей и сборочных единиц;
- типовых маршрутов изготовления деталей, сборочных единиц, комплексов и изделий в целом;
- типовых операций изготовления;
- норм затрат времени на труд и материалы;
- индивидуальных технологических процессов;
- заказов на новое технологическое оборудование, покупные изделия и материалы;
- чертежи оснастки, приспособлений и инструмента;
- извещений об изменениях.

В процессе разработки технологической документации решаются вопросы стандартизации и унификации технологических процессов на основе:

- типизации процессов;
- типизации групповых технологий;

- унификации технологической документации;
- унификации оснастки, приспособлений и инструмента;
- применения универсальных сборочных и наладочных приспособлений.

В процессе выбора, разработки и обоснования технологических процессов решается оптимизационная задача минимизации суммы затрат на производство в зависимости от объёмов производства.

По окончании разработки технологической документации осуществляется выверка, отладка и сдача технологических процессов в производство и изготовление опытного образца или установочной партии (серии) в зависимости от вида и объёма производства.

В процессе промышленного производства осуществляется контроль качества изготовления электрооборудования. Контроль осуществляется специализированной службой предприятия, отделом технического контроля. Контролю подвергаются детали, сборочные единицы и изделие в целом. Проверяемые объекты должны соответствовать требованиям конструкторской документации. Электрооборудование, которое должно срабатывать при определённых значениях параметров должны быть отстроены на эти значения на стендах.

При контроле деталей проверяются размеры, чистота обработки поверхностей деталей, толщина покрытий. При контроле сборочных единиц проверяются сопрягаемость деталей, качество неразъёмных соединений, свободное движение перемещаемых деталей. При контроле электрооборудования в целом проверяется качество сборки, движение перемещаемых частей, функционирование отдельных элементов под нагрузкой или без нагрузки.

Если в результате контроля пропускаются ошибки в изготовлении деталей или сборке узлов и электрооборудования в целом, то возможно снижение надёжности работы этого электрооборудования в СЭС.

3.4. Испытание электрооборудования

Испытание электрооборудования на предприятии. Под термином «испытания» следует понимать, прежде всего, техническую операцию⁵ с применением средств испытания, направленную на получение данных испытания и принятие решения по объекту испытания, его свойствам или физическим явлениям протекающих в объекте испытания. В зависимости от цели решение по испытываемому объекту его свойствам или физическим явлениям протекающих в объекте испытания может приниматься при *непосредственном* использовании данных испытания, либо *опосредовано* путём использования результата сравнения данных испытания с установленными контрольными требованиями (установленными требованиями).

Непосредственное или *опосредованное* использование данных испытания для получения результата испытаний по объекту в целом определяет наличие

⁵ В отдельных, обоснованных случаях допускается заменять эксперимент моделированием. Испытания представляют собой не только техническую операцию, но и включают в себя в обязательном порядке и получение данных испытания при помощи органов чувств человека

двух классов испытания – *исследовательских* и *контрольных* испытаний.

Исследовательские испытания проводят для изучения определённых свойств, выявления характеристик свойств и поведения электрооборудования и их функциональных сборочных единиц в работе. Как правило, исследовательские испытания проводят в лабораторных условиях в процессе разработки или усовершенствования электрооборудования.

Исследовательские испытания проводят также для *подтверждения* гипотезы, предположения о физических явлениях в электрооборудовании, о поведении в определённых условиях материалов, оптимальности технологических процессов.

Контрольные испытания – испытания, проводимые для контроля *соответствия* электрооборудования и их функциональных сборочных единиц контрольным требованиям. Контрольным испытаниям подвергаются электрооборудование, освоенное производством, а также опытные образцы и установочные партии.

Существуют следующие основные виды контрольных испытаний продукции.

Квалификационные испытания – контрольные испытания готовых изделий установочной партии после освоения технологического процесса их производства, проводимые для оценки готовности предприятия к производству устройств. Проверяется соответствие устройств требованиям действующих стандартов.

Приёмочные испытания проводят для определения целесообразности постановки устройств на производство или передачи установочной партии или опытного образца в эксплуатацию.

Электрооборудование, освоенное производством, подвергают приёмосдаточным, периодическим, типовым и аттестационным испытаниям.

Приёмосдаточные испытания изготовленного электрооборудования проводят для определения их пригодности к поставке заказчику и использованию по назначению. Эти испытания проводит служба технического контроля предприятия-изготовителя.

Периодические испытания – контрольные испытания устройств, проводят с периодом в (2 – 5) лет для подтверждения стабильности технологического процесса производства и качества аппаратов за контролируемый период.

Типовые испытания проводят при внесении изменений в конструкцию, технологию, при замене материалов для определения эффективности и целесообразности вносимых изменений.

Электрооборудование может быть подвергнуто у потребителя *входным* испытаниям для проверки их соответствия заказу и *эксплуатационным* испытаниям для установления соответствия характеристик их свойств условиям эксплуатации, требованиям технических условий и стандартов.

По виду воздействия на устройство испытания делят на *электрические, тепловые, механические, климатические, акустические и гидравлические*.

По продолжительности различают *нормальные, ускоренные, долговременные и циклические испытания*.

В процессе испытаний оцениваются такие свойства электротехнических устройств, как надёжность. В результате испытаний электрооборудование, может быть разрушено или оставаться пригодным для последующего использования.

Программа испытаний. Для каждого конкретного типа электрооборудования стандартами или техническими условиями устанавливается объём испытаний и программа испытаний.

Объём испытаний определяется в общем случае зависит от:

- количеством объектов испытаний;
- элементарным составом объектов испытания;
- объёмом выборок;
- типов испытаний, количеством проверок;
- количеством единичных опытов;
- суммарной продолжительностью испытаний.

Испытания электрооборудования проводят в соответствии с утверждённой программой. Программа испытаний представляет собой организационный документ, направленный на достижение поставленной цели. В программе испытаний должны быть отражены: цель испытания; объект испытания, его характерные особенности; перечень типов и последовательность проведения испытаний, наименование и требования нормативного документа к характеристикам свойств объекта испытаний, условия и план испытания.

Составной частью программы испытаний является *план испытания*. План испытания представляет собой совокупность следующих сведений по объекту испытания:

- общей организации и порядка проведения испытаний;
- критериях завершения испытаний;
- способе испытания;
- контрольных схемах и контрольных точках;
- способах и правилах формирования выборок при выборочном методе контроля;
- необходимости и форме документального подтверждения мест получения выборок или отбора проб при выборочном методе контроля;
- видах выборочного контроля;
- приёмочном уровне дефектности;
- количестве опытов, в том числе параллельных опытов;
- установленных требованиях по типу испытания и в целом для объекта испытания;
- решающих правилах при проведении единичных опытов, по типам испытаний и по объекту испытаний в целом.

Средства испытаний. Испытания электрооборудования, его исследования проводят, как правило, в лабораторных условиях, и с использованием средств испытаний, к которым относят:

- испытательное оборудование;
- датчики электрических величин;
- средства измерения;
- средства оценки;
- вспомогательные технические устройства;
- вспомогательные технические материалы;
- средства моделирования, хранения, обработки данных испытания и хранения протоколов испытания (компьютеры и носители информации).

Если по недостоверным результатам испытаний серийно выпускаемого электрооборудования, оказывается не выявленный дефект, то он может оказаться причиной снижения надёжности в СЭС.

3.5. Формирование качества электрооборудования при его монтаже и эксплуатации

Монтаж и наладка электрооборудования. В соответствии с рабочей проектной документацией системы электроснабжения предприятия осуществляется монтаж технологического, энергетического и электротехнического оборудования. Монтаж электротехнического оборудования и его наладка, прокладка кабельных линий осуществляется под техническим надзором службы главного энергетика предприятия. От качества монтажа электрооборудования зависит надёжность его работы в условиях эксплуатации и надёжность СЭС в целом.

Эксплуатация электроустановок. Основной задачей эксплуатации электрооборудования является организация обслуживания электрооборудования, обеспечивающая бесперебойное электроснабжение, исключая простои технологического оборудования из-за неисправности электрооборудования при надлежащем качестве электроэнергии и минимальном её расходе и других эксплуатационных материалов.

К эксплуатации электрооборудования допускается подготовленный персонал, не имеющий противопоказаний к работе в электроустановках по состоянию здоровья, знающий «Правила эксплуатации электроустановок потребителей» и «Межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» и допущенный к эксплуатации электроустановок с соответствующей группой по электробезопасности.

В процессе *технического обслуживания* электрооборудования в электроустановках электротехнический персонал осуществляет:

- технический осмотр электрооборудования и его техническое обслуживание (При этом обращается внимание на техническое состояние оборудования [целостность изоляторов трансформаторов, коммутационных и защитных аппаратов, уровень масла в баках трансформаторов и выключателей и т. д.]. На слух

проверяется звук от трансформаторов, а также отсутствие звуков электрических разрядов. Отсутствие электрических разрядов проверяется также визуально в ночное время);

- производство оперативных переключений;
- подготовка схемы и рабочего места для ремонтных бригад, допуск их к работе, надзор за производством ремонтных работ и восстановление схемы по окончанию всех работ;
- проведение небольших по объёму работ в порядке текущей эксплуатации.

Обо всех, замеченных при техническом осмотре, недостатках и нарушениях в работе оборудования делается запись в оперативном порядке и сообщается дежурному диспетчеру или ответственному за эксплуатацию электрооборудования.

Ремонт электрооборудования. Правильная организация эксплуатации электрооборудования предприятий предполагает своевременное проведение планово-предупредительных ремонтов и эксплуатационных испытаний электрооборудования. Планово-предупредительные ремонты включает в себя текущий и капитальный ремонты.

Текущий ремонт проводится для обеспечения работоспособности электрооборудования, у которого обнаружены дефекты отдельных элементов. При текущем ремонте электрооборудования выполняется очистка, уплотнение, ремонт неисправных элементов или их замена новыми элементами из состава запасных частей или комплектов без разборки основной конструкции электрооборудования, регулировка электрооборудования и послеремонтные испытания при необходимости.

Капитальный ремонт электрооборудования осуществляется для его восстановления после устранения дефектов и обеспечения надёжной и экономичной работы в межремонтный период. При капитальном ремонте оборудования производится его разборка, измерения, устранение выявленных дефектов, восстановление или замена изношенных деталей и сборочных единиц, регулировка электрооборудования и послеремонтные испытания.

При выполнении капитальных ремонтов может проводиться модернизация электрооборудования с учётом достижений науки и техники и передового опыта эксплуатации.

Подготовка и повышение квалификации электротехнического персонала.

К эксплуатации и ремонту электрооборудования допускается персонал от рабочего до руководителя, имеющий соответствующее образование и квалификацию. Рабочие электротехнических специальностей должны окончить образовательное учреждение начального профессионального образования – профессиональное училище или профессиональный лицей – с присвоением соответствующей квалификации. Специалисты среднего звена должны иметь среднее профессиональное образование и окончить техникум или колледж с присвоением квалификации техник или старший техник. Руководящий персонал должен иметь высшее профессиональное образование с присвоением квалификации инженер.

Все выпускники учреждений профессионального образования на своих

рабочих местах должны изучить местные инструкции и Положения, связанные с эксплуатацией и ремонтом конкретного оборудования, применяемого в конкретных схемах и условиях эксплуатации.

Раз в 5 лет персонал должен проходить курсы повышения квалификации, на которых изучаются новые виды электрооборудования, методы испытания, изменения в нормативной документации.

Эксплуатационные испытания электрооборудования. Испытания электрооборудования и устройств электроустановок в процессе эксплуатации проводятся электролабораторией предприятия или электролабораторией сторонней организации. Электролаборатории комплектуются требуемыми программой испытания средствами испытания.

Электролаборатории могут проводить приёмо-сдаточные, межремонтные и ремонтные испытания в соответствии с требованиями нормативной документации.

Электролаборатории могут проводить не только контрольные испытания, но и техническую диагностику электрооборудования, устройств электроустановок в условиях эксплуатации.

Техническая диагностика электрооборудования проводится с целью своевременного выявления в условиях эксплуатации медленно развивающихся дефектов в электрооборудовании, установления признаков этих дефектов, которые давали бы возможность прогнозирования и предсказаний отклонений в режимах работы электрооборудования и перерастания дефекта в отказ.

Техническая диагностика осуществляется с помощью технического осмотра, либо с помощью средств измерения или специальной диагностической аппаратуры.

Например, состояние электрооборудования можно продиагностировать путём контроля изоляции, измерения сопротивления изоляции, измерения сопротивления заземления, контроля нагрева элементов электрооборудования и так далее.

В процессе работы многие части электрооборудования нагреваются, причём нагрев может быть выше допустимых норм. Это может привести к ускоренному старению изоляции, сокращению срока службы и выходу из строя электрооборудования.

Контроль температуры нагрева частей электрооборудования осуществляется с помощью стационарных и переносных приборов: термометров, датчиков температуры и т. п.

Для контроля температуры масла трансформатора, системы охлаждения электрических машин применяются термометры с указателем манометрического типа. Температура токоведущих частей коммутационных аппаратов, контактных соединений может измеряться с помощью пирометров.

3.6. Формирование качества системы электроснабжения при проектировании

Проект представляет собой изображение будущей электроустановки или

сооружения (системы), представленное в чертежах, схемах, таблицах, описаниях, созданных на основе расчётов и сопоставления вариантов. Проектирование систем электроснабжения заключается в разработке технической документации с выполнением требуемых расчётов, необходимых для выбора устройств, определения их места положения в системе, монтажа и сооружения элементов системы. В процессе разработки технической и технологической документации принимаются основные принципиальные решения, определяющие функциональные возможности системы, её технические характеристики, уровень автоматизации, определяется объём работ и капитальных вложений.

Заложенные в проекте технические решения определяют технический уровень, надёжность и экономическую эффективность системы электроснабжения.

Обычно проектирование новых предприятий выполняется в проектных организациях. Проектные отделы могут быть созданы на самих предприятиях. В настоящее время проектирование осуществляется с использованием систем автоматизированного проектирования. При проектировании используются результаты открытий, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Перед началом проектирования проводится анализ эксплуатации электротехнических устройств, материалов при различных условиях эксплуатации. Для этого широко используются персональные компьютеры.

Сопоставление вариантов осуществляется на основе технико-экономического обоснования. Разработка технико-экономического обоснования является предпроектным документом, который определяет направление решения по теме.

Излагается целесообразность проведения важнейших научно-исследовательских работ с целью эффективного построения и функционирования элементов системы электроснабжения, опытно-конструкторских работ, направленных на создание новых электротехнических устройств.

При разработке технико-экономического обоснования в части электроснабжения обычно ограничиваются определением мест присоединения предприятия к источникам питания (энергосистеме).

После утверждения технико-экономического обоснования выполняется рабочий проект.

Разработка электрической части проекта выполняется в виде пояснительной записки и расчётных таблиц. В пояснительной записке формулируются основные направления и принципы проектирования, отражающие технологию производства на предприятии и ожидаемый экономический эффект, который уточняется на стадии рабочего проектирования. Пояснительная записка, как правило, имеет следующие части:

- электроснабжение;
- силовое и технологическое оборудование, электропривод и автоматизация, электроосвещение.

- ремонт электрооборудования.

Содержание проекта может иметь следующие разделы:

- исходные данные для проектирования, генплан предприятия,

планировки цехов;

- характеристика схемы электроснабжения;
- характеристика потребителей электроэнергии, в том числе со специфическими режимами работы, и электрические нагрузки;
- источники электроснабжения, баланс мощности и электроэнергии;
- выбор напряжения питающей и распределительной сети;
- линии электропередачи и внецеховые кабельные сети, цеховые кабельные сети и шинопроводы;
- расчёт токов короткого замыкания;
- конструктивное выполнение главной подстанции предприятия и потребительских (цеховых) трансформаторных подстанций, распределительных пунктов (6 – 10) кВ;
- компенсация реактивной мощности;
- релейная защита и автоматика, телемеханизация устройств системы электроснабжения;
- мероприятия по обеспечению качества электроэнергии;
- расчёт показателей надёжности;
- мероприятия по регулированию напряжения и мощности;
- рабочее и защитное заземление;
- молниезащита;
- электроосвещение;
- обеспечение безопасности при монтаже, эксплуатации и ремонте электрооборудования;
- технико-экономические показатели;
- условия присоединения к энергосистеме;
- заключение.

При проектировании составляются кабельный журнал, заказные спецификации на оборудование и материалы, сметы затрат, разного вида ведомости, опросные листы.

Одним из путей улучшения качества проектной работы является автоматизация проектирования. В проектных организациях и отделах промышленных предприятий используются системы автоматизированного проектирования различного назначения. Они способствуют созданию оптимального проекта, соответствующего заданию на проектирование, отвечающего действующим нормам и правилам, имеющего наименьшие затраты при строительстве и монтаже электроустановок, а также при их эксплуатации. Система автоматизированного проектирования позволяют сократить сроки проектирования и обеспечить высокие технико-экономические показатели проекта и системы электроснабжения.

Допущенные при проектировании системы электроснабжения ошибки могут снизить надёжность электроснабжения в условиях эксплуатации.

4. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Качество электроэнергии – комплексное свойство электроэнергии первого уровня, характеризующее способность обеспечивать нормальное функционирование электроприёмников рабочих механизмов и системы электроснабжения в целом.

К частным свойствам второго более низкого уровня можно отнести, например, напряжение или ток в установившемся или в переходном режимах. ГОСТ 13109–97 распространяется на напряжение и определяет простые свойства, их характеристики и контрольные нормативы.

К простым свойствам по напряжению ГОСТ 13109–97 относит следующие свойства:

- *отклонение* напряжения;
- *колебания* напряжения;
- *несимметрию* трёхфазной системы напряжения;
- *несинусоидальность* напряжения;
- *отклонение частоты*;
- *провал* напряжения;
- *импульс* напряжения;
- *временное перенапряжение*.

С целью количественной выражения внешней определённости перечисленных простых свойств, их размера, нормативным документом введены характеристики простых свойств – показатели качества электроэнергии, которые приведены в табл. 4.6. Во всей *совокупности* показатели качества электроэнергии (δU_v , δU_t , P_t , K_{2U} , K_{0U} , K_U , $K_{U(n)}$, Δf , Δt_n , $U_{\text{имп}}$, $K_{\text{пер}U}$) определяют комплексное свойство – качество электроэнергии.

Качество электроэнергии, как вида продукции, определяется степенью соответствия *показателей качества электроэнергии* (ПКЭ) их установленным контрольным требованиям (ГОСТ 13109–97 установленные контрольные требования именует нормами) [11].

Каждый электроприёмник предназначен для работы при определённых показателях качества электроэнергии, называемых номинальными: номинальной частоте, номинальном напряжении, номинальном токе и т. п. Должна обеспечиваться надёжная работа (без сбоев и перерывов в электроснабжении) и при допустимых отклонениях параметров от номинальных значений.

Качество электроэнергии, производимой на электростанциях, и получаемой на месте потребления, может отличаться. Качество электроэнергии может отличаться до включения электроприёмника в ЭС и после его включения. Отсюда следует основная специфика качества электроэнергии по отношению к качеству продукции – зависимость его не только от производителя электроэнергии, но и от потребителя электроэнергии. В этом случае говорят, что электрическая сеть и электроприёмник оказывают влияние друг на друга. На рис. 4.0 показан возможный вариант взаимного влияния электрической сети и электроприёмников. Чёрными стрелками показано направление распространения помехи. Светлая стрелка изображает отсутствие искажений от данного

элемента системы электроснабжения. То есть качество электроэнергии связано с электромагнитной совместимостью электрической сети и электроприёмников. Под электромагнитной совместимостью понимают способность ЭП нормально функционировать в его электромагнитной среде (в ЭС, к которой он присоединён), не создавая недопустимых помех для других электроприёмников [13].

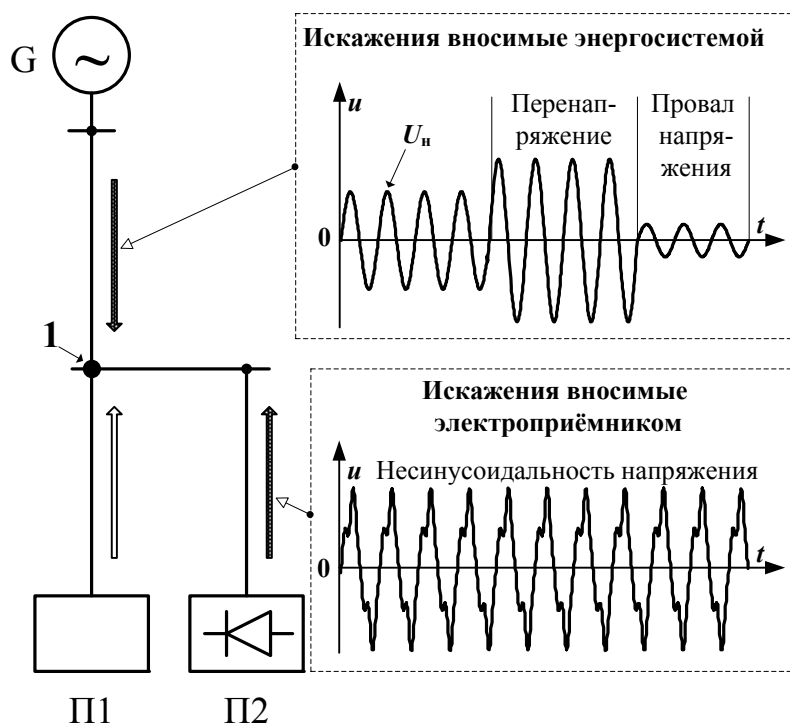


Рис. 4.0. Источники искажения качества электроэнергии:
 G – источник питания (энергосистема); 1 – точка общего присоединения; П1 – неискажающий электроприёмник; П2 – искажающий электроприёмник;
 U_n – номинальное напряжение сети

4.1. Показатели и нормы качества электроэнергии

В связи с тем, что взаимное влияние ЭП и ЭС существует объективно, то целесообразно и необходимо установить нормативные меры этого влияния, стандартизировать ПКЭ. Таким документом является ещё действующий до 2012 г. ГОСТ 13109–97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения» [12], устанавливающий показатели качества электроэнергии. Названный стандарт является межгосударственным нормативным документом в области качества электроэнергии.

Стандарт устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электроэнергии, или электроприёмники электроэнергии (точки общего присоединения).

ПКЭ являются количественными характеристиками, определяющих качество электроэнергии по одному или нескольким свойствам. Нормой качества электроэнергии является установленное предельное значение ПКЭ [11], представляющий собой контрольный норматив показателя.

Нормы, установленные в [12], подлежат включению в технические

условия на присоединение потребителей электроэнергии и в договоры на пользование электроэнергией между электросбытовыми и электросетевыми организациями и потребителями электроэнергии.

При этом для обеспечения норм стандарта в точках общего присоединения допускается устанавливать в технических условиях на присоединение потребителей, являющихся виновниками ухудшения ПКЭ, и в договорах на пользование электроэнергией с такими потребителями более жёсткие нормы (с меньшими диапазонами изменения соответствующих ПКЭ), чем установлены в настоящем стандарте. Точкой общего присоединения является точка электрической сети общего назначения, электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электроэнергии, к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей.

По согласованию между электросбытовой и электросетевой организацией и потребителями допускается устанавливать в указанных технических условиях и договорах требования к ПКЭ, для которых в настоящем стандарте нормы не установлены.

Стандартом установлены два вида норм качества электроэнергии: нормально допустимые и предельно допустимые. Оценка соответствия ПКЭ указанным нормам проводится в течение расчётного периода, равного 24 ч. Нормы качества электроэнергии связаны с изменением мощности в ЭС (графиком электрической нагрузки), который носит вероятностный характер. Поэтому в стандарте оговаривается необходимость выполнения нормально допустимых значений норм в течение 95 % времени каждых суток.

Контроль качества электроэнергии в точках общего присоединения потребителей электроэнергии к системам электроснабжения общего назначения проводят электросбытовые и электросетевые организации. Контроль за соблюдением электросбытовыми и электросетевыми организациями и потребителями электроэнергии требований стандарта по качеству электроэнергии осуществляют органы надзора и аккредитованные в установленном порядке испытательные лаборатории по качеству электроэнергии.

Указанные организации выбирают точки контроля по согласованию с потребителем электроэнергии в соответствии с нормативными документами, утверждёнными в установленном порядке.

Нормы, установленные стандартом [2], применяют при проектировании и эксплуатации электрических сетей, а также при установлении уровней помехоустойчивости электроприёмников и уровней кондуктивных электромагнитных помех, вносимых этими электроприёмниками. Под кондуктивной электромагнитной помехой в системе электроснабжения понимается электромагнитная помеха, распространяющаяся по элементам электрической сети.

Нормы качества электроэнергии в ЭС, находящихся в собственности потребителей электроэнергии, регламентируемые отраслевыми стандартами и иными нормативными документами, не должны быть менее жёсткими по отношению к нормам качества электроэнергии, установленных стандартом [12] в точках общего присоединения. При отсутствии указанных отраслевых стандартов и иных нормативных документов нормы стандарта являются

обязательными для ЭС потребителей электроэнергии.

Основными ПКЭ, характеризующими установившиеся режимы работы электрооборудования, являются:

- установившееся отклонение частоты δf ;
- установившееся отклонение напряжения δU_y ;
- размах изменения напряжения δU_t ;
- доза фликера P_t ;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$;

Часть ПКЭ связана с кратковременными помехами, возникающими в ЭС в результате коммутационных процессов, грозových атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики и в послеаварийных режимах. К ним относятся:

- глубина провала напряжения $\delta U_{\text{п}}$;
- длительность провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$;
- импульсное напряжение $U_{\text{имп}}$;
- длительность импульса по уровню половины его амплитуды $\Delta t_{\text{имп}}$;
- коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$;
- длительность временного перенапряжения $\Delta t_{\text{пер}U}$.

В ЭС выпрямленного тока пользуются следующими ПКЭ:

- пульсация напряжения;
- размах пульсации напряжения;
- коэффициент пульсации.

Все ПКЭ можно разделить на две группы: нормируемые и ненормируемые. К нормируемым ПКЭ относятся показатели установившихся режимов: δf , δU_y , δU_t , K_{2U} , K_{0U} , K_U , $K_{U(n)}$. К ненормируемым ПКЭ – показатели кратковременных режимов: $\delta U_{\text{п}}$, $\Delta t_{\text{п}}$, $U_{\text{имп}}$, $K_{\text{пер}U}$.

На размах изменения напряжения и дозу фликера установлены только предельно допустимые значения.

ПКЭ носят случайный характер, что связано с графиком нагрузки.

За фактические значения ПКЭ принимаются значения, установленные в период контрольного времени. Значение величины (X) должно находиться в пределах ($-X_{\text{нд}} < X < X_{\text{нд}}$). Здесь ($-X_{\text{нд}}$ и $X_{\text{нд}}$) – нижнее и верхнее отклонения от контрольного норматива контролируемой величины.

Качество электроэнергии, получаемой потребителем из электросети, оказывает влияние на технологический процесс промышленного производства, качество выпускаемой продукции, расход электроэнергии, на работу бытовых электроприёмников. В то же время на качество электроэнергии оказывают влияние сами электроприёмники. Поэтому необходим контроль ПКЭ.

В промышленности для оценки качества электроэнергии применяют

технико-экономические показатели с учётом ущерба, выявленного из-за низкого качества электроэнергии.

В области качества электроэнергии действуют следующие нормативные документы:

1. ГОСТ 13109–97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2. ГОСТ Р 51317.4.7–2008 «Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств».

3. ГОСТ Р 51317.4.30–2008 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии».

4. ГОСТ Р 53333–2008 «Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

5. ГОСТ 23875–88. Качество электрической энергии. Термины и определения.

4. 2. Электромагнитная совместимость электроприёмников и электрической сети

Взаимное влияние электрооборудования и питающей электросети называют электромагнитной совместимостью.

Проблема электромагнитной совместимости связана с определением и поддержанием оптимальных показателей качества электроэнергии, при которых обеспечиваются технические требования при минимальных экономических затратах.

Взаимные влияния ЭС и ЭП друг на друга, при которых наблюдаются снижение надёжности работы электротехнических устройств, производительности технологического оборудования, качества продукции, делятся на технологические воздействия и электромагнитные помехи.

Электромагнитные помехи возникают при однофазных коротких замыканиях в ЭС, при междуфазных замыканиях, возникающих при атмосферных (грозовых) явлениях, а также при отключении линий и конденсаторов. Несинусоидальность напряжения, колебания напряжения и перенапряжения в ЭС усиливают восприимчивость электротехнических устройств с электронными устройствами управления.

При решении задач повышения качества электроэнергии выделяют, в первую очередь экономические и технические вопросы.

Экономические вопросы включают в себя методы расчёта убытков (ущерба) от снижения качества электроэнергии в системах промышленного и бытового электроснабжения. Технологическая составляющая ущерба вызвана, в основном, недовыпуском предприятиями продукции или снижением её качест-

ва. Электромагнитная составляющая ущерба обусловлена увеличением потерь активной мощности в ЭС, ростом потребления активной и реактивной мощности ЭП, снижением срока службы изоляции проводников. У бытовых ЭП (радио- и телеприёмники) появляются треск и шумы, сбой в работе компьютеров и другой электронной техники.

Технические аспекты включают в себя разработку технических средств и мероприятий, улучшающих качество электроэнергии, а также организацию системы контроля и управления качеством электроэнергии [15].

От электрических сетей систем электроснабжения общего назначения питаются различные ЭП. Электроприёмниками являются совокупность различных машин, механизмов различного назначения с различным режимом работы. Электрическая нагрузка промышленного предприятия, социально – культурного и бытового учреждения постоянно изменяется и носит случайный характер. Наиболее энергоёмкими являются промышленные электроприёмники. При включении дополнительной нагрузки с новыми электроприёмниками целесообразно проверить параметры ЭС, качество электроэнергии на шинах, к которым должна подключаться дополнительная нагрузка [19] и провести оценку электромагнитной совместимости ЭС и подключаемых электроприёмников.

Воздействие каждого отдельно взятого бытового электроприёмника на ЭС незначительно, совокупность же электроприёмников, подключаемых к ТП, оказывает на неё существенное влияние. А на окружающую среду влияют и одиночные электроприёмники.

Ниже приведено распределение бытовых электроприёмников различных групп, подключаемых к ТП (в процентах от общей нагрузки), полученное на основе анализа нагрузки двух городских ТП [14]:

Группа бытовых ЭП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Доля бытовых ЭП в нагрузке ТП, %	24-28	12-16	18-22	5-7	7-9	3-5	5-7	7-9	7-9

Вместе с тем, следует отметить, что в городских ЭС большинство ТП нагружены только бытовой нагрузкой.

Анализ совместной работы промышленной и бытовой нагрузок.

Большинство явлений, происходящих в электрических сетях и ухудшающих качество электроэнергии, происходят в связи с особенностями совместной работы электроприёмников и электрической сети. Семь ПКЭ в основном обусловлены потерями (падением) напряжения на участке электрической сети, от которой питаются потребители.

На рис. 4.1 приведены годовой график потребления активной мощности смешанной нагрузкой ТП (рис. 4.1, а), график изменения средневзвешенного $\text{tg}\varphi$ в течение года (рис. 4.1, б). Из рис. 4.1, а видно, что на контролируемой подстанции превалирует бытовая нагрузка, составляющая (53 – 77) % от общей нагрузки в разные месяцы года [14]. Из рис. 4.1, б видно, что бытовая нагрузка ухудшает показатели реактивной мощности на шинах подстанции ($\text{tg}\varphi$).

Потери напряжения на k -м участке электрической сети определяются

выражением:

$$\Delta U_k = (P_k \cdot R_k + Q_k \cdot X_k) / U_n,$$

где R_k – активное и X_k – реактивное сопротивления k -го участка сети; P_k – активная и Q_k – реактивная мощности, передаваемые по участку сети; U_n – номинальное напряжение сети.

Сопротивления R и X практически постоянны, а активная (P) и реактивная (Q) мощности, передаваемые по k -му участку сети, переменны, то и потери напряжения будут изменяться по-разному:

- при медленном изменении нагрузки в соответствии с её графиком – будет изменяться отклонение напряжения;
- при резкопеременном характере нагрузки могут возникнуть колебания напряжения;
- при несимметричном распределении нагрузки по фазам электрической

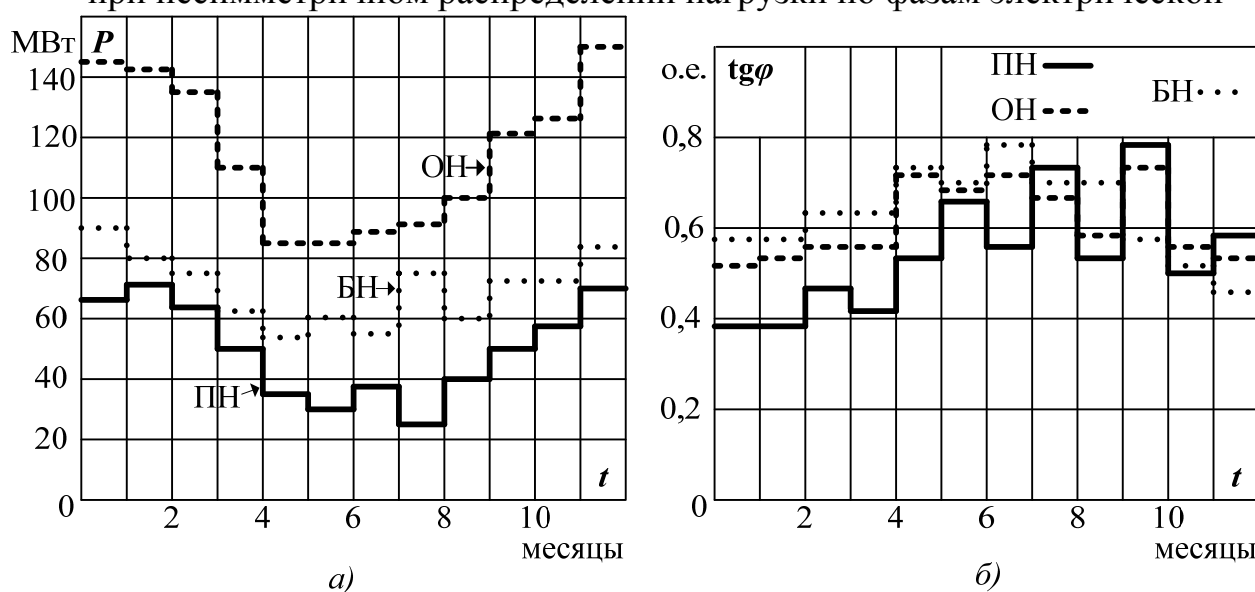


Рис. 4.1. Годовой график потребления активной мощности (а) и средневзвешенный $\text{tg}\varphi$ в течение года (б) на ТП:

ПН – промышленная нагрузка; БН – бытовая нагрузка; ОН – общая нагрузка

сети появляется несимметрия напряжений в трёхфазной системе;

- при нелинейной нагрузке появляется несинусоидальность формы кривой напряжения.

В отношении этих явлений потребители электроэнергии имеют возможность тем или иным образом влиять на её качество.

Другие факторы, ухудшающие качество электроэнергии, зависят от особенностей работы сети, климатических условий или природных явлений. Поэтому, влиять на это потребитель электроэнергии не имеет возможности, он может только защищать своё оборудование специальными средствами.

4.3. Характеристика показателей качества электроэнергии

4.3.1. Установившееся отклонение частоты.

Значение установившегося отклонения частоты определяется как

разность между значением частоты в системе электроснабжения в рассматриваемый момент времени и её номинальным или базовым значением [11] и определяется по выражению

$$\delta f = f - f_n,$$

где f – частота переменного тока в системе электроснабжения в текущий момент времени; f_n – номинальное значение частоты.

Частота переменного тока в электрической системе определяется скоростью вращения генераторов электростанций. Номинальное значение частоты f_n в электроустановках Российской Федерации установлено 50 Гц. В системах электроснабжения оно обеспечивается при наличии резерва активной мощности. Отклонение частоты мало отражается на работе ЭП. Однако при электроснабжении потребителей электроэнергии от собственных генераторов небольшой мощности влияние отклонения частоты становится заметным.

Допустимые нормы по отклонениям частоты составляют

$$\delta f_{\text{норм}} = \pm 0,2 \text{ Гц}; \quad \delta f_{\text{пред}} = \pm 0,4 \text{ Гц}.$$

Отклонение частоты показано на рис. 4.2

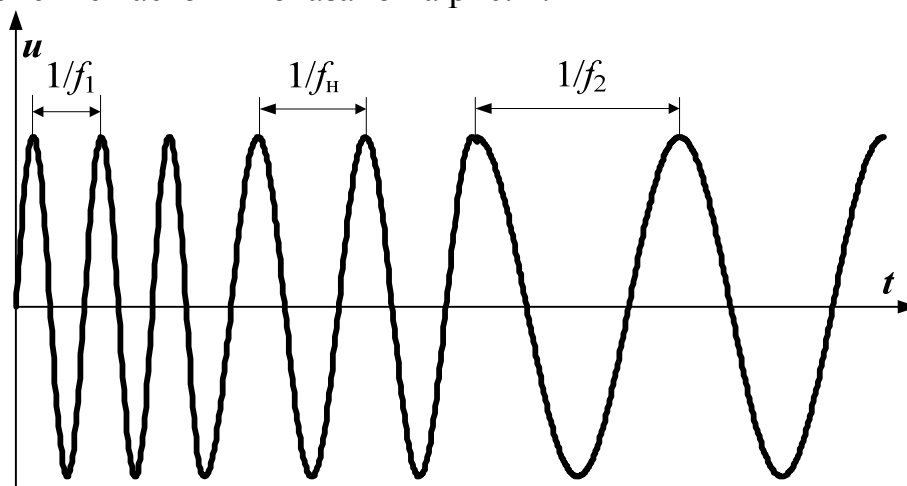


Рис. 4.2. Установившееся отклонение частоты:

соотношение отклонений частот $-f_1 > f_n > f_2$, где f_n – номинальное значение частоты; f_1 и f_2 – соответственно большее и меньшее значение частоты относительно номинального значения

Качество электроэнергии по отклонению частоты считают соответствующим требованиям стандарта [12], если все измеренные в течение 24 ч значения отклонений частоты находятся в интервал ограниченном предельно допустимыми значениями, а не менее 95 % всех измеренных значений отклонения частоты находятся в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями.

Дополнительно допускается определять соответствие нормам стандарта по суммарной продолжительности времени выхода измеренных значений данного показателя за нормально и предельно допустимые значения.

При этом качество электроэнергии по отклонению частоты считают соответствующим требованиям стандарта, если суммарная продолжительность вре-

мени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, то есть 1 ч. 12 мин, а за пределы допускаемых значений – 0 %.

Отклонение частоты является глобальным ПКЭ и поэтому относится ко многим потребителям. Другие ПКЭ, рассматриваемые ниже, являются локальными, местными.

4.3.2. Отклонение напряжения.

Значение отклонения напряжения определяется как разность между значением напряжения в данной точке системы электроснабжения в рассматриваемый момент времени и его номинальным или базовым значением [11].

Отклонение напряжения от номинальных значений наблюдается из-за изменений суточных, сезонных и технологических графиков электрических нагрузок потребителей, мощности компенсирующих устройств, схем и параметров электрических сетей, регулирования напряжения в ЭС энергосистемы и потребителей.

Отклонение напряжения обусловлено изменением потерь напряжения, вызываемых изменением мощностей нагрузок.

Отклонение напряжения определяется в абсолютных значениях (В, кВ) и в процентах от номинального значения

$$\delta U_y = U_y - U_n;$$

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_n}{U_n} 100 \%,$$

где U_y – установившееся значение напряжения в данный момент времени;
 U_n – номинальное междуфазное (фазное) напряжение сети в месте контроля.

Отклонение напряжения нормируется на выводах электроприёмников и составляет

$$\delta U_{y \text{ норм}} = \pm 5 \% \text{ и } \delta U_{y \text{ пред}} = \pm 10 \%.$$

Отклонение напряжения в пределах $(0,9 - 1,1)U_n$ показано на рис. 4.3, а.

За установившееся значение отклонения напряжения принимается такое значение, которое сохраняется в течение 1 мин и более.

Изменение напряжения при передаче электроэнергии по участку электрической сети можно проиллюстрировать на рис. 4.4.

С целью наглядного представления о перенапряжениях, провалах напряжения путём сравнения с отклонениями, колебаниями напряжения на рис. 4.3, б представлена характерная осциллограмма.

По линии электропередачи, содержащей в схеме замещения (рис. 4.4, а) активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X передаётся мощность $P + jQ$. Нагрузка линии симметричная. В начале линии фазное напряжение $U_{\phi 1}$, в конце линии – $U_{\phi 2}$. Ток в линии – I , отстающий от напряжения $U_{\phi 2}$, на угол φ .

На векторной диаграмме (рис. 4.4, б) к вектору $U_{\phi 2}$ прибавим падение напряжения в линии IR и IX . Получим напряжение $U_{\phi 1}$ в начале линии.

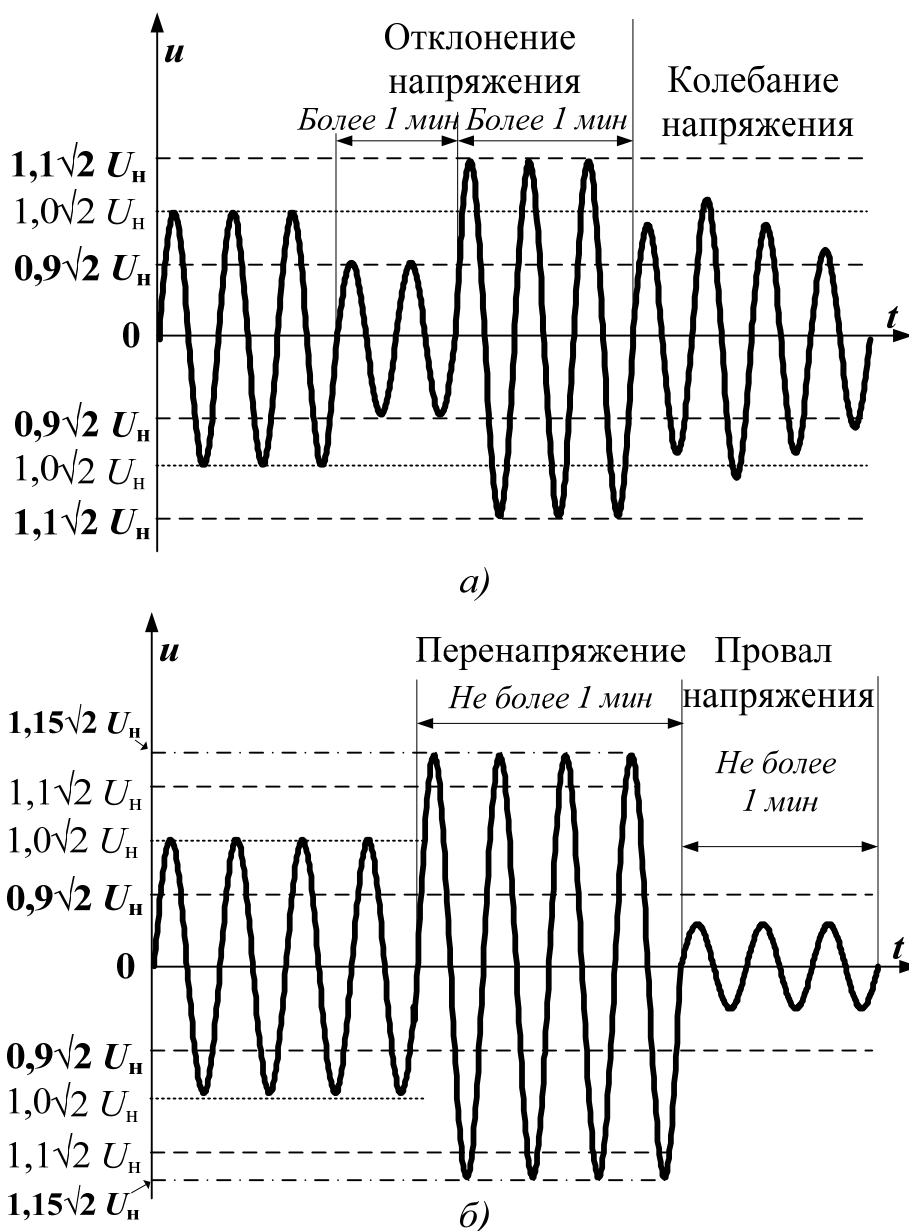


Рис. 4.3. Отклонение, колебание напряжения (а)
и перенапряжение, провалы напряжения (б)

Из векторной диаграммы определим потерю напряжения в фазе линии
 $\Delta U_\phi = af = ad + df = IR \cos\varphi + IX \sin\varphi = I(R \cos\varphi + X \sin\varphi)$.

Если примем напряжение в начале линии за номинальное, то в конце линии напряжение будет меньше на значение потери напряжения в линии. По отношению к номинальному напряжению разность между фактическим напряжением в конце линии и номинальным напряжением составит

$$\delta U_y = \frac{U - U_H}{U_H} 100 \%.$$

Это значение можно считать отклонением напряжения в конце линии (у электроприёмника).

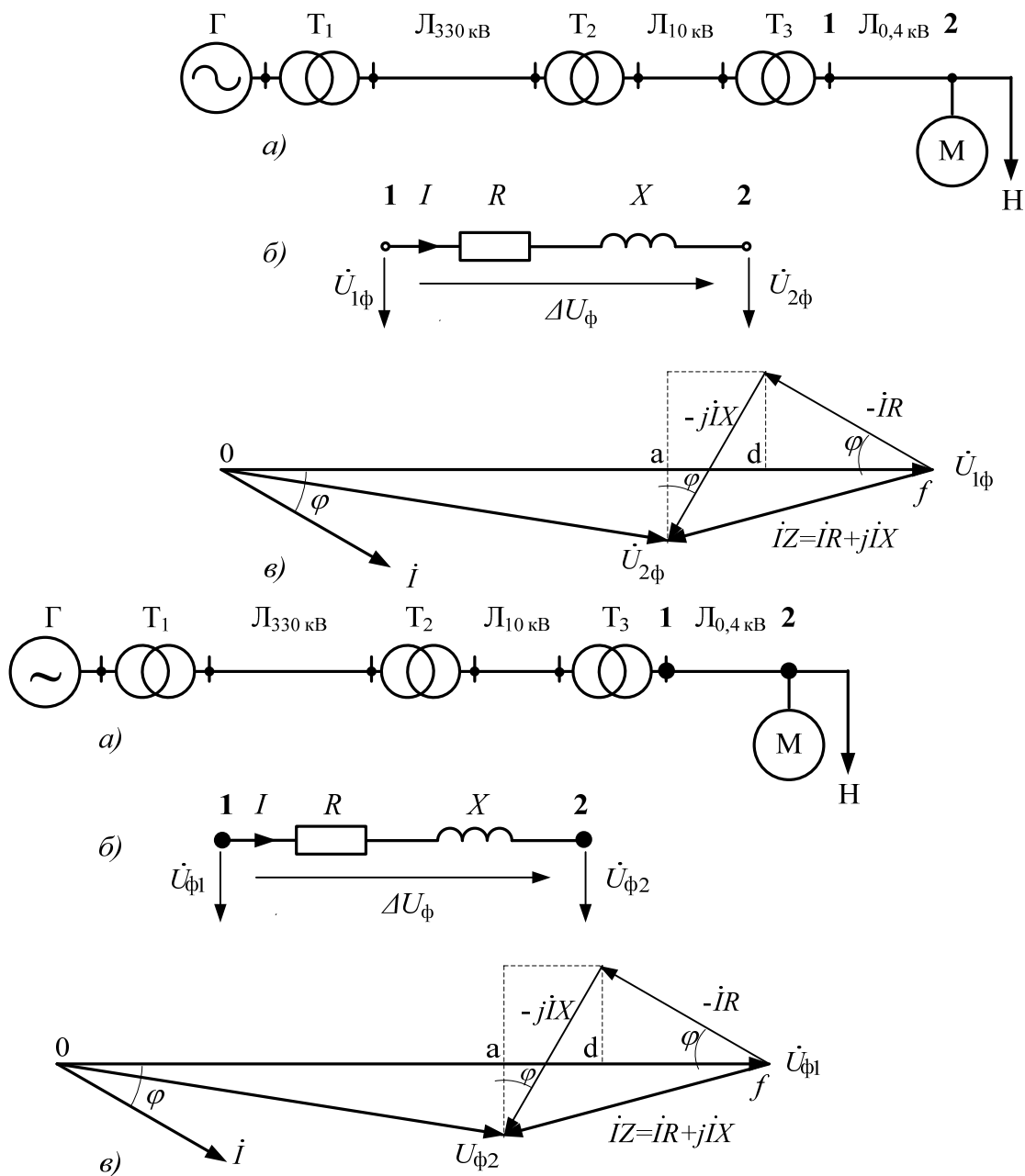


Рис. 4.4. Однолинейная схема электрической сети (а), схема замещения участка сети 1 – 2 с номинальным напряжением 0,4 кВ (б), векторная диаграмма (в) одной фазы трёхфазной линии 0,4 кВ с обобщённой трёхфазной нагрузкой H и обобщённой трёхфазной электродвигательной нагрузкой M целом

как напряжение основной частоты прямой последовательности

$$U_{1(1)i} = (U_{AB(1)i} + U_{BC(1)i} + U_{CA(1)i})/3.$$

Вычисляют значение установившегося отклонения напряжения δU_y в по формуле

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_H}{U_H} 100 \text{ \%}.$$

где U_H – номинальное междуфазное (фазное) напряжение.

Полученное значение сравнивают с нормативным значением.

4.3.3. Колебания напряжения.

Колебания напряжения – серия единичных изменений напряжения во времени [11]. Они характеризуются размахом изменения напряжения δU_t , частотой повторения изменений напряжения $F_{\delta U_t}$, интервалом между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$, дозой фликера P_t .

Источниками колебания напряжения являются потребители электроэнергии с резкопеременным графиком потребления мощности (особенно реактивной). К ним относятся дуговые сталеплавильные печи, электросварочные установки, поршневые компрессоры и другие. При резком возрастании нагрузки происходит резкое увеличение потерь напряжения в ветвях сети, питающих эту нагрузку. В результате резко снижается напряжение в узле нагрузки. При резком уменьшении нагрузки происходит резкое снижение потерь напряжения и, следовательно, наблюдается резкое повышение напряжения в узле нагрузки.

Возникая в какой-либо точке электрической сети и распространяясь по ней, колебания напряжения оказывают отрицательное воздействие на чувствительные к ним электроприёмники, относящиеся к осветительной нагрузке.

Значение *размаха изменения напряжения* определяется как разность между наибольшим и наименьшим значениями напряжения за определённый интервал времени в установившемся режиме работы источника, преобразователя электроэнергии или системы электроснабжения [11]. При этом принимается разность между следующими друг за другом действующими значениями напряжения любой формы, т. е. между следующими друг за другом максимальным и минимальным значениями огибающей действующих значений напряжения.

Огибающая действующих (среднеквадратичных) значений напряжения – ступенчатая временная функция, образованная действующими значениями напряжения, определёнными на каждом полупериоде напряжения основной частоты.

Если огибающая действующих значений напряжения имеет горизонтальные участки (при спокойном графике нагрузки), то размах изменения напряжения δU_t определяется как разность между соседними экстремумом (максимумом U_{\max} или минимумом U_{\min}) и горизонтальным участком или как разность между соседними горизонтальными участками (рис. 4.5)

$$\delta U_t = U_{\max} - U_{\min};$$

$$\delta U_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} 100 \%,$$

где U_{\max} – максимальное значение действующего напряжения; U_{\min} – минимальное значение действующего напряжения; U_n – номинальное междуфазное (фазное) напряжение.

Частота повторения изменения напряжения – число одиночных изменений напряжения в единицу времени [11] $F_{\delta U_t} = m/T$, где m – число изменений напряжения со скоростью изменения более 1 % в секунду за время T .

Длительность изменения напряжения $\Delta t_{i,i+1}$ – интервал времени от начала одиночного изменения напряжения до его конечного значения (рис. 4.5).

Колебания напряжения (рис. 4.6, а) вызывают колебания светового потока, фликер (мерцание) осветительных приборов (источников света), а также мерцание (мигание) экранов телевизоров, мониторов.

Фликер (мерцание) – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока источника света, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети.

Доза фликера – мера восприимчивости человека к действию фликера за установленный промежуток времени.

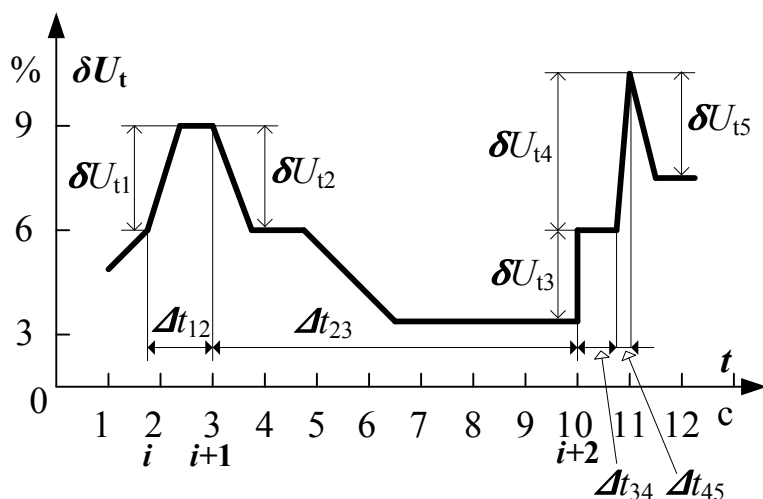


Рис. 4.5. Колебания напряжения $\delta U_1 \rightarrow \delta U_5$ (пять размахов изменения напряжения)

Стандартом устанавливается кратковременная (P_{St}) и длительная (P_{Lt}) доза фликера. Кратковременная доза фликера наблюдается на интервале времени 10 мин, длительная – на интервале 2 ч.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера P_{St} при колебаниях напряжения равно 1,38, а для длительной дозы фликера P_{Lt} при тех же колебаниях напряжения равно 1,0.

Размах изменений напряжения в точках присоединения к электрическим сетям напряжением (0,4 – 1,0) кВ допускается $\pm 10\%$ от номинального напряжения.

Предельно допустимое значение размаха изменения напряжения δU_t в точках общего присоединения к электрическим сетям от частоты повторения изменений напряжения $F_{\delta U_t}$ определяется по кривым рис. 4.6.

4.3.4. Несимметрия напряжения.

В электрической сети трёхфазной системы, в которую включаются электроприёмники, могут наблюдаться симметричные и несимметричные режимы. Симметричные режимы характеризуются равенством фазных и междуфазных (линейных) напряжений. Напряжения изображаются векторами (рис. 4.7). Фазные напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ сдвинуты по отношению друг к другу на угол 120° . Линейные напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ также сдвинуты по отношению друг к другу на угол 120° .

Несимметричный режим – режим работы многофазной системы электро-снабжения, при котором фазные напряжения или токи не образуют симметричных многофазных систем [11].

В ЭС с несимметричным потреблением мощности по фазам, возникает несимметрия напряжений (токов). Под несимметрией напряжений понимается неравенство линейных и (или) фазных напряжений по амплитудам и углам сдвига фаз между ними (рис. 4.8). На векторной диаграмме векторами $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ обозначены комплексные амплитуды напряжений (токов).

Несимметрию напряжений и токов, обусловленную несимметрией элементов электрической сети, называют продольной. Продольная несимметрия

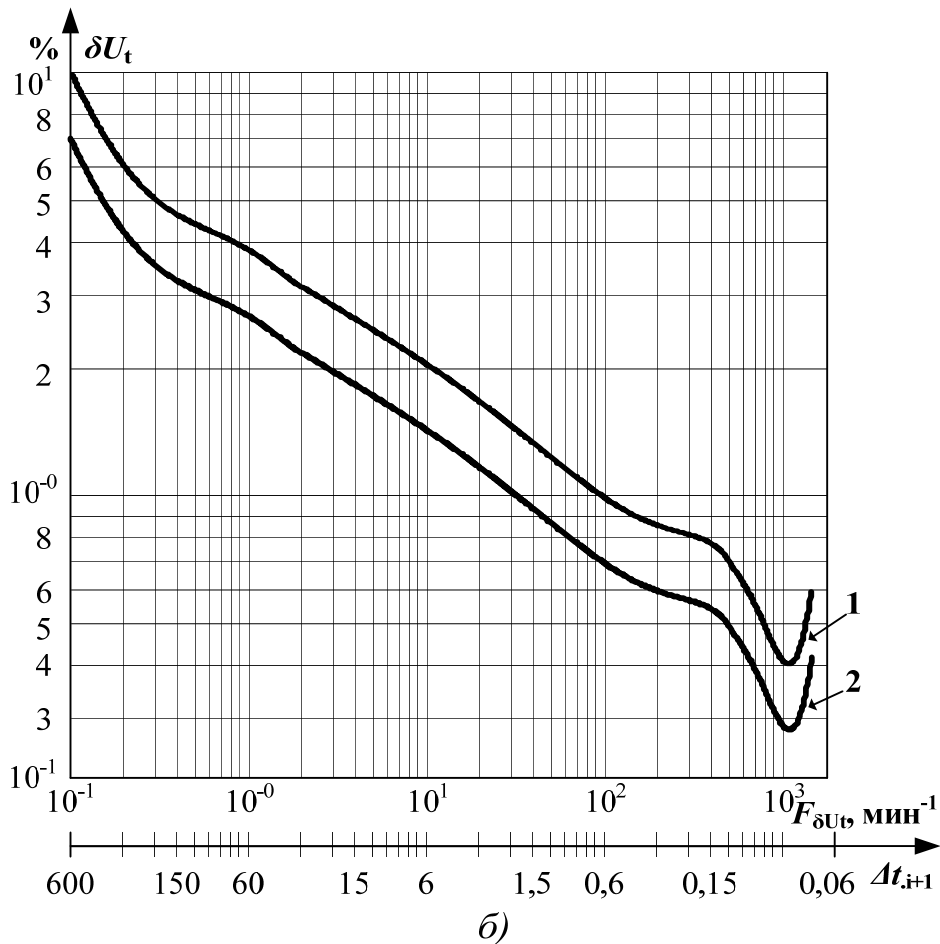
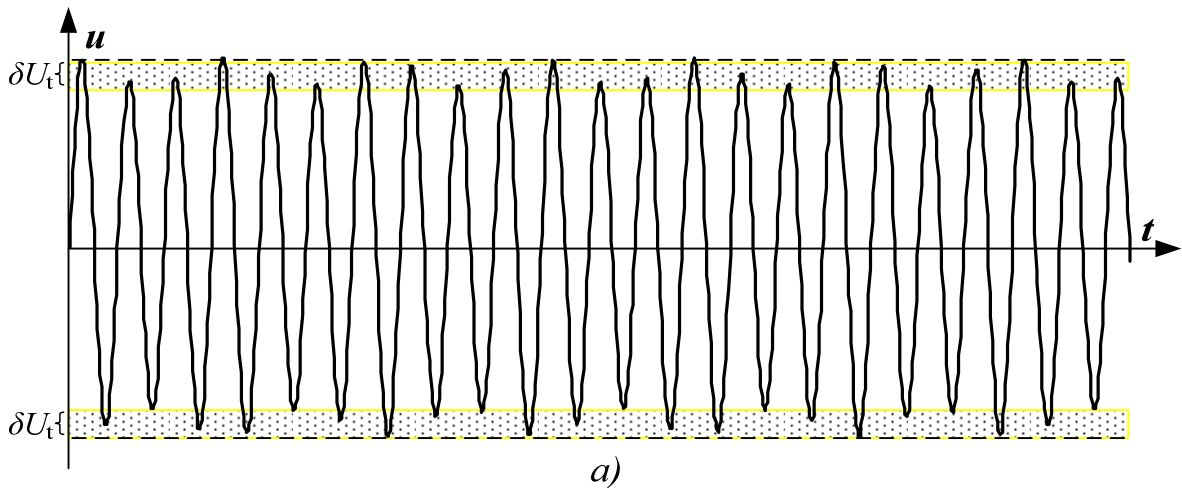


Рис. 4.6. Изменения (колебания) напряжения (а)
и предельно допускаемые размахи изменений
(колебаний) напряжения (б):

Кривая 1 – для ламп накаливания; **кривая 2** – для помещений, где требуется значительное зрительное напряжение; δU_t – размах колебания напряжения; $F_{\delta U_t}$ – частота повторений изменения

возникает при неполнофазных режимах воздушных линий (обрыв проводов), при неодинаковых (несимметричных) сопротивлениях элементов сети (ЭС с различным сечением проводов), что приводит к появлению несимметричных токов.

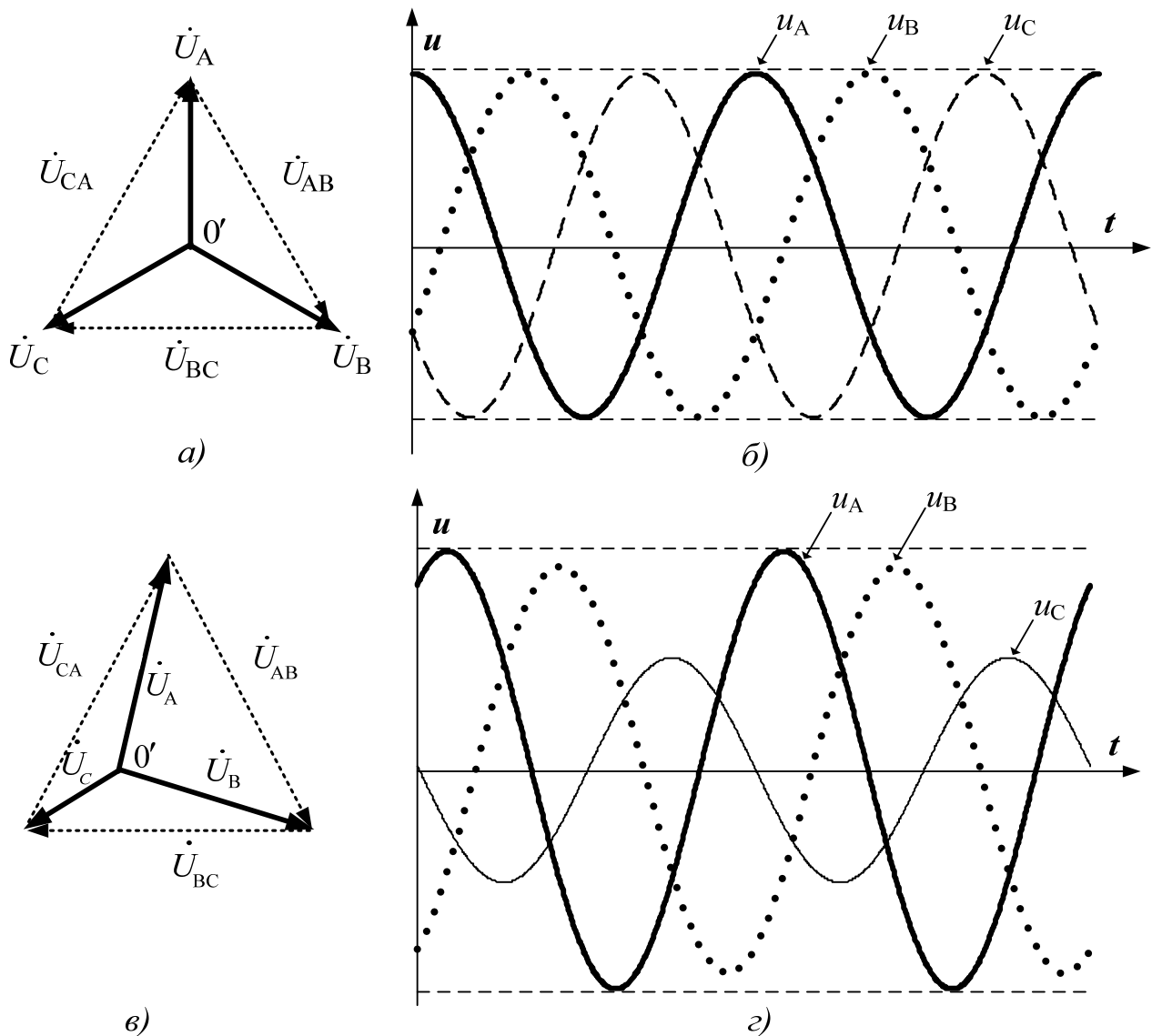


Рис. 4.7. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений и волновые диаграммы фазных напряжений в симметричном режиме (а и б) и несимметричном режиме (в и г) $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ – ; O' – нулевая точка нагрузки

Несимметрию напряжений и токов, вызванную подключением к ЭС трёхфазных и однофазных несимметричных нагрузок, называют поперечной. Поперечная несимметрия возникает при подключении электроприёмников с различными активными и реактивными сопротивлениями фаз (дуговые электропечи, сварочные трансформаторы, осветительные установки).

Несимметричные режимы в ЭС могут быть:

- постоянными или систематическими (длительная работа электроприёмников с разным сопротивлением фаз);
- эпизодическими или случайными (включение сварочного трансформатора для выполнения сварочных работ).

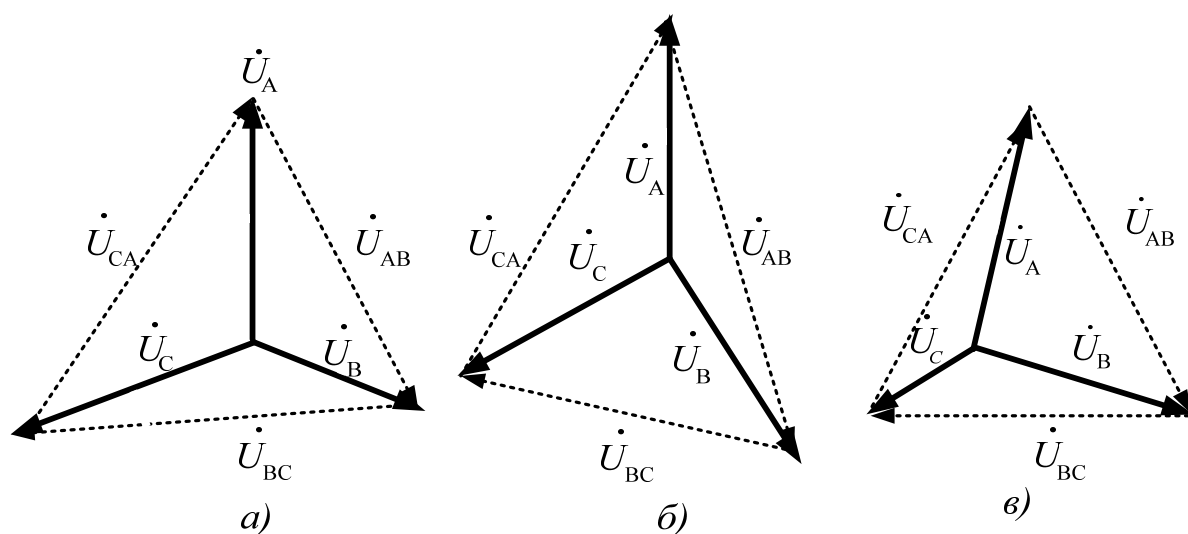


Рис. 4.8. Векторные диаграммы фазных

и линейных напряжений нагрузки в несимметричном режиме:

- а* – неравенство векторов напряжений; *б* – неравенство углов сдвига фаз между векторами напряжений; *в* – неравенство векторов напряжений и углов сдвига фаз между $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – векторы фазных напряжений; $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$

Напряжения при несимметричных режимах можно разложить на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 4.9). Значение составляющих обратной и нулевой последовательности значительно меньше значения составляющих напряжения прямой (основной) последовательности.

В свою очередь, несимметрия трёхфазной системы напряжений возникает в результате наложения на систему прямой последовательности напряжения системы обратной и (или) нулевой последовательности.

Система прямой последовательности (рис. 4.9, *а*) состоит из трёх векторов $\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$ равных по значению и повернутых относительно друг друга на 120° , причём вектор \dot{B}_1 отстаёт от вектора \dot{A}_1 .

Используя оператор $a = e^{j120^\circ}$ трёхфазной системы и $a^2 = e^{(j120^\circ)^2} = e^{j240^\circ}$, можно записать

$$\dot{B}_1 = a^2 \dot{A}_1; \dot{C}_1 = a \dot{A}_1.$$

Система обратной последовательности (рис. 4.9, *б*) состоит из трёх векторов $\dot{A}_2, \dot{B}_2, \dot{C}_2$ равных по значению и повернутых относительно друг друга на

120°, причём вектор \dot{B}_2 опережает вектор \dot{A}_2

$$\dot{B}_2 = a\dot{A}_2; \dot{C}_2 = a^2\dot{A}_2.$$

Система нулевой последовательности (рис. 4.9, в) образована тремя векторами, совпадающими по фазе

$$\dot{A}_0 = \dot{B}_0 = \dot{C}_0.$$

Выразим заданные три вектора \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} через векторы симметричных систем следующим образом

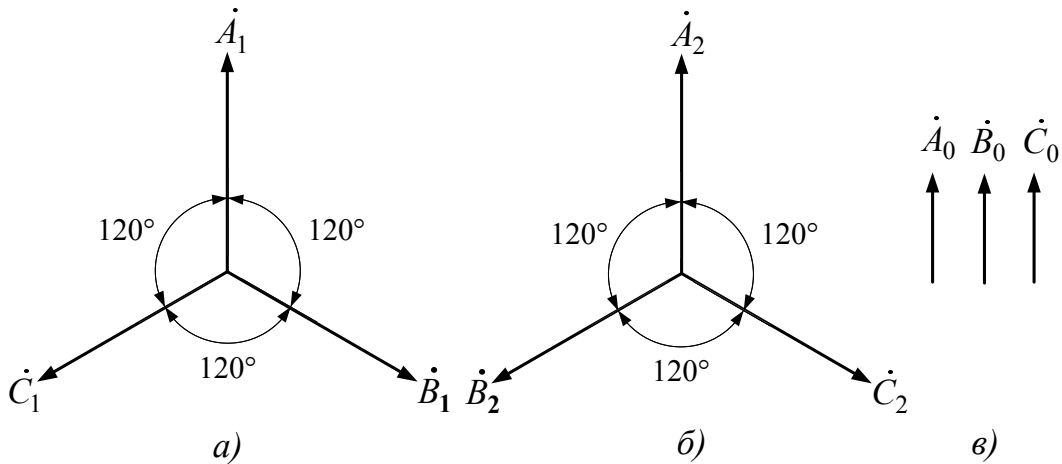


Рис. 4.9.

$\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$ $\dot{A}_2, \dot{B}_2, \dot{C}_2$

$\dot{A}_0, \dot{B}_0, \dot{C}_0$ Система прямой (а), обратной (б) нулевой (в) последовательностей

$$\dot{B} = \dot{B}_0 + \dot{B}_1 + \dot{B}_2$$

$$\dot{C} = \dot{C}_0 + \dot{C}_1 + \dot{C}_2.$$

Эту систему уравнений можно переписать с учётом применения оператора a трёхфазной системы

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\dot{B} = \dot{A}_0 + a^2\dot{A}_1 + a\dot{A}_2$$

$$\dot{C} = \dot{A}_0 + a\dot{A}_1 + a^2\dot{A}_2.$$

Из последней системы уравнений найдём $\dot{A}_0, \dot{A}_1, \dot{A}_2$ через заданные векторы \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} значение вектора нулевой последовательности

$$\dot{A}_0 = (\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})/3.$$

Таким образом, для нахождения \dot{A}_0 следует геометрически сложить три заданных вектора и взять одну треть от полученной суммы.

Вектора \dot{A}_1 и \dot{A}_2 определяются следующим образом

$$\dot{A}_1 = (\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C})/3$$

$$\dot{A}_2 = (\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C})/3.$$

Следовательно, одна треть суммы, состоящей из вектора \dot{A} плюс вектор \dot{B} (повернутый против часовой стрелки на 120°) и плюс вектор \dot{C} (повернутый по часовой стрелке на 120°) даёт вектор \dot{A}_1 .

Аналогично определяется вектор \dot{A}_2 .

Несимметрия междуфазных напряжений вызывается наличием составляющих обратной последовательности, а несимметрия фазных напряжений – наличием составляющих нулевой последовательности. Наличие составляющей нулевой последовательности приводит к смещению нейтрали на векторной диаграмме. Напряжение между нейтралью и землёй или нулевым проводом называют напряжением смещения [11].

Несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Коэффициентом несимметрии по обратной последовательности напряжения определяется как отношение значения напряжения обратной последовательности к значению напряжению прямой последовательности в многофазной системе электроснабжения [11]

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_1} 100 \%,$$

где $U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений.

При определении коэффициента обратной последовательности допускается брать отношение к номинальному напряжению

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_n} 100 \%.$$

Напряжение обратной последовательности $U_{2(1)}$ можно определять:

- **методом симметричных составляющих;**
- вычислением.

Вычисление составляющей обратной последовательности производят по приближенной формуле [12] $U_{2(1)} = 0,62(U_{нб(1)} - U_{нм(1)})$, где $U_{нб(1)}$, $U_{нм(1)}$ – наибольшее и наименьшее действующие значения из трёх междуфазных напряжений основной частоты.

Можно вычислять значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{2Ui} на интервале времени, равном 3 с, по формуле [12]

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}}.$$

Несимметричную систему (рис. 4.10, а), содержащую составляющую обратной последовательности, можно разложить на составляющие прямой (рис. 4.10, б) и обратной последовательности (рис. 4.10, в).

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в точках общего присоединения к электрическим сетям равны 2,0 % и 4,0 % соответственно.

Значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности напряжения определяется как отношение значения напряжения нулевой после-

довательности к значению фазного напряжения прямой последовательности в многофазной системе электроснабжения [11]

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_1} 100 \%,$$

где $U_{0(1)}$ – действующие значения напряжения нулевой последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений; $U_{\phi 1}$ – фазное напряжение основной частоты.

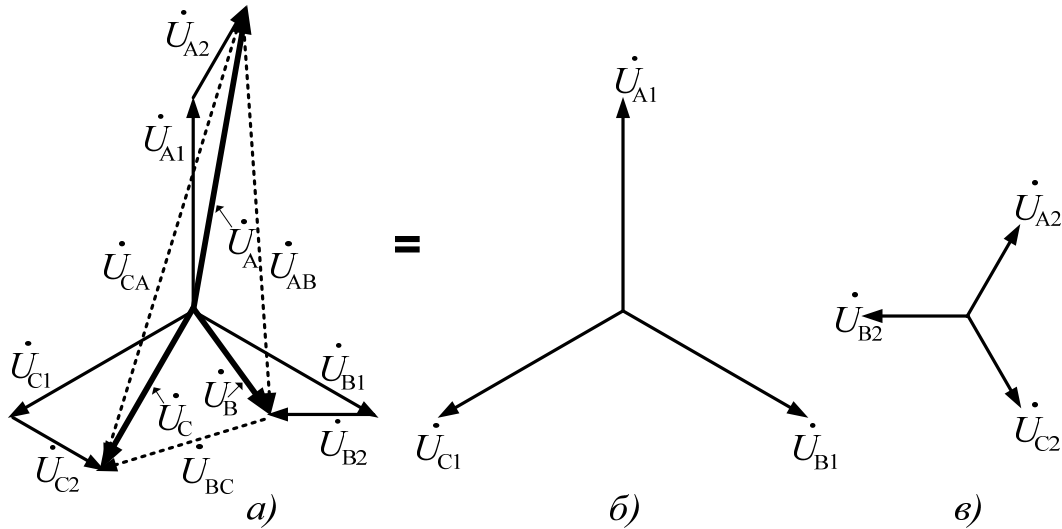


Рис. 4.10. Несимметричная система напряжений нагрузки (а) и её составляющие прямой (б) и обратной последовательности (в) $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$
 $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$
 $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1} - \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$

ся относить к фазному номинальному напряжению (току)

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\phi H}} 100 \% = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_H} 100 \%.$$

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точках общего присоединения к четырёхпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ равны 2,0 % и 4,0 % соответственно.

Напряжение нулевой последовательности $U_{2(1)}$ можно определять:

- методом симметричных составляющих;
- вычислением.

Вычисление составляющей нулевой последовательности производят по приближенной формуле [12] $U_{0(1)} = 0,62(U_{\text{нб } \phi(1)} - U_{\text{нм } \phi(1)})$, где $U_{\text{нб } \phi(1)}$, $U_{\text{нм } \phi(1)}$ – наибольшее и наименьшее действующие значения из трёх фазных напряжений основной частоты.

Можно вычислять значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{0Ui} на интервале времени, равном 3 с, по формуле [12]

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}}.$$

Число наблюдений N при определении коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности должно быть не менее 9.

Качество электроэнергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности в точке общего присоединения считают соответствующим требованиям настоящего стандарта при выполнении следующих условий:

- если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой последовательности не превышает предельно допустимого значения;

- значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения.

Дополнительно допускается определять соответствие нормам стандарта по суммарной продолжительное времени выхода измеренных значений данного показателя за нормально и предельно допустимые значения.

При этом качество электроэнергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности считают соответствующим требованиям настоящего стандарта, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, т. е. 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени.

Несимметричную систему (рис. 4.11, а), содержащую составляющую нулевой последовательности, можно разложить на составляющие прямой (рис. 4.11, б) и нулевой последовательности (рис. 4.11, в).

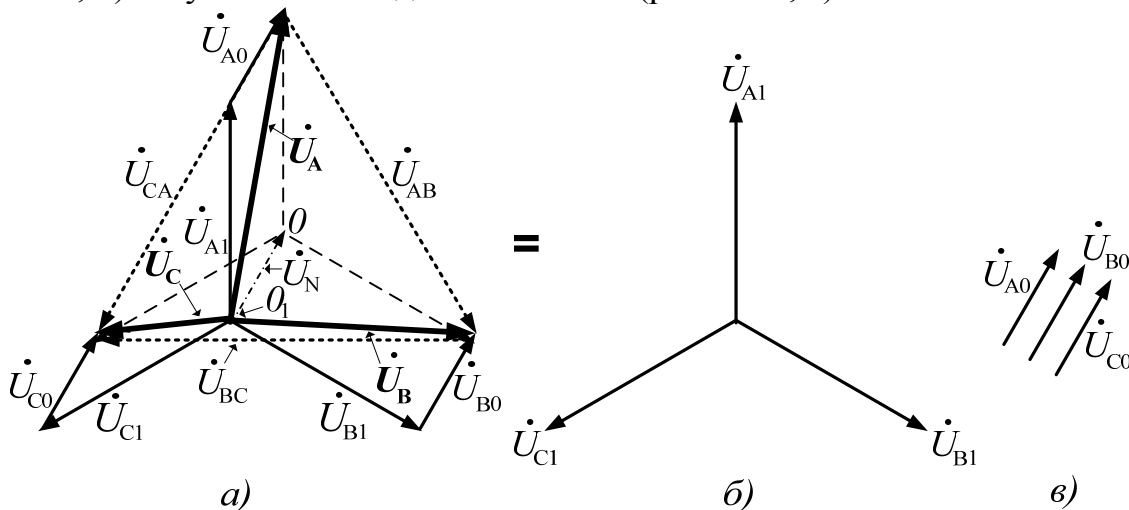


Рис. 4.11. Несимметричная система напряжений (а) и её составляющие прямой (б) и нулевой последовательности (в) $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – векторы фазных напряжений нагрузки;

$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ – векторы линейных напряжений источника питания

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$ – составляющие прямой последовательности напряжения ки; $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$ – составляющие нулевой последовательности напряжения нагрузки;

\dot{U}_A – напряжение смещения нейтрали нагрузки;

0 – нулевая точка источника питания; 0' – нулевая точка нагрузки

В системах электроснабжения наблюдается не только несимметричная система напряжений, но и несимметричная система токов. В этой системе также можно определить коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности. Они определяются так же, как и коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности. При этом символы напряжения заменяются символами тока.

4.3.5. Несинусоидальность напряжения.

При определённых режимах работы электрооборудования в кривой напряжения кроме гармоники основной частоты $U_{(1)} = U_n$ появляются гармоники других высших частот $U_{(n)}$. Несинусоидальные напряжения (токи) можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из совокупности простых гармонических колебаний различных частот. Причиной возникновения несинусоидальности напряжения является наличие в ЭС электроприёмников с *нелинейной* вольт-амперной характеристикой (тиристорные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, сварочные установки).

Несинусоидальность напряжения или искажение формы кривой переменного напряжения представляет собой отличие формы кривой переменного напряжения в системе электроснабжения от требуемой (синусоидальной) [11].

Примеры несинусоидального напряжения приведены на рис. 4.12 – 4.14. Несинусоидальность напряжения может возникнуть даже при подаче синусоидальной э.д.с. на элемент, обладающий нелинейной вольт-амперной характеристикой. На рис. 4.13, а показано, что к фазе А трёхфазного вентильного преобразователя приложена синусоидальная э.д.с. e_a . В фазе с нелинейной нагрузкой протекает несинусоидальный ток i_a , который вызывает появление несинусоидального падения напряжения u_a – рис. 4.13, б.

Наложение несинусоидального падения напряжения на синусоидальную э.д.с. вызывает появление несинусоидального напряжения в узле нагрузки.

Любая несинусоидальная периодическая функция (в том числе кривая несинусоидального напряжения) может быть представлена в виде суммы ряда составляющих, одна из которых постоянная, другие являются синусоидальными функциями с кратными частотами или гармониками

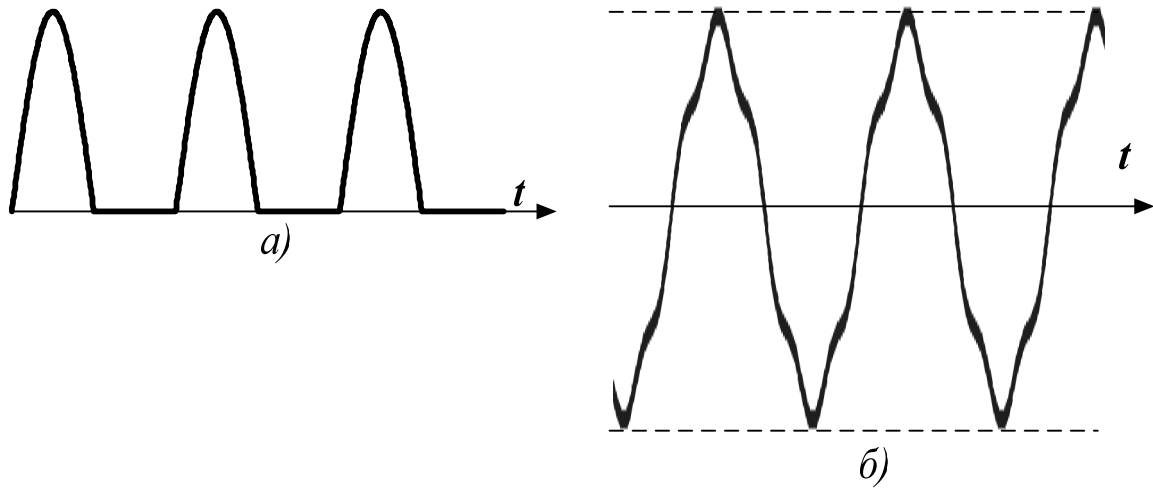
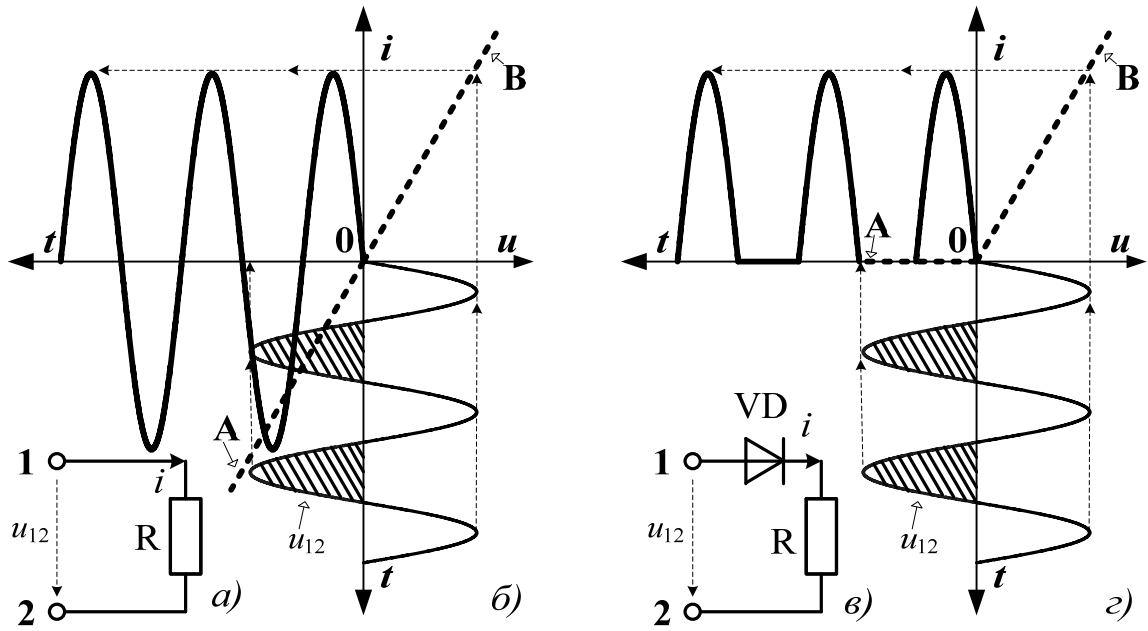


Рис. 4.12. Кривые несинусоидального напряжения:
 a – при наличии чётных, нечётных гармоник и постоянной составляющей;
 $б$ – при наличии нечётных гармоник



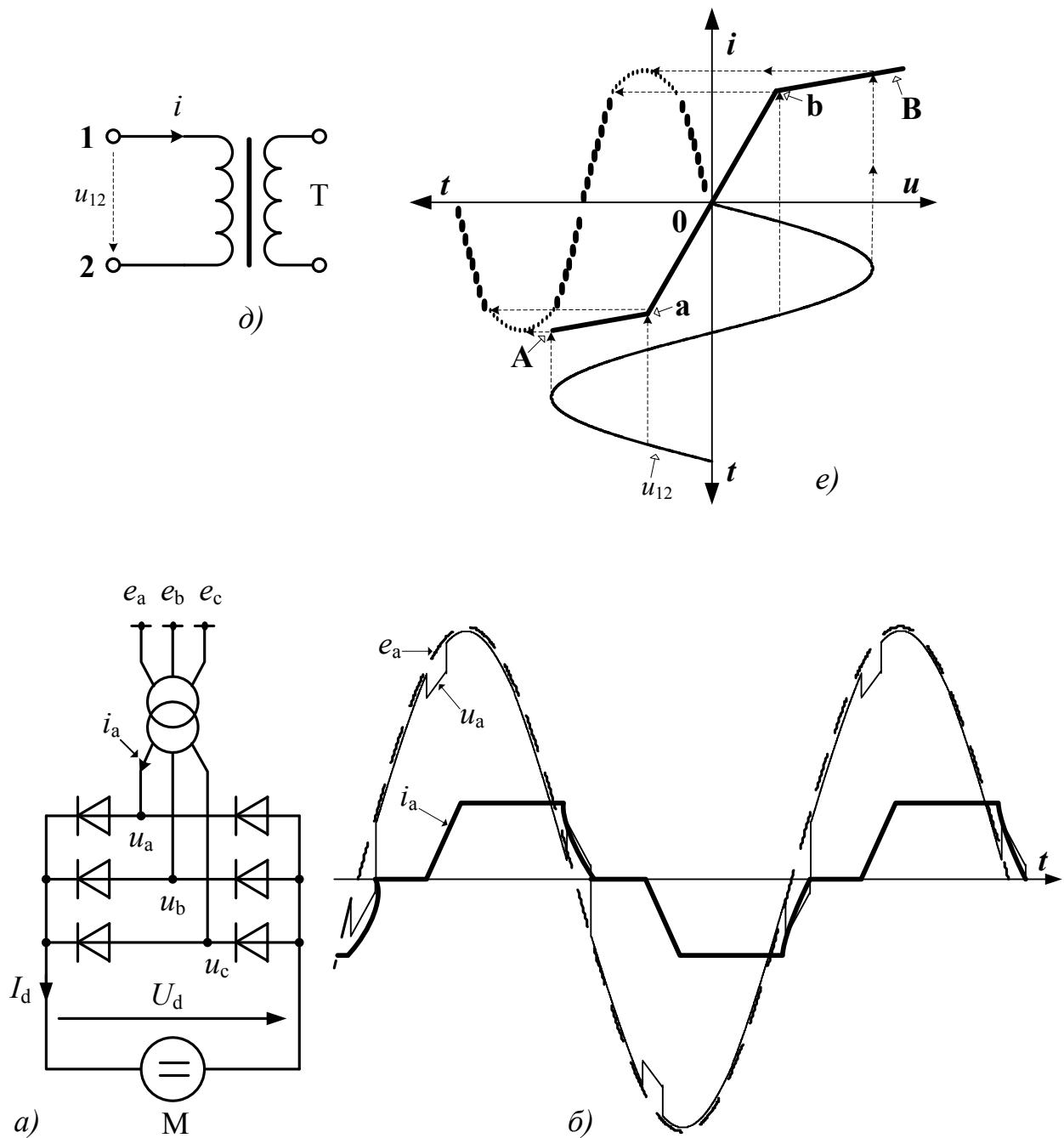


Рис. 4.13. Появление несинусоидального напряжения в цепи с нелинейной нагрузкой при синусоидальной э.д.с. $= E_m \sin \omega t$;
 , в, с – е е я; – ый

положительные направления го я а

ГД- - - - - IX
составляющих (следует учитывать гармонические составляющие от 2 до 40

включительно); $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_n$ – начальные фазы гармоник; $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$ – основная угловая частота.

На рис. 4.14 представлен график несинусоидального напряжения u , первой u_1 и третьей u_3 гармоник, входящих составляющими в кривую несинусоидального напряжения.

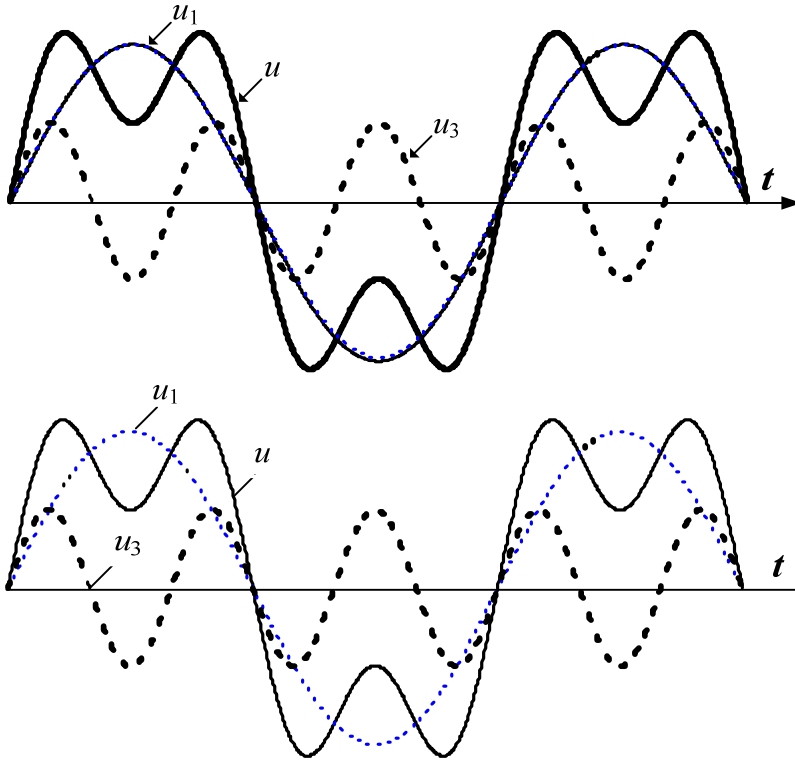


Рис. 4.14. График несинусоидального напряжения u , первой u_1 и третьей u_3 гармоник

Симметричная трёхфазная система напряжений, как известно, характеризуется тем, что кривые напряжений во всех фазах по форме одинаковы, но сдвинуты на одну треть периода – $2\pi/3$.

Основная гармоника напряжений может быть выражена системой трёх уравнений

$$\begin{aligned} u_{1A} &= U_{1m} \sin(\omega t) \\ u_{1B} &= U_{1m} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{1C} &= U_{1m} \sin(\omega t + 2\pi/3). \end{aligned}$$

Система уравнений для n -х гармоник фазного напряжения отличается от предыдущей тем, что аргумент синусоидальной функции увеличен в n раз

$$\begin{aligned} u_{nA} &= U_{nm} \sin(n\omega t) \\ u_{nB} &= U_{nm} \sin(n\omega t - 2\pi/3) \\ u_{nC} &= U_{nm} \sin(n\omega t + 2\pi/3). \end{aligned}$$

В составе высших гармонических составляющих несинусоидального напряжения можно выделить чётные, нечётные гармоники и нечётные гармоники, кратные 3.

Периодические несинусоидальные напряжения можно представлять и векторами. При этом амплитуды составляющих высших гармоник неодинаковы и чем выше номер гармоники, тем меньше её амплитуда.

Рассмотрим сначала гармоники, кратные трём, т. е. положим $n = 3k$, где n – номер высшей гармоники; k – целое число

$$u_{nA} = U_{nm} \sin(3k\omega t)$$

$$u_{nB} = U_{nm} \sin(3k\omega t - 2\pi/3) = U_{nm} \sin(3k\omega t)$$

$$u_{nC} = U_{nm} \sin(3k\omega t + 2\pi/3) = U_{nm} \sin(3k\omega t).$$

Напряжения во всех фазах имеют одинаковые значения и совпадают по фазе, так как сдвиг на полный период (или целое число периодов $2\pi k$) равнозначен отсутствию сдвига. Таким образом, гармоники, кратные трём, т. е. 3, 6, 9, 12-я и т. д., образуют симметричную систему нулевой последовательности.

На рис. 4.15, а гармоники напряжения, кратные трём, показаны тремя одинаковыми векторами, совпадающими по направлению.

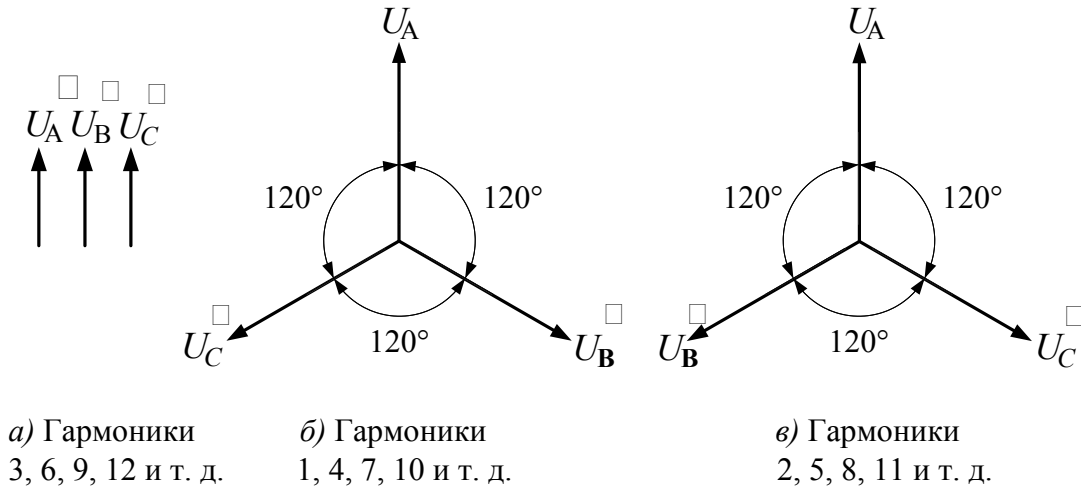


Рис. 4.15. Симметричные составляющие несинусоидальных напряжений в трёхфазных цепях

Если $n = 3k + 1$, то напряжение U_B отстаёт по фазе от U_A на угол $2\pi/3$, а U_C опережает U_A на такой же угол.

Например, четвёртые гармоники фазных напряжений ($n = 4$) выражаются уравнениями

$$u_{4A} = U_{4m} \sin(4k\omega t)$$

$$u_{4B} = U_{4m} \sin(4k\omega t - 2\pi/3)$$

$$u_{4C} = U_{4m} \sin(4k\omega t + 2\pi/3).$$

Следовательно, гармоники 1, 4, 7, 10, 13-я и т. д. образуют симметричную систему прямой последовательности.

На рис. 4.15, б показана векторная диаграмма напряжений этих гармоник. Векторы диаграммы нужно представлять вращающимися против движения стрелки часов с угловой скоростью $n\omega$, при этом порядок следования векторов прямой: за вектором U_A следует вектор U_B , а затем U_C .

Полагая $n = 3k - 1$, нетрудно установить, что напряжение U_B опережает U_A по фазе на угол $2\pi/3$, а U_C отстаёт от U_A на такой же угол. Например, пятые ($n = 5$) гармоники фазных напряжений имеют уравнения

$$u_{5A} = U_{5m} \sin(5k\omega t)$$

$$u_{5B} = U_{5m} \sin(5k\omega t + 2\pi/3)$$

$$u_{5C} = U_{5m} \sin(5k\omega t - 2\pi/3).$$

Гармоники 2, 5, 8, 11, 14-я и т. д. образуют симметричную систему обратной последовательности. Порядок следования векторов диаграммы на рис. 4.15, в при вращении их против движения стрелки часов обратный: за вектором U_A следует U_C и далее U_B (следование векторов в прямом порядке U_A, U_B, U_C соответствует вращению их в обратном направлении, по движению часовой стрелки).

Если напряжения фаз имеют одинаковые постоянные составляющие, то в совокупности они могут рассматриваться как составляющая нулевой последовательности нулевой частоты.

При анализе несинусоидальных кривых напряжения учитывают:

- в кривых, симметричных относительно оси абсцисс, отсутствуют постоянная составляющая и чётные гармоники;
- в линейных напряжениях при соединении обмоток источника звездой гармоники, кратные трём отсутствуют.

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- коэффициентом n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Эти показатели по-разному влияют на ЭС и работу ЭП. Токи, вызванные искажением синусоидальности кривой напряжения, оказывают влияние на создание и изменение магнитных полей, то есть влияют на технологическую составляющую ущерба. Эти токи влияют на изменение активных потерь в ЭС и ЭП, то есть влияют на электромагнитную составляющую ущерба от ухудшения ПКЭ.

Проявление высших гармонических составляющих напряжения вызывает резонансные явления в ЭС и электроустановках. При возникновении резонансного или близкого к нему режима на какой-либо высшей гармонике токи и (или) напряжения могут оказаться значительно больше тока и напряжения основной гармоники на участке цепи. Это может привести к дополнительному нагреву (резонанс токов) или пробоем изоляции (резонанс напряжений).

Коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения является значение данной величины, определяемое отношением действующего значения суммы гармонических составляющих к действующему значению основной составляющей переменного напряжения [11]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100 \%,$$

где $U_{(n)}$ – напряжение любой n -й высшей гармоники с $n \geq 2$; $U_{(1)}$ – напряжение основной (первой) гармоники.

При расчёте коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (тока) допускается брать отношение к номинальному напряжению (току)

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_{(n)}^2}}{U_{(H)}} 100 \%.$$

Можно вычислять значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_{Ui} в процентах как результат i -х наблюдений по формуле [12]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} 100 \%,$$

где $U_{(1)i}$ – действующее значение междупазного (фазного) напряжения основной частоты для i -го наблюдения.

При определении данного показателя КЭ допускается:

- не учитывать гармонические составляющие, значения которых менее 0,1 %;
- не учитывать гармонические составляющие порядка $n > 40$ или гармонические составляющие, действующие значения которых менее $0,3 U_{(1)}$.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , в процентах

Нормально допустимое значение при U_n , кВ				Предельно допустимое значение при U_n , кВ			
0,4-1,0	6-20	35	110-330	0,4-1,0	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Коэффициентом n -й гармонической составляющей напряжения является значение данной величины, определяемое отношением действующего значения n -й гармонической составляющей напряжения к действующему значению основной составляющей кривой переменного напряжения [11]

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100 \%.$$

Коэффициент n -й гармонической составляющей устанавливается в процентах. При определении коэффициента гармонической составляющей допускается брать отношение к номинальному напряжению

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(H)}} 100 \%.$$

Нормально допустимые значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ в точках общего присоединения к электрическим сетям с разными номинальными напряжениями U_n приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения, в процентах

Нечётные гармоники, не кратные 3, при U_n , кВ					Нечётные гармоники, кратные 3**, при U_n , кВ					Чётные гармоники при U_n , кВ				
n^*	0,4-1,0	6-20	35	110-330	n^*	0,4-1,0	6-20	35	110-330	n^*	0,4-1,0	6-20	35	110-330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
>25	0,2+	0,2+	0,2+	0,2+										
	+1,3× ×25/n	+0,8× ×25/n	+0,6× ×25/n	+0,2× ×25/n										

Примечания:

* n – номер гармонической составляющей напряжения.

** Нормально допустимые значения, приведённые для n , равных 3 и 9, относятся к однофазным электрическим сетям. В трёхфазных трёхпроводных электрических сетях эти значения принимают вдвое меньшими приведённых в таблице.

Предельно допустимое значение коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения может достигать полутора кратного значения нормально допустимого коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения, определяемого по табл. 4.2.

В системах электроснабжения наблюдается не только несинусоидальность напряжений, но и несинусоидальность токов. В этой системе нужно определять коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока и коэффициент n -й гармонической составляющей тока. Они определяются так же, как и соответствующие коэффициенты несинусоидальности напряжения. При этом символы напряжения заменяются символами тока.

4.3.6. Провал напряжения.

Провал напряжения – внезапное значительное снижение напряжения в системе электроснабжения с последующим его восстановлением [11]. Под значительным снижением напряжения понимается его снижение ниже $0,9U_n$, восстановление напряжения до первоначального значения или близкого к нему происходит через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд (рис. 4.16, б). Для наглядного представления о провале напряжения на рис. 4.3, б приведена характерная осциллограмма.

Характеристикой провала является его длительность Δt_n .

Длительность провала напряжения Δt_n – интервал времени между начальным моментом провала напряжения t_n и моментом восстановления

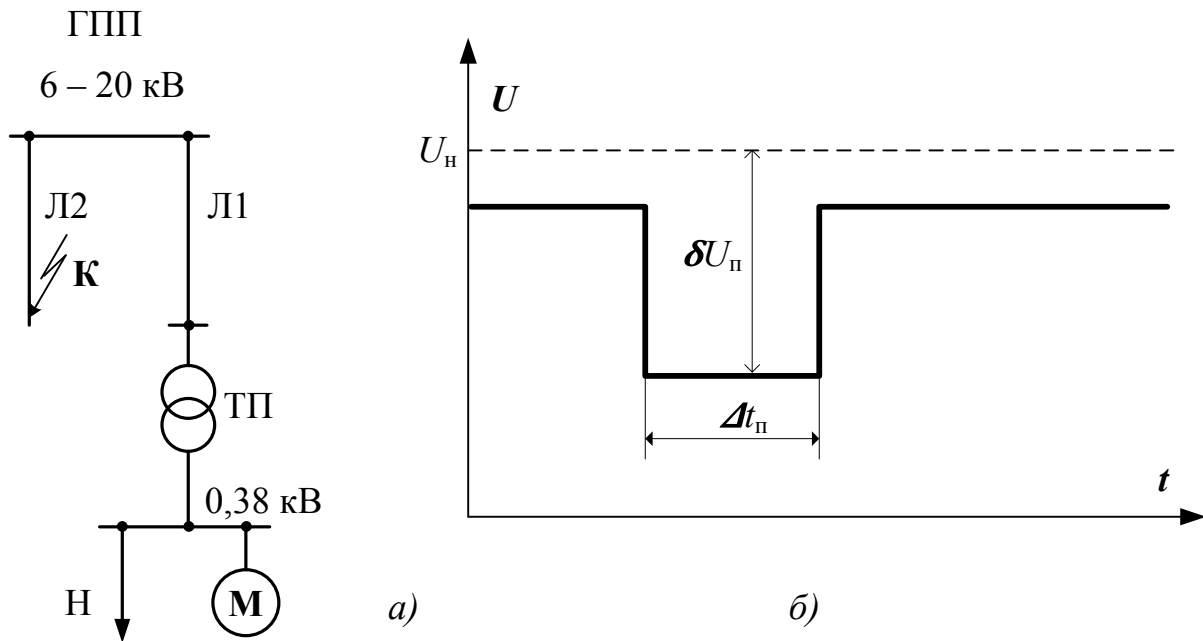


Рис. 4.16. Провал напряжения:

a – типовой фрагмент системы электроснабжения с возмущающими факторами **К** и **М**, где **К** обозначение короткого замыкания, а **М** электродвигатель; огибающая провала напряжения $\delta U_{\text{п}} > 0,9 U_{\text{н}}$

нескольких секунд. Предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики.

Провал напряжения характеризуется также глубиной провала $\delta U_{\text{п}}$ (по отношению к значению напряжения в нормальном режиме). Глубина провала напряжения – значение данной величины, определяемого как разность между номинальным или базовым значением напряжения и наименьшим действующим значением во время его провала [11].

Глубина провала напряжения определяется

$$\delta U = U_{\text{н}} - U_{\text{min}};$$

$$\delta U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{н}}} 100 \, \%.$$

Глубина провала может изменяться от 10 до 100 %.

Основной причиной появления провалов в системе электроснабжения являются короткие замыкания в отходящих от узла нагрузки ветвях (рис. 4.16, *a*).

Провалы напряжения не нормируются, так как они носят случайный характер, зависят от возникновения коротких замыканий, они неизбежны и не предсказуемы. Рекомендуются накапливать статистические данные о частоте, глубине и длительности провалов напряжения.

Имеющиеся данные по провалам напряжения в сетях (6 – 10) кВ [2] приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Интервал длительности провалов напряжения, с	Доля интервалов длительности, %
3–6	20
6–15	60
15–21	16
21–30	4

При этом глубина провалов от 10 до 100 % в процентах от общего количества приведена в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Глубина провала, %	Всего, %
10–35	14
35–90	48
100	38
Итого	100

4.3.7. Импульсное напряжение.

При коммутациях в ЭС, при работе разрядников во время грозových явлений могут появляться высокочастотные импульсы, которые искажают форму кривой питающего напряжения.

Импульс напряжения – резкое изменение напряжения в точке электрической сети, длящееся малый интервал времени (меньше полупериода), за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему значения [11].

Импульс напряжения (рис. 4.17) характеризуется следующими показателями:

- амплитудой импульса $U_{\text{имп}}$;
- длительностью импульса $\Delta t_{\text{имп}}$.

Амплитуда импульса напряжения – максимальное мгновенное значение импульса напряжения. В ЭС напряжением до 1 кВ может проникать импульсное напряжение (3 – 10) кВ.

Импульс напряжения определяется по выражению

$$\delta U_{\text{имп}} = \frac{U_{\text{имп}}}{\sqrt{2}U_{\text{н}}}.$$

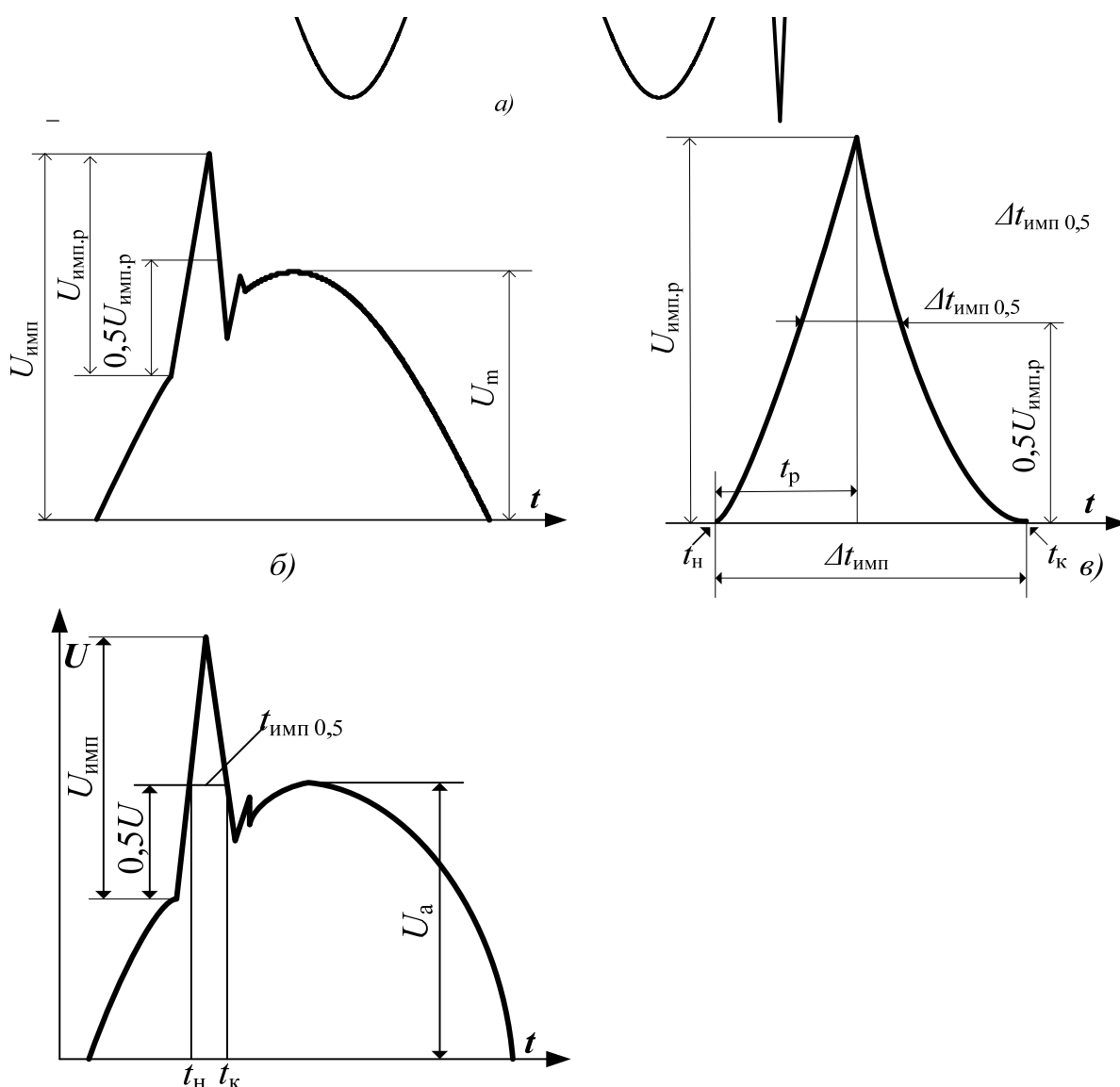
Длительность импульса – интервал времени между начальным моментом импульса и моментом восстановления мгновенного значения до первоначального уровня. Длительность импульса напряжения, как правило, оценивается по уровню $0,5 U_{\text{имп}}$

$$\Delta t_{\text{имп}} = t_{\text{к}} - t_{\text{н}}.$$

Наиболее чувствительными к импульсным напряжениям оказываются электронные микропроцессорные элементы систем управления, компьютеры.

Защита от импульсных напряжений осуществляется ограничителями перенапряжений.

Рис. 4.17. Импульсное напряжение



4.3.8. Временное перенапряжение.

Временное перенапряжение – это превышение напряжения в точке электрической сети над наибольшим рабочим напряжением, установленным для данного электрооборудования [11]. Превышением напряжения обычно считают напряжение выше $1,1U_n$, возникающее в момент коммутации электрических цепей продолжительностью более 10 мс.

Временное перенапряжение характеризуется коэффициентом временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$ – показателем, равным отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения ($U_{\text{пер.м}}$) к значению амплитуды номинального

напряжения сети (рис. 4.18)

$$\delta U_{\text{пер}U} = \frac{U_{\text{пер}m}}{\sqrt{2}U_H}$$

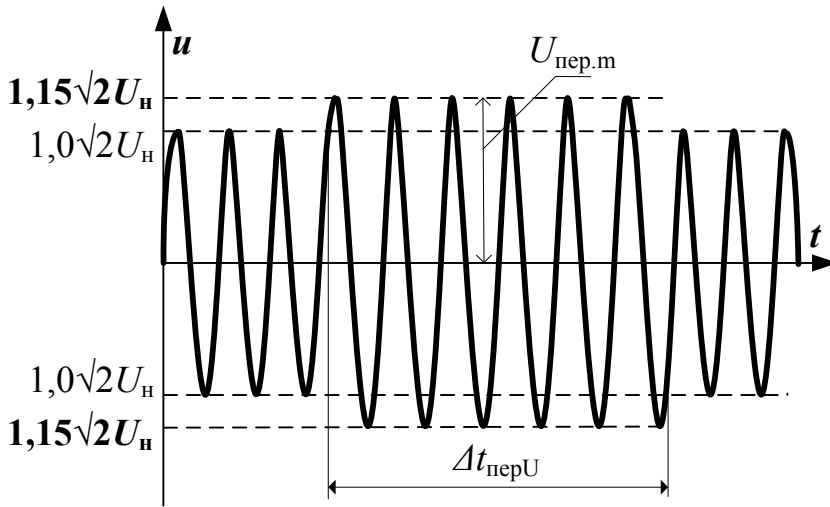
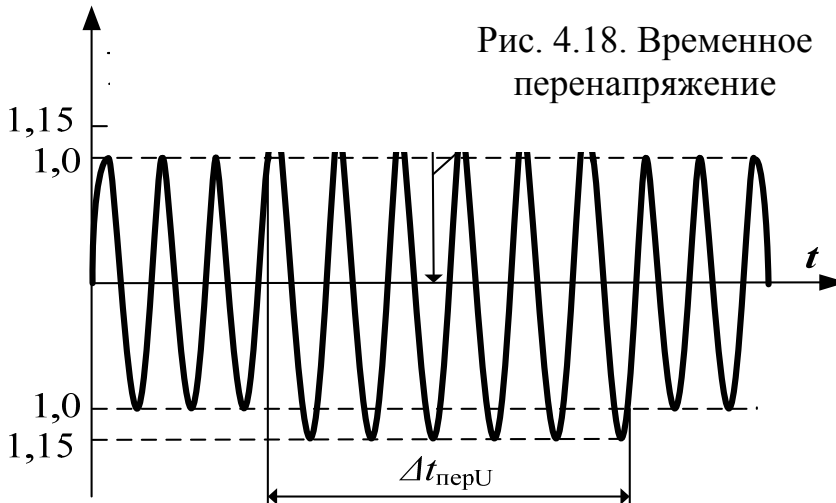


Рис. 4.18. Временное перенапряжение



Для наглядного представления о перенапряжении на рис. 4.3, б приведена характерная осциллограмма.

Длительность временного перенапряжения $\Delta t_{\text{пер}U}$ – интервал времени между начальным моментом возникновения временного перенапряжения и моментом его исчезновения

$$\Delta t_{\text{пер}U} = t_{\text{к пер}} - t_{\text{н пер}}$$

Коэффициент временного перенапряжения не нормируется. Однако коэффициент временного перенапряжения в точках присоединения электроприёмников к сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений не превышает значений, приведённых в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Длительность временных перенапряжений $\Delta t_{\text{пер}U}$, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$, о.е.	1,47	1,31	1,15

В течение года в точке присоединения возможно до 30 кратковременных перенапряжений.

При обрыве нулевого проводника в трёхфазной электрической сети напряжением до 1 кВ, работающих с глухозаземлённой нейтралью, возникают временные перенапряжения между фазой и землёй. Уровень таких перенапряжений может достигать значений междуфазного напряжения, а длительность нескольких часов.

4.3.9. Пульсация напряжения.

В электроустановках выпрямленного тока имеет место пульсация напряжения постоянного (выпрямленного) тока.

Пульсация напряжения – процесс периодического или случайного изменения постоянного напряжения относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника, преобразователя электроэнергии или системы электроснабжения [11].

Пульсация напряжения характеризуется:

- размахом пульсации напряжения;
- коэффициентом пульсации.

Размах пульсации напряжения – показатель, определяемый как разность между наибольшим и наименьшим значениями пульсирующего напряжения за определённый интервал времени [11].

Коэффициент пульсации напряжения – показатель, определяемый отношением наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего напряжения к значению его постоянной составляющей [11].

4.3.10. Свойства электроэнергии, показатели качества электроэнергии и вероятные виновники её ухудшения.

Как было сказано, на ухудшение качества электроэнергии могут повлиять как электроустановки электросетевой организации, так и электрооборудование потребителей электроэнергии. Вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии [12] приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Свойства электроэнергии	Показатели качества электроэнергии	Наиболее вероятный виновник ухудшения качества электроэнергии
1	2	3
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение напряжения δU_y	Электросетевая организация
Колебания напряжения	Размах изменения напряжения δU_t . Доза фликера P_t	Потребитель с переменной нагрузкой
Несимметрия трёхфазной системы напряжения	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} . Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}	Потребители с несимметричной нагрузкой

Несинусои- дальность напряжения	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U . Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$	Потребители с нелинейной нагрузкой
Отклонение частоты	Отклонение частоты Δf	Электросетевая организация
Провал напряжения	Длительность провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$	Электросетевая организация
Импульс напряжения	Импульсное напряжение $U_{\text{имп}}$	Электросетевая организация
Временное перенапряжение	Коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$	Электросетевая организация

4.4. Влияние качества электроэнергии на работу электроприёмников

4.4.1. Влияние отклонения частоты в энергосистеме на работу электроприёмников.

Влияние отклонение частоты на работе электроприёмников проявляется в виде электромагнитной и технологической составляющих. Электромагнитная составляющая обусловлена ростом потребления активной и реактивной мощности из сети и увеличением потерь активной мощности в сети и электроприёмниках. Считается, что снижение частоты на 1 % вызывает увеличение потерь в сетях на 2 %.

Технологическая составляющая связана с невыпуском предприятиями промышленной продукции. Производительность оборудования зависит от частоты вращения электродвигателя. Частота вращения асинхронных электродвигателей в свою очередь зависит от частоты напряжения сети. Эту зависимость можно определить по формуле $n = \frac{2\pi f}{p}(1 - s)$, где n – частота вращения ротора электродвигателя; f – частота напряжения питающей сети; s – скольжение электродвигателя; p – число пар полюсов двигателя.

Экономический ущерб от технологической составляющей на порядок выше, чем от электромагнитной составляющей.

Изменение частоты напряжения в питающей сети приводит к изменению потребления мощности. На рис. 4.19 показано влияние частоты на потребление мощности.

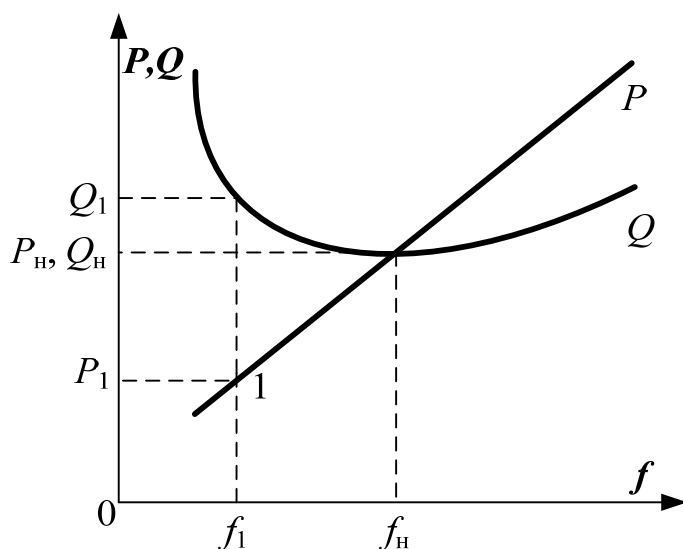


Рис. 4.19. Влияние частоты на потребление активной P и реактивной Q мощностей

При снижении частоты от номинального значения f_n до значения f_1 происходит увеличение потребления реактивной мощности до Q_1 . Это приводит к понижению напряжения в узле нагрузки. При этом потребление активной мощности снижается до P_1 . Обычно увеличение потребляемой реактивной мощности выше, чем снижение активной мощности, что приводит к увеличению потерь мощности и электроэнергии в сети. Снижается преобразование активной

электроэнергии в другие виды, и, следовательно, сокращается и выпуск продукции.

С увеличением потребления реактивной мощности увеличиваются затраты на компенсацию потребляемой реактивной мощности.

В связи с тем, что отклонение частоты возникает на генераторах электростанций, то ущерб касается многих предприятий.

4.4.2. Влияние отклонения напряжения на работу электроприёмников.

Основными факторами, вызывающими отклонения напряжения в СЭС предприятий являются изменение режимов работы электроприёмников в узле нагрузки и изменение режимов работы источников питания. Отклонения напряжения, в свою очередь, оказывают значительное влияние на работу электроприёмников.

Асинхронные электродвигатели, являющиеся наиболее распространёнными электроприёмниками при отклонениях напряжения изменяют свои механические характеристики – зависимость вращающего момента $M_{эл}$ от скольжения s или частоты вращения n (рис. 4.20).

Приближённо можно считать, что вращающий момент электродвигателя пропорционален квадрату напряжения на его зажимах. Поэтому при снижении напряжения вращающий момент снижается от значения M_H до значения M_2 . Уменьшается частота вращения двигателя, так как увеличивается его скольжение от s_H до s_1 .

Изменение частоты вращения двигателя зависит также от статического момента M_c . На рис. 4.20 M_c принят постоянным.

Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения выражается $n = n_c \left(1 - k_3 s_H \frac{U_H^2}{U^2}\right)$, где n_c – синхронная частота вращения; k_3 – коэффициент загрузки двигателя; U_H – номинальное напряжение электродвигателя; s_H – номинальное скольжение двигателя.

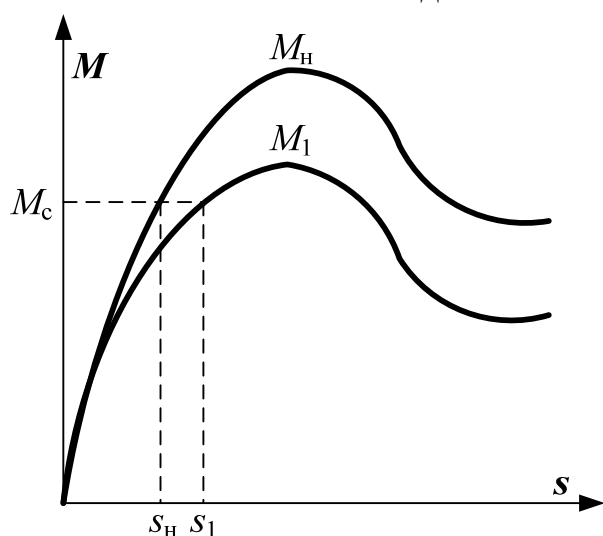
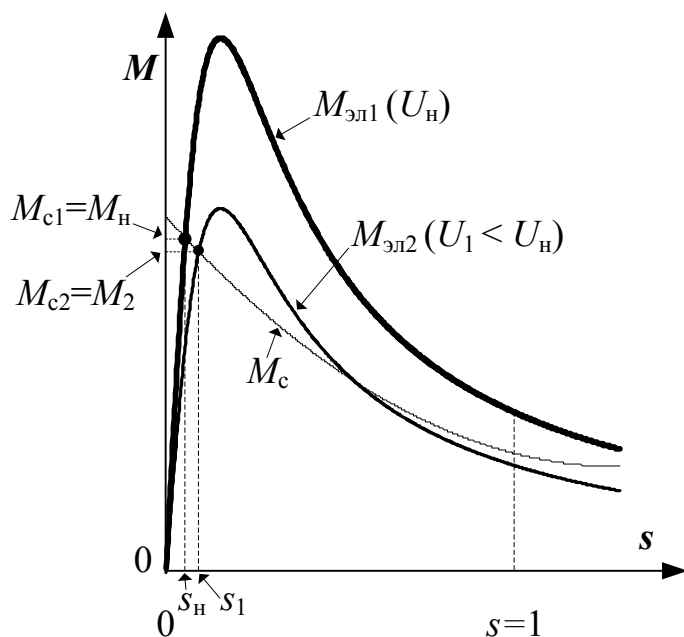


Рис. 4.20. Механическая характеристика двигателя при номинальном M_H и пониженном M_1 напряжениях при постоянном статическом моменте M_c



При снижении напряжения на выводах электродвигателя ток двигателя увеличивается, что приводит к повышению нагрева обмоток двигателя и ускорению старения изоляции.

Установки электрического освещения, применяемые на предприятиях и в быту, содержат различные источники света – лампы накаливания, дуговые ртутные лампы высокого давления, натриевые, ксеноновые и люминесцентные лампы. При изменении напряжения на выводах ламп изменяется освещённость, световой поток, срок службы ламп. На каждый процент понижения напряжения световой поток уменьшается приблизительно на 3,6 %. Срок службы увеличивается приблизительно на 1,3 % [15].

Электротермические установки на предприятиях реагируют на изменение напряжения следующим образом.

В печах сопротивления при снижении напряжения снижается производительность, увеличивается продолжительность технологического процесса. Повышение напряжения приводит к перерасходу электроэнергии и, следовательно, к экономическому ущербу.

При снижении напряжения в индукционных печах на (8 – 10) % технологический процесс нельзя довести до конца.

Электросварочные установки переменного тока представляют собой однофазную неравномерную и несинусоидальную нагрузку с низким коэффициентом мощности: 0,3 – для дуговой и 0,7 – для контактной сварки. При снижении напряжения до 0,9 номинального время сварки увеличивается на 20 %, а при выходе его за пределы ниже 0,9 и выше 1,1 номинального возникает брак сварных швов.

В *вентильных преобразователях* с автоматическим регулированием постоянного тока при повышении напряжения в сети автоматически увеличивается угол регулирования. Это приводит к увеличению потребления мощности преобразователем.

Электрохимические и электролизные установки работают на выпрямленном токе. При снижении напряжения на электролизных установках наблюдает-

ся снижение производительности, а при повышении – недопустимый перегрев ванн электролизёра.

Силовые трансформаторы обеспечивают электроснабжение электроприёмников различного назначения. Изменение напряжения трансформаторов приводит к повышению потери активной мощности в стали.

Конденсаторы, применяющиеся в сетях для компенсации реактивной мощности, изменяют свою генерируемую мощность пропорционально квадрату напряжения

$$Q_k = \frac{U^2}{X_c},$$

где X_c – сопротивление конденсаторной батареи.

При понижении напряжения в сети мощность конденсаторной батареи снижается пропорционально квадрату напряжения.

4.4.3. Влияние колебаний напряжения на работу электроприёмников.

Колебание напряжения отрицательно сказывается на работе осветительных установок. Появляется фликер-эффект или мигание ламп освещения, что вызывает утомление зрения. Наиболее сильное воздействие на глаза человека проявляется при мигании света с частотой (3 – 10) Гц. В этом диапазоне допускаются минимальные колебания напряжения – менее 0,5 %.

Колебания напряжения более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп. Их зажигание происходит через несколько секунд и даже минут. При более глубоких колебаниях, более 15 %, возможно отпускание магнитной системы пускателей, размыкание их контактов, что может привести к нарушению технологии производства.

При колебании напряжения с размахом (10 – 15) % возможен выход из строя конденсаторов, вентильных выпрямительных агрегатов.

Колебания напряжения оказывают заметное влияние на работу асинхронных двигателей в приводах технологического оборудования, к которому предъявляются высокие требования к точности поддержания частоты вращения приводов.

Колебание напряжения с размахом 5 % вызывает резкий износ анодов электролизных установок. Снижается качество сварных швов.

При колебаниях напряжения нарушается нормальная работа радиоприёмных приборов, телевизоров, персональных компьютеров, рентгеновских установок.

Регулируемые электропривода обычно чувствительны к провалам напряжения, нарушая синхронизацию на производственных линиях, где она критически важна.

4.4.4. Влияние несимметрии напряжения на работу электроприёмников.

Несимметрия напряжений в СЭС оказывает значительное влияние на работу электрооборудования.

Синхронные генераторы. Токи прямой последовательности создают магнитное поле, вращающееся синхронно с ротором, а токи обратной последовательности – магнитное поле, вращающееся с двойной синхронной частотой в противоположном направлении. Это вызывает появление вихревых токов и вибрацию частей машины.

Асинхронные двигатели. Ток обратной последовательности, накладываясь на ток прямой последовательности, вызывает дополнительный нагрев ротора и статора, что приводит к быстрому старению изоляции. Несимметрия напряжений приводит к появлению противодействующего момента и к уменьшению полезного момента.

Трансформаторы. Потери мощности в основном обусловлены токами обратной последовательности $\Delta P_{T2} = 3I_2^2 \cdot r_{T2}$, где I_2 – действующее значение тока обратной последовательности; r_{T2} – сопротивление обратной последовательности трансформатора.

Кабельные и воздушные линии. Токи обратной последовательности вызывают основные дополнительные потери мощности в линиях.

При несимметричной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике четырёхпроводной системы трёхфазного тока может превышать фазные токи, что чревато его значительной перегрузкой.

Токи нулевой последовательности постоянно проходят через заземлители, высушивая вокруг них грунт, и увеличивают сопротивление растеканию. Они вносят искажение в низкочастотные каналы проводной связи, снижают надёжность работы устройств автоматики и телемеханики.

Выпрямительные установки. При несимметрии напряжений токи в фазах многофазного выпрямителя отличаются, что приводит к снижению мощности выпрямителя, так как часть выпрямителей оказывается недогруженной. При нагрузке выпрямителя до номинального значения по менее загруженным фазам возможна значительная перегрузка части выпрямителей и их преждевременный выход из строя. Несимметрия напряжений переменного тока вызывает пульсацию с двойной частотой выпрямленного напряжения. Эти пульсации могут привести к выводу из строя конденсаторов сглаживающих фильтров.

Конденсаторные установки. Подключение симметричной по ёмкости трёхфазной конденсаторной батареи к электрической сети с несимметричным напряжением может усугубить несимметрию в сети. Сами конденсаторные установки будут неравномерно загружаться по фазам реактивной мощностью. Общая мощность установки снизится и будет меньше номинальной.

4.4.5. Влияние несинусоидальности напряжения на работу электроприёмников.

Источниками искажения формы синусоидального напряжения являются генераторы и силовые трансформаторы, работающие с перегрузкой, на нелинейной части кривой намагничивания, преобразовательные устройства переменного тока в постоянный, электроприёмники с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Искажения, создаваемые синхронными генераторами и силовыми трансформаторами, малы, так как они обычно работают в условиях

относительно невысокого насыщения стали, и поэтому могут не учитываться. Основными источниками искажений являются вентильные преобразователи, электродуговые сталеплавильные и рудотермические печи, установки дуговой и контактной электросварки. Эти устройства потребляют из сети несинусоидальные токи, которые вызывают несинусоидальные падения напряжения на элементах сети. Они, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажению формы кривой напряжения.

Наиболее серьёзные нарушения качества электроэнергии в питающей сети возникают при работе мощных управляемых вентильных преобразователей. При этом порядок высших гармонических составляющих тока и напряжения в сети определяется по формуле $n = km \pm 1$, где n – номер высшей гармоники; k – последовательный ряд натуральных чисел (0, 1, 2, 3 ...); m – количество фаз выпрямления.

Высшие гармонические составляющие напряжения (тока) оказывают отрицательное воздействие на элементы СЭС.

При появлении любых высших гармоник напряжения (тока), возрастает амплитудное и действующее значение напряжения (тока). Это приводит к повышенному нагреву элементов СЭС, старению изоляции.

Воздействие тока второй гармоники с частотой 100 Гц аналогично воздействию тока обратной последовательности, тока третьей гармоники с частотой 150 Гц – проявлению тока нулевой последовательности. Появление токов более высоких гармоник вызывает поверхностный эффект в проводниках, что приводит к их повышенному нагреву и нагреву изоляции, к увеличению dielectric losses в конденсаторах, кабелях.

Несинусоидальный ток вызывает дополнительные потери мощности в трансформаторах, электрических машинах, линиях электропередачи. Они перегружают конденсаторные батареи, вызывая их вспучивание и выход из строя. При наличии токов высших гармоник в силовых трансформаторах появляются вихревые индукционные токи (токи Фуко), которые растут примерно пропорционально квадрату частоты.

Высшие гармоники тока и напряжения в сети вызывают расстройство работы устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики.

Токи высших гармоник суммируются в нейтральном проводнике. Если нейтральный и защитный проводники объединены и соединены с токопроводящими элементами инженерных конструкций здания, нейтральные обратные токи имеют возможность беспрепятственного проникновения в металлические части здания, создавая неконтролируемые и неуправляемые магнитные поля. Это приводит к мерцанию экранов мониторов [16].

4.4.6. Влияние качества напряжения на работу бытовых электроприёмников.

Влияние ПКЭ на работу бытовых электроприёмников выделим отдельно.

Проанализируем влияние бытовых электроприёмников на ЭС и окружающее пространство на основе [14].

1-я группа. Негативное воздействие данной группы бытовых электроприёмников на качество электроэнергии в ЭС незначительно. Ввиду весомости доли группы в общем, потреблении электроэнергии требуется создание энергосберегающих бытовых электроприёмников.

2, 3 и 4-я группы бытовых электроприёмников характеризуются активно-индуктивной нагрузкой с частыми пусками, реверсами и отключениями, что является причиной загрузки ЭС реактивной мощностью и появления колебаний напряжения и сказывается на работе осветительных и радиоэлектронных приборов. Двигатели лифтов из-за частых пусков создают резкопеременную нагрузку и вызывают колебание напряжения. Электроприёмники 4-й группы генерируют низко- и высокочастотные гармоники тока, обусловленные реакцией якоря и пульсацией его э.д.с. Возникающее под щётками коллектора искрение вызывает радиопомехи.

5-я группа. Электроприёмники этой группы имеют низкий коэффициент мощности, загружают ЭС реактивной мощностью, обуславливают колебания напряжения и высшие гармоники в составе тока. Кроме того, они оказывают влияние на электромагнитное поле окружающего пространства.

6-я группа. Электроприёмники этой группы, являющиеся потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник в ЭС, отрицательно влияют на работу соседних ЭП, а также ухудшают ПКЭ.

7-я группа. Входящие в её состав электроприёмники маломощны, являются потребителями реактивной мощности и генераторами высших гармоник. Персональные компьютеры, телевизоры, влияющие на напряжённость электромагнитного поля окружающего пространства, требуют установки специальных защитных экранов от вредного воздействия на пользователя. В то же время в телевизорах с цветным изображением, реагирующих на изменение напряжённости окружающего электромагнитного поля, возможны искажения изображения, появление цветных пятен на экране. Поэтому для обеспечения надёжной работы современных телевизоров необходимо применять схемы автоматического размагничивания.

В устройствах электронной связи и видеомагнитофонах изменение напряжённости электромагнитного поля вызывает появление шумов и искажение изображения.

8-я группа. Высокочастотные устройства генерируют в ЭС высшие гармоники и повышают напряжённость электромагнитного поля в окружающем пространстве. Магнитная индукция на расстоянии 3 см от СВЧ печи составляет $(70 - 200) \text{ мк} \cdot \text{Тл}$ (то есть превышает санитарные нормы в 10 – 30 раз), а на расстоянии 1 м она снижается до $0,25 \text{ мк} \cdot \text{Тл}$.

9-я группа. Лампы люминесцентного освещения с нелинейными элементами – дросселями и стартерами – являются потребителями реактивной мощности, генераторами помех в ЭС в виде высших гармонических (наиболее часто – $(150 - 550) \text{ Гц}$ и $(150 - 1650) \text{ кГц}$) и отрицательно влияют на окружающее электромагнитное поле и акустику помещения. Радиопомехи от люминесцентных ламп распространяются в виде электромагнитных излучений (эфирные помехи) и по электрической сети (сетевые, кондуктивные помехи). Уровень

эфирных помех незначителен и сказывается на расстоянии не более 1,5 м, уровень сетевых помех достигает (80 – 90) дБ, что превышает допустимые нормы (60 – 70) дБ. Люминесцентные лампы чувствительны к изменениям напряжения: снижение его на 5 % номинального приводит к мерцанию света и утомляемости зрения, а повышение на столько же – к резкому снижению срока службы ламп.

При работе бытовые электроприёмники отрицательно воздействуют на ЭС, окружающее пространство и другие ЭП (загружают ЭС реактивной мощностью, генерируют высшие гармоники тока и радиопомехи, создают несимметричные режимы и изменяют интенсивность электромагнитных полей вокруг бытовых электроприёмников).

Все бытовые электроприёмники, работающие в однофазном режиме, создают несимметричные режимы трансформаторов ТП с появлением в ЭС токов обратной и нулевой последовательностей.

Из выше указанного следует, что взаимное влияние бытовых электроприёмников и ЭС велико, особенно при близком расположении бытовых электроприёмников и промышленных ЭП, ухудшающих ПКЭ (дуговые сталеплавильные печи, установки дуговой и контактной электросварки, поршневые компрессоры). Поэтому решение вопроса электромагнитной совместимости бытовых электроприёмников, ЭС и окружающего пространства должно проводиться комплексно.

4.5. Технические средства и меры повышения показателей качества электроэнергии

Вопрос о том, подвержена ли электроустановка негативному влиянию качества электроэнергии, зависит от следующих факторов:

- качества электроэнергии, получаемой от поставщика;
- типов нагрузки,
- чувствительности оборудования к различного рода возмущениям и отклонениям от номинальных параметров.

Следует заметить, что не существует единого универсального способа устранения проблем качества электроэнергии. Оптимальное технико-экономическое решение должно вырабатываться для каждой электроустановки индивидуально, но с учётом трёх вышеупомянутых факторов.

Особенно сложно решаются проблемы качества электроэнергии, если в установке существуют одновременно несколько факторов, влияющих на качество электроэнергии, поэтому применяемые решения должны быть не только оптимальны, но и взаимосовместимы [16].

4.5.1. Снижение отклонений напряжения.

Снижение отклонений напряжения достигается регулированием напряжения. Под регулированием напряжения понимается процесс изменения его уровней в характерных точках системы электроснабжения с помощью специ-

альных технических средств. Применяются следующие методы и способы регулирования:

- регулирование напряжения в центре питания;
- изменение сопротивлений элементов сети;
- перераспределение потоков реактивной мощности;
- изменение коэффициентов трансформации трансформаторов, регулируемых под нагрузкой или без нагрузки.

Регулирование напряжения в центре питания приводит к изменению отклонений напряжений практически во всей системе электроснабжения. Такое регулирование является централизованным. Централизованное регулирование напряжения производится:

- на электростанциях путём изменения тока возбуждения генераторов;
- на трансформаторных подстанциях путём изменения коэффициента трансформации трансформаторов или с помощью синхронных компенсаторов.

Если в процессе регулирования режим напряжения изменяется только в части СЭС, то такое регулирование считается местным. Местное регулирование напряжения делится на групповое и индивидуальное. Групповое регулирование осуществляется для группы электроприёмников, например, с помощью ПБВ цехового трансформатора. Устройство ПБВ позволяет регулировать коэффициент трансформации трансформаторов. Его устанавливают на стороне высокого напряжения трансформатора. Устройство имеет основное и несколько дополнительных ответвлений. Регулирование напряжения осуществляется ступенями в пределах $\pm 5\%$.

Индивидуальное регулирование осуществляется у отдельных электроприёмников, например, для печи сопротивления, многошпиндельного станка.

Регулирование напряжения путём изменения сопротивления элементов сети используется при продольной компенсации в линиях электропередачи. Индуктивное сопротивление линии компенсируется ёмкостным сопротивлением конденсатора, включаемого в линию $X_L = X_L - X_C$.

4.5.2. Ограничение колебаний напряжения.

Показатели качества электроэнергии ухудшаются с ростом мощности электроприёмников и при уменьшении мощности короткого замыкания в точке подключения их к сети.

Колебания напряжения пропорциональны увеличению мощности ударной реактивной нагрузки и обратно пропорциональны мощности короткого замыкания

$$\delta U_t = \frac{\Delta Q}{S_{кз}},$$

где ΔQ – приращение реактивной нагрузки; $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения электроприёмников.

Коэффициент несимметрии обратной последовательности пропорционален мощности однофазной нагрузки

$$K_{2U} = \frac{S_{\text{но}}}{S_{\text{кз}}} 100 \%,$$

где $S_{\text{но}}$ – мощность однофазной нагрузки.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения пропорционален суммарной мощности преобразовательных агрегатов

$$K_U = \frac{S_{\text{па}}}{S_{\text{кз}}} 100 \%,$$

где $S_{\text{па}}$ – мощность преобразовательных агрегатов.

Отсюда видно, что для улучшения показателей качества электроэнергии при подключении электроприёмников целесообразно рациональное разделение спокойной и специфической нагрузки. Это можно обеспечить следующим образом (смотри рис. 4.21):

- отдельные глубокие вводы к цехам с резкопеременной и несинусоидальной нагрузкой;
- применение трансформаторов с расщепленными вторичными обмотками и со сдвоенными реакторами (к шинам **1** подключается спокойная нагрузка, к шинам **2** – ударная нагрузка);
- в цеховых сетях разделение осветительной и силовой резкопеременной нагрузки (от сварочных агрегатов), в сетях многоквартирных жилых домов – разделение осветительных сетей и оборудования лифтов.

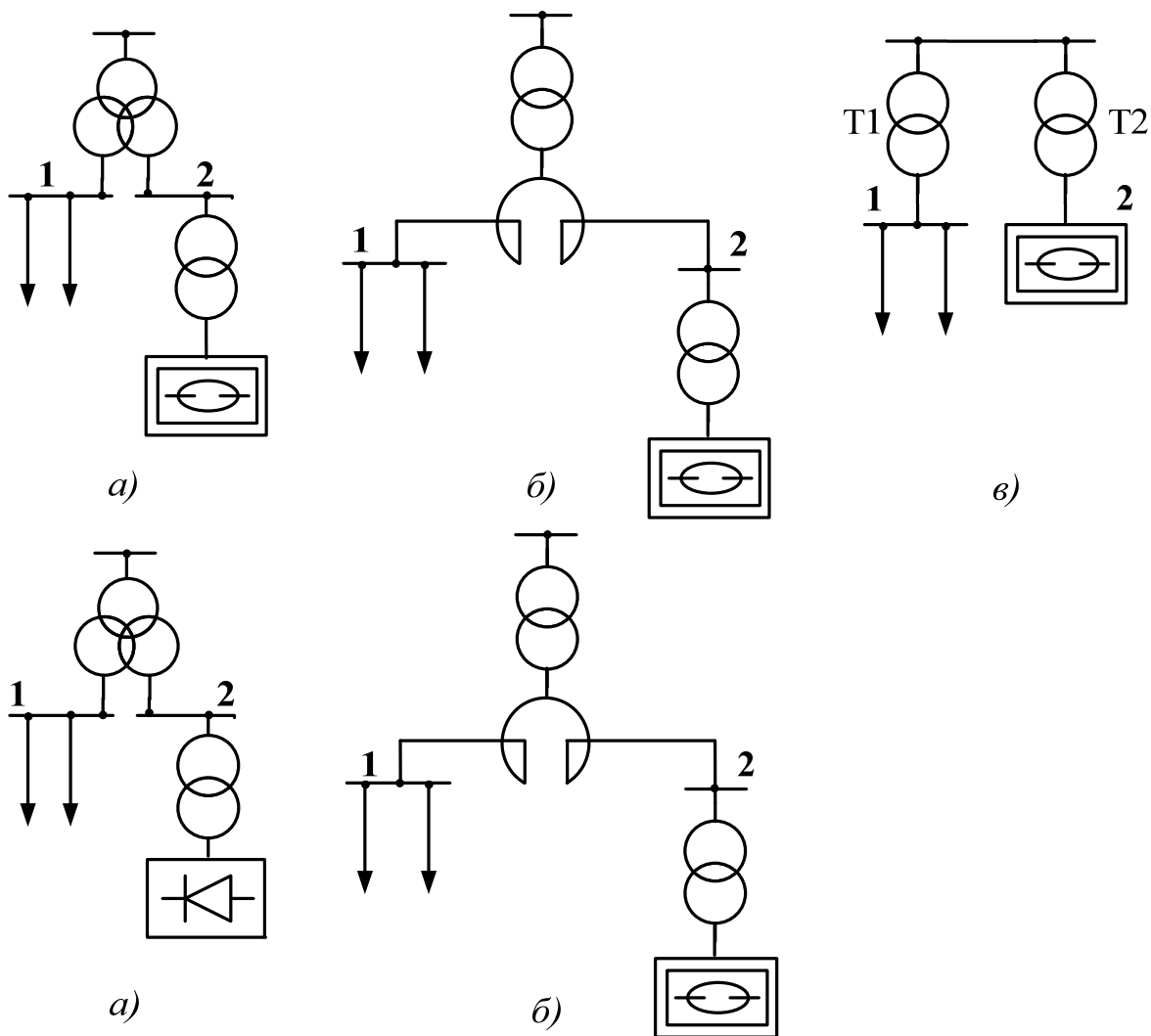


Рис. 4.21. Разделение нагрузки посредством:

а – трансформатора с расщеплёнными обмотками;

б – сдвоенного реактора *ав* – отдельного трансформатора

4.5.3. Наибо

T2;

является

равномерное распределение однофазных нагрузок по фазам.

В сетях с напряжением до 1 кВ несимметрия может быть снижена путём замены силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда – звезда с нулём на трансформаторы со схемой соединения обмоток треугольник – звезда с нулём. В этом случае токи нулевой последовательности, кратные трём, замыкаясь в первичной обмотке, уравнивают систему, и сопротивление нулевой последовательности резко уменьшается.

Несимметрию напряжений можно снизить применением неуправляемых и управляемых симметрирующих устройств. Различают групповой, индивидуальный и комбинированный способы симметрирования. Широко применяются индуктивно – емкостные симметрирующие устройства, которые подключаются параллельно с несимметричной нагрузкой. Наибольшее распространение получила схема Штейнметца (рис. 4.22), которая применяется для симметрирования

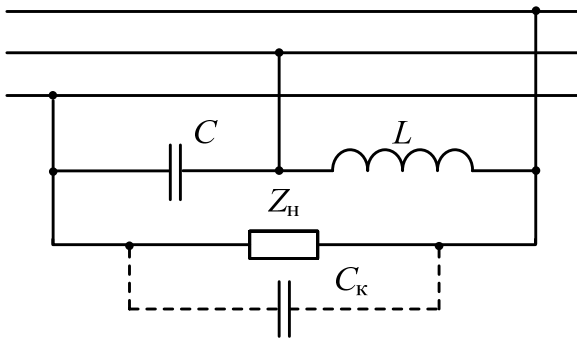


Рис. 4.22. Схема симметрирования однофазной нагрузки ; C_k компенсирующая индуктивную составляющую нагрузки ёмкость

однофазных электроприёмников Z_n . В этой схеме к фазе без нагрузки присоединяют реактор и конденсаторную батарею.

При активной нагрузке ($Z_n = R_n$) полное симметрирование будет достигаться при условии

$$Q_L = Q_C = \frac{P_n}{\sqrt{3}}.$$

Если нагрузка имеет реактивную составляющую, то её можно скомпенсировать подключением конденсаторной батареи (на схеме показана пунктиром).

Симметрирование двух – и трёхфазных несимметричных нагрузок с низким коэффициентом мощности осуществляется с помощью батареи конденсаторов с неодинаковыми мощностями фаз.

4.5.4. Снижение несинусоидальности напряжения.

Для снижения несинусоидальности напряжения применяются следующие методы и средства:

- применяют раздельное питание электроприёмников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и обычных электроприёмников;
- увеличивают число фаз выпрямления, так как это приводит к исчезновению отдельных высших гармоник выпрямительных агрегатов.
- применяют фильтры высших гармоник.

Фильтр представляет собой ряд звеньев, каждое из которых настроено на резонанс для определённой гармоники. Звено фильтра содержит последовательно соединённые индуктивности и ёмкости.

Фильтр высших гармоник одновременно может являться источником реактивной мощности и может служить средством компенсации реактивных нагрузок.

4.6. Контроль показателей качества электроэнергии

4.6.1. Задачи контроля показателей качества электроэнергии.

Качество электроэнергии оказывает существенное влияние на выпуск продукции предприятиями. В то же время и потребители электроэнергии оказывают влияние на её качество. Виновник ухудшения показателей качества электроэнергии должен нести ответственность перед партнёром.

При оценке качества электроэнергии необходимо получение объективного результата контроля ПКЭ. Оценка качества включает следующие этапы:

- разработку программы испытаний:
 - выбор номенклатуры показателей и обоснование её необходимости и достаточности;
 - выбор средств контроля, прежде всего, средств измерения, а также обоснование точности измерений (погрешности измерительных приборов и датчиков) на фоне общей неопределённости показателей, обусловленной нестабильностью условий, выборочным характером контроля и т. д.;
 - определение комплексного показателя качества электроэнергии;
 - выбор значений контрольных нормативов регистрируемых показателей качества;
 - выбор контрольных пунктов контроля качества электрической энергии;
 - выбор формы контроля качества электроэнергии (выборочный контроль или сплошной контроль);
 - определение решающих правил;
- разработка типовых и рабочих методик контроля качества электроэнергии, обеспечивающих достаточную достоверность результатов контроля;
- выбор формы представления результатов контроля;
- определение фактических значений показателей качества и сопоставление их с контрольными нормативами;
- обоснование рекомендаций для принятия управляющего решения.

Объём контроля на каждом этапе должен соответствовать целям контроля. Целями контроля качества электроэнергии в системе электроснабжения являются:

- **контроль** качества электроэнергии (иначе говоря, контроль исключительно *соответствия*) на предмет:
 - соблюдения на границе балансовой принадлежности требований по
 - установленным нормативной документацией показателям качества электроэнергии или договором на пользование электроэнергией между энергосбытовой, электросетевой организацией с одной стороны и потребителем с другой стороны;
 - сертификации электроэнергии;
- **анализ** качества электроэнергии (иначе говоря, контроль *соответствия и принятия решения* по объекту контроля в зависимости от конкретной постановки задачи) на предмет:
 - разработки требований закладываемых в технические условия вновь присоединяемых электроприёмников электроэнергии;
 - контроль выполнения договорных условий в части качества электроэнергии с определением допустимого расчётного и фактического вкладов потребителя в ухудшение качества электроэнергии;

- определение скидок (надбавок) к тарифам на электроэнергию за её качество;
- определения вклада конкретного потребителя в ухудшение качества электроэнергии;
- выявления виновника ухудшения качества электроэнергии;
- рассмотрения претензий продавца или покупателя электроэнергии;
- выбора технических и организационных мероприятий по нормализации качества электроэнергии.

В зависимости от целей, решаемых при контроле, контроле и анализе качества электроэнергии, имеются четыре направления контрольных испытаний:

- **инспекционный контроль;**
- **диагностический контроль;**
- **коммерческий контроль;**
- **технологический контроль.**

Инспекционный контроль качества электроэнергии осуществляется испытательными лабораториями в случае выполнения сертификационных испытаний или подтверждения соблюдения условий сертификации. Такой контроль может осуществляться по требованию Ростехнадзора и ответственным за электрохозяйство во исполнение п. 1.2.6 «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».

При проведении инспекционного контроля контролируется *соответствие* двух показателей⁶ качества электроэнергии:

- установившегося отклонение напряжения, δU_y
- отклонение частоты контрольным нормативам, Δf .

Инспекционный контроль качества электроэнергии осуществляется методом *выборочного* контроля не реже чем предусмотрено требованиями нормативной документации. Он должен быть периодическим, предусматривать кратковременное непрерывное проведение испытаний в течение времени не более одной недели.

Примечание. Особое положение занимают сертификационные испытания.

Назначение сертификационных испытаний подтверждение компетентной третьей стороной результатов испытаний по определению качества электроэнергии. Поэтому к сертификационным испытаниям повышенные требования в части методик испытаний, в том числе используемых методов и средств испытания. Применение сертификации с целью повышения качества электроэнергии является весьма сомнительным способом по следующим причинам:

- на качество электроэнергии влияет не только энергосбытовая, электросетевая организации, но и часть потребителей;
- сертификация качества электроэнергии осуществляется в настоящее время по двум показателям – отклонению частоты и установившемуся отклонению напряжения, что по существу является неверным, поскольку надёжное функционирование электроприёмников потре-

⁶ Очевидно, что контроль *соответствия* двух показателей качества электроэнергии носит искусственный характер и реальной оценки качества, зависящего, как от производителя так и потребителя электроэнергии, не даёт. Качество электроэнергии определяется *всей совокупностью* обязательных показателей (δf , δU_y , δU_b , K_{2U} , K_{0U} , K_U , $K_{U(n)}$), а не двумя показателями

бителя определяется всей совокупностью показателей качества электроэнергии, а не двумя показателями;

- невозможность сохранения «контрольных образцов» электроэнергии и поэтому объективная невозможность предъявления претензий энергосбытовой, электросетевой организациям при последующем ухудшении качества электроэнергии;
- отсутствие условий для обеспечения и поддержания качества электроэнергии из-за физически изношенных к тому же спроектированных по устаревшим нормам электрических сетей, а так же отсутствие надлежащего обслуживания, направленного на обеспечения высокого качества электроэнергии;
- недостаточное обеспечение правовой стороны взаимоотношений между энергосбытовой, электросетевой организациями и потребителями.

Достаточно отметить, что в настоящее время сертификация качества электроэнергии производится, но положительного результата не даёт по выше перечисленным причинам.

Диагностический контроль качества электроэнергии.

Основной целью диагностического контроля является:

- разработки требований закладываемых в технические условия вновь присоединяемых электроприёмников;
- контроль выполнения договорных условий в части качества электроэнергии с определением допустимого расчётного и фактического вкладов потребителя в ухудшение качества электроэнергии;
- определения вклада конкретного потребителя в ухудшение качества электроэнергии;
- выявления виновника ухудшения качества электроэнергии;
- рассмотрения претензий продавца или покупателя электроэнергии;
- выбора технических и организационных мероприятий по нормализации качества электроэнергии.

Диагностический контроль должен осуществляться при выдаче и проверке выполнения технических условий на присоединение потребителя к электрической сети, при контроле договорных условий на электроснабжение, а также в тех случаях, когда необходимо определить долевой вклад в ухудшение КЭ группы потребителей, присоединённых к общему центру питания. Данное направление контроля проводят при наличии претензий продавца или покупателя электроэнергии.

Если результаты диагностического контроля качества электроэнергии подтверждают «виновность» потребителя в нарушении норм качества электроэнергии, то основной задачей электросетевой организации совместно с потребителем является разработка и оценка возможностей и сроков выполнения технических и организационных мероприятий по нормализации качества электроэнергии.

При проведении диагностического контроля определяется не только *соответствие* ПКЭ контрольным нормативам, но и выполнение обязательств сторон по обеспечению качества электроэнергии. При диагностическом контроле контролируют как нормируемые (δU_v , δU_b , P_b , K_{2U} , K_{0U} , K_U , $K_{U(n)}$, Δf), так и ненормируемые (δU_n , Δt_n , $U_{имп}$, $K_{перU}$, $F_{\delta U_b}$, $\Delta t_{i,i+1}$, $\Delta t_{имп.0,5}$, δU_n , F_n , $\Delta t_{пер.U}$) ПКЭ. Очевидно, в данном случае помимо перечисленных ПКЭ необходимо измерять вспомогательные параметры, характеризующие качество электроэнергии по току и мощности – токи и их гармонические и симметричные составляющие и соответствующие им потоки мощности, $\cos\phi$. Это обстоятельство обусловлено необходимостью не только контроля *соответствия* ПКЭ контрольным нормативам, но и необходимости *принятия решения* по качеству электроэнергии.

Диагностический контроль качества электроэнергии должен быть периодическим и осуществляется методом *выборочного* контроля не реже чем предусмотрено требованиями нормативной документацией (предусматривать кратковременное непрерывное проведение испытаний в течение времени не более одной недели).

Коммерческий контроль качества электроэнергии

Основной целью коммерческого контроля является – определение скидок (надбавок) к тарифам на электроэнергию за её качество. Коммерческий контроль может применяться как средство экономического воздействия на виновника ухудшения качества электроэнергии. В результате такого контроля, если это установлено договором энергоснабжения, оценивается стоимость электроэнергии с учётом неустойки за её качество.

При проведении коммерческого контроля определяется *соответствие* контрольным нормативам следующих ПКЭ – δU_y , P_b , K_{2U} , K_{0U} , K_U , $K_{U(n)}$, Δf .

В данном случае помимо показателей качества электроэнергии по напряжению, необходимо измерять вспомогательные параметры, характеризующие качество электроэнергии по току и мощности и проводить учёт отпущенной электроэнергии. В связи с этим коммерческий контроль осуществляется на границе раздела между поставщиком и потребителем электроэнергии или в точках учёта потребляемой электроэнергии.

Коммерческий учёт качества электроэнергии должен *непрерывно* осуществляться в точках учёта потребляемой электроэнергии как средство экономического воздействия на виновника ухудшения качества электроэнергии. Для этих целей должны применяться измерительные приборы, совмещающие в себе функции учёта электроэнергии и измерения её качества. Наличие в одном приборе функций учёта электроэнергии и контроля ПКЭ позволит совместить оперативный контроль и коммерческий учёт качества электроэнергии, при этом могут применяться общие каналы связи и средства обработки, отображения и документирования информации АСКУЭ.

Технологический контроль качества электроэнергии или, иначе говоря *периодический* контроль качества электроэнергии. Контроль качества электроэнергии, осуществляемый в целях управления качеством электроэнергии, при котором периодичность поступления информации о ПКЭ и их оценки, определяемая организацией, осуществляющей контроль качества электроэнергии, должна соответствовать периодичности, установленной ГОСТ 13109–97. Данный вид контроля качества электроэнергии с длительностью и (или) погрешностью измерений, которые могут быть снижены по сравнению с требованиями ГОСТ 13109–97. Другими словами, для этих целей могут использоваться более простые и дешёвые средства измерения. Алгоритмы измерения ПКЭ в этом случае должны быть строго соблюдены.

4.6.2. Приборы контроля показателей качества электроэнергии.

Для измерений показателей качества электроэнергии могут допускаться приборы, погрешности измерения которых соответствуют нормативной документации на измерительные приборы [13, 15, 17]. Значения погрешностей измерений ПКЭ должны находиться в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями по [12], приведёнными в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Показатель качества электроэнергии	Нормы ГОСТ 13109-97		Пределы допустимых погрешностей измерений ПКЭ	
	Нормально допустимые	Предельно допустимые	абсолютной	относительной
Установившееся отклонение напряжения δU_y , %	± 5	± 10	$\pm 0,5$	-
Размах изменения напряжения δU_t , %	-	Кривые 1, 2 на рис. 5	-	± 8
Доза фликера: - кратковременная P_{St} , отн. ед. - длительная P_{Lt} , отн. ед.	- -	1,38; 1,0 1,0; 0,74	- -	± 5 ± 5
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , %	2	4	$\pm 0,5$	-
Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} ,	2	4	$\pm 0,5$	-
Коэффициент искажения синусоидальности напряжения K_U , %	По табл. 1	По табл. 1	-	± 10
Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, %	По табл. 2	По табл. 2	$\pm 0,05$ при $K_{U(n)} < 1$	± 5 при $K_{U(n)} \geq 1$
Отклонение частоты Δf , Гц	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,03$	-
Длительность провала напряжения $\Delta t_{п}$, с	-	30	$\pm 0,01$	-
Импульсное напряжение $U_{имп}$, кВ	-	-	-	± 10
Коэффициент временного перенапряжения $K_{пер U}$, отн. ед.	-	-	-	± 10

Интервалы осреднения результатов измерений ПКЭ должны соответствовать табл. 4.8.

Таблица 4.8

Показатель качества электроэнергии	Интервал осреднения, с
Установившееся отклонение напряжения	60
Размах изменения напряжения	-

Доза фликера	-
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой	3
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения	3
Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения	3
Отклонение частоты	20
Длительность провала напряжения	-
Импульсное напряжение	-
Коэффициент временного перенапряжения	-

В настоящее время на рынке средств измерения ПКЭ представлено большое количество измерительных приборов отечественного и зарубежного производства. Большинство зарубежных измерительных приборов удобны в эксплуатации и надёжно функционируют, но не удовлетворяют требуемым ГОСТ 13109–97 алгоритмам измерения. Кроме того, импортные приборы дороже отечественных аналогов.

Можно отметить следующие отечественные средства измерения:

- **ЭРИС-КЭ** (ООО «Энергоконтроль», г. Москва);
- **Ресурс-UF** (НПП «Энерготехника», г. Пенза);
- **Нева-ИПЭ** (НПФ «Энергосоюз», г. Санкт-Петербург);
- **Энергомонитор** (НПП «Марсэнерго», г. Санкт-Петербург);
- **Уран-ЮОМ** (Уральский государственный технический университет, г. Екатеринбург);
- **ИВК «Омск»** (ОГТУ, г. Омск);
- **ППКЭ** (ООО «НПФ «Солис-С», г. Москва);
- **АПКЭ-1** (НПФ «Про-софт-Е», г. Екатеринбург);
- **Парма РК 6.05** (ООО «Парма», г. Санкт-Петербург);
- **LPW-305** (Россия. Анализатор качества электроэнергии по ГОСТ 13109–97, ГОСТ Р 51317.4.30–2008);
- **Прорыв-КЭ** (Россия. Измерительный прибор для обеспечения мониторинга показателей качества электроэнергии).

Среди измерительных приборов зарубежного производства можно отметить следующие средства измерения: АКЭ–823, АКЭ–824, АКЭ–9032, АКЭ–2020, МЭТ–5080, ПКК–57, Fluke 430, MI 2092, MI 2192, MI 2292, Hioki 3196, C. Д 8334, PQM–701, PP1, C.A. 8332/34, WaLoG, Microvip3, plus, ANALYST 3Q, UNIGOR390 и другие.

4.6.3. Организация контроля показателей качества электроэнергии.

Контроль за соблюдением электробытовыми и электросетевыми организациями и потребителями электроэнергии требований стандарта осуществляют органы надзора и аккредитованные в установленном порядке испытательные лаборатории по качеству электроэнергии.

Контроль качества электроэнергии подразумевает оценку соответствия показателей установленным нормам, а дальнейший анализ качества электроэнергии – определение стороны виновной в ухудшении этих показателей.

Определение показателей качества электроэнергии – задача нетривиальная. Это оттого, что большинство процессов, протекающих в электрических сетях – быстroteкущие, все нормируемые показатели качества электроэнергии не могут быть измерены напрямую – их необходимо рассчитывать, а окончательное заключение можно дать только по статистически обработанным результатам. Поэтому, для определения показателей качества электроэнергии, необходимо выполнить большой объём измерений с высокой скоростью и одновременной математической и статистической обработкой измеренных значений.

Для всех нормируемых ПКЭ минимальный период контроля составляет 24 ч. Рекомендуемая общая продолжительность непрерывных измерений составляет 7 суток, включая и выходные дни. Для оценки ненормируемых КЭ (провалы, перенапряжения, импульсы) проводят длительные наблюдения и регистрацию показателей электроэнергии.

Контроль качества электроэнергии в точках общего присоединения потребителей электроэнергии к системам электроснабжения общего назначения проводят энергосбытовые и электросетевые организации. Указанные организации выбирают точки контроля в соответствии с нормативными документами, утверждёнными в установленном порядке, и определяют периодичность контроля.

Периодичность измерений ПКЭ устанавливают:

- для установившегося отклонения напряжения – не реже двух раз в год в зависимости от сезонного изменения нагрузок в распределительной сети центра питания, а при наличии автоматического встречного регулирования напряжения в центре питания – не реже одного раза в год. При незначительном изменении суммарной нагрузки центра питания и неизменности схемы сети и параметров её элементов допускается увеличивать интервал между контрольными измерениями для установившегося отклонения напряжения;

- для остальных показателей – не реже одного раза в 2 года, при неизменности схемы сети и её элементов и незначительном изменении нагрузки потребителя, ухудшающего качество электроэнергии.

Конкретные сроки проведения периодического контроля качества электроэнергии в точках присоединения потребителей к системе электроснабжения общего назначения устанавливаются энергосбытовой и электросетевой организацией в эксплуатационных режимах, соответствующих нормальным схемам или длительным ремонтным схемам сетей общего назначения.

Эпизодический контроль проводится в случае изменения схемы электрических сетей, характера нагрузок потребителей или требований потребителей к качеству электроэнергии.

Содержание контроля и соответствие ПКЭ требованиям стандарта приведены в табл. 4.9.

Потребители, ухудшающие качество электроэнергии, должны проводить контроль ПКЭ в точках собственных сетей, ближайших к точкам общего при-

соединения этих сетей к электрической сети общего назначения. Также осуществляется контроль на выводах электроприёмников, являющихся источниками кондуктивных электромагнитных помех.

Таблица 4.9

Особенности оценки показателей качества электроэнергии

Показатель	Показатель считают соответствующим требованиям стандарта
1	2
Установившееся отклонение напряжения	<ul style="list-style-type: none"> - если все измеренные за каждую минуту в течение 24 ч значения установившегося отклонения напряжения находятся в интервале $\pm 10\%$, а не менее 95 % измеренных за тот же период времени значений установившегося отклонения напряжения находятся в интервале $\pm 5\%$; - если суммарная продолжительность времени выхода за интервал $\pm 5\%$ составляет не более 5% от установленного периода времени, то есть 1 ч 12 мин, а за интервал $\pm 10\% - 0\%$ от этого периода времени
Размах изменения напряжения	<ul style="list-style-type: none"> - если измеренное значение размаха изменений напряжения не превышает значений, определяемых по кривым рис. 1 [12] для соответствующей частоты повторения изменений напряжения или интервала между изменениями напряжения; - для периодических и непериодических колебаний напряжения, имеющих форму, отличную от меандра, оценку осуществляют в соответствии с Приложением В [12]
Доза фликера	<ul style="list-style-type: none"> - если каждая кратковременная и длительная дозы фликера, определённые путём измерения в течение 24 ч или расчёта по Приложению В [12] не превышают предельно допустимых значений

<p>Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения</p>	<ul style="list-style-type: none"> - если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов n-й гармонической составляющей напряжения не превышает предельно допустимого значения, а значение коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения; - если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, то есть 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени; - если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, то есть 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени
<p>Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной (нулевой) последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> - если наибольшее из всех измеренных в течение 24 ч значений коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности (нулевой последовательности) не превышает предельно допустимого значения, а его значение, соответствующее вероятности 95 % за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения; - если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, то есть 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 % от этого периода времени

1	2
Отклонение частоты	<p>- если все измеренные в течение 24 ч значения отклонений частоты находятся в интервале, ограниченном предельно допустимыми значениями, а не менее 95 % всех измеренных его значений находятся в интервале, ограниченном нормально допустимыми значениями;</p> <p>- если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более 5 % от установленного периода времени, то есть 1 ч 12 мин, а за предельно допустимые значения – 0 %</p>
Длительность провалов напряжения	<p>- если наибольшее из всех измеренных в течение продолжительного периода наблюдения (как правило, в течение года) длительностей провалов напряжения не превышает предельно допустимого значения</p>

4.6.4. Анализ и статистическая обработка результатов измерения показателей качества электроэнергии.

При определении фактического вклада искажающего субъекта на качество электроэнергии проводится анализ и статистическая обработка данных измерений ПКЭ.

При анализе потребители, присоединённые к точке общего присоединения, делят на искажающие и неискажающие. Результаты измерений обрабатываются по каждому присоединению.

Сущность статистической обработки результатов измерения нормируемых ПКЭ состоит в построении функции распределения ПКЭ. Измерительные приборы позволяют измерить частоту попаданий значений ПКЭ в определённый интервал на всём диапазоне возможных значений. Наиболее удобной формой представления информации об изменениях случайных величин является гистограмма – графическое представление статистического ряда исследуемого показателя, изменение которого носит случайный характер. Такая суточная функция распределения в форме гистограммы приведена на рис. 4.23. Она представляет собой зависимость вероятности события, которая оценивается $P_{(i)} = m/n$, где m – количество измерений, которые находятся в заданных пределах, n – общее количество измерений.

Вид гистограммы в общем случае для таких ПКЭ, как K_U , K_{2U} , K_{0U} , $K_{U(n)}$ показан на рис. 4.23, а, а для таких как δU_y и Δf – на рис. 4.23, б.

Как отмечалось, для каждого нормируемого ПКЭ стандартом устанавливаются нормально P_n и предельно P_n допустимые значения показателя. Оценку качества электроэнергии проводят по наибольшим значениям $P_{нб}$ для ПКЭ первой группы и по наибольшим и наименьшим значениям ПКЭ второй группы. Для ПКЭ первой группы наибольшие значения, измеренные в течение 24 ч не должны превышать предельно допустимых значений, установленных ГОСТ 13109–97, а 95 % измеренных за то же время значений не должны превышать нормально допустимых значений. При указанных условиях требования нормативной документации выполняются, если появляются показатели, превышающие допустимые значения, ГОСТ 13109–97 не выполняется.

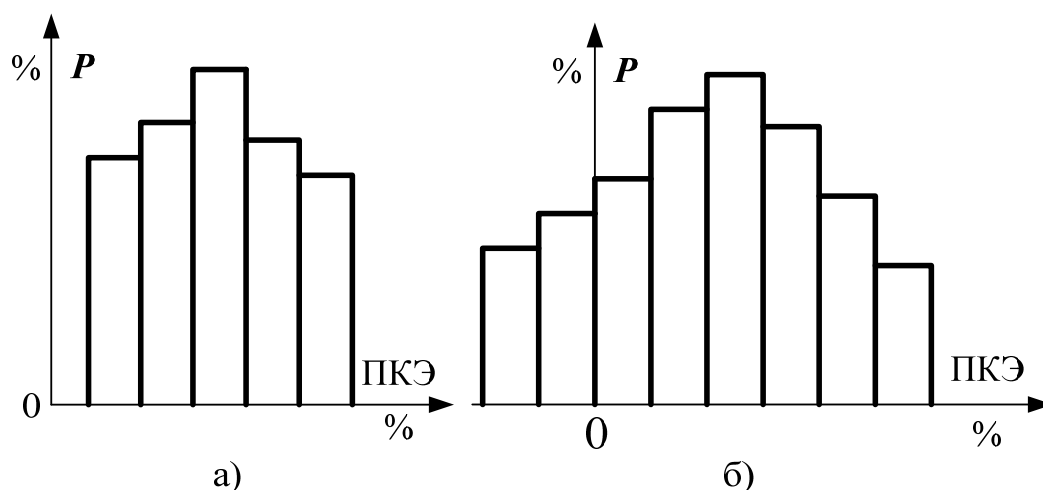


Рис. 4.23. Примерный вид гистограмм распределения ПКЭ на суточном интервале изменений:

а – для показателей, характеризующихся коэффициентами;
 б – для показателей, имеющих верхние (+) и нижние значения (–)

Для показателей второй группы установлены как положительные, так и отрицательные допустимые значения. Их наибольшие значения, измеренные в течение 24 ч не должны превышать предельно допустимые значения, а верхние (+) и нижние (–) значения этих показателей, в границах которых находятся 95 % измеренных значений, не должны превышать положительные и отрицательные нормально допустимые значения. При указанных условиях требования ГОСТ 13109–97 выполняются.

Результаты контроля, обработки измерений ПКЭ, анализа качества электроэнергии оформляются протоколом.

4.7. Изменение стандартов: ГОСТ 13109–97 на ГОСТ Р 51317.4.30–08 и ГОСТ Р 51317.4.7–08

4.7.1. Общие положения.

В настоящее время разработаны и утверждены новые стандарты ГОСТ Р 51317.4.30–08 и ГОСТ Р 51317.4.7–08, регламентирующие методику измерения показателей качества электроэнергии.

Первый стандарт описывает методы измерения основных показателей качества электрической, второй целиком посвящён измерению гармоник. Новые стандарты базируются на международных стандартах МЭК 61000–4–30 и МЭК 61000–4–7 и призваны заменить разработанный более 10 лет назад ГОСТ 13109–97.

В связи с этим, возникнет вопрос разработки новых или адаптации существующих средств измерения показателей качества электрической для обеспечения соответствия новым требованиям. С этой точки зрения и производится сравнение новых стандартов с ГОСТ 13109–97.

4.7.2. Сравнение стандартов.

По сравнению с ГОСТ 13109–97, новые стандарты более детально описывают методику измерения и объединения показателей качества электрической с целью обеспечения надёжных результатов измерения и их повторяемости для различных производителей средств измерений. Особенно значительные изменения коснулись оценки искажений синусоидальности напряжения в нестационарных условиях.

Стандарт ГОСТ Р 51317.4.30–08 определяет несколько классов характеристик средств измерений:

- класс А, предназначенный для проведения точных измерений, например, для проведения сертификационных испытаний;
- класс S, предназначенный для проведения непрерывного мониторинга качества электроэнергии относительно дешёвыми средствами;
- класс В, «установленный для того, чтобы избежать признания многих существующих типов средств измерений устаревшими».

ГОСТ Р 51317.4.7–08 также определяет два класса характеристик. Таким образом, стандарты предполагают создание нового класса дешёвых и массовых приборов для непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии.

Новые стандарты сами не устанавливают контрольных значений ПКЭ, для этих целей, предполагается использование стандарта CEI EN 50160.

Стандарты уделяют внимание организации измерений, технике безопасности и другим организационным вопросам.

4.7.2.1. Контролируемые показатели качества электроэнергии.

Состав показателей качества электроэнергии, описанный в ГОСТ Р 51317.4.30–08, в целом аналогичен предыдущему стандарту, в него входят:

- частота в системе электроснабжения;
- значение напряжения и установившееся отклонение напряжения;
- параметры провалов, выбросов и прерываний напряжения;
- параметры переходных процессов напряжения;
- несимметрии напряжений;
- гармоники и *интергармоники*;
- доза фликера.

В новом стандарте добавилось измерение информационных сигналов в диапазоне частот от 3 кГц до 30 МГц, ранее требовавшееся *измерение размаха изменений напряжения и частоты* теперь отсутствует. Значительные изменения произошли с измерением гармоник, введено понятие интергармоник и высокочастотных спектральных составляющих.

Стандарт определяет полезным проводить измерение параметров токов, мощностей и фазовых углов. Методика измерения теперь определена для сетей с частотой как 50 Гц так 60 Гц.

Измерения тока рекомендуется проводить во всех пяти проводах: трёх

фазах, рабочем нулевом проводнике и нулевом защитном проводнике⁷.

Изменилось определение установившегося отклонения напряжения. Если раньше отклонение рассчитывалось для действующего значения напряжения основной частоты, то теперь для среднеквадратического напряжения с учётом гармоник, интергармоник и других составляющих. В качестве опорного напряжения при вычислении отклонения напряжения, может использоваться либо номинальное значение напряжения, либо опорное напряжение сравнения, получаемое усреднением измеряемого напряжения с постоянной времени 1 мин.

При обнаружении провалов и перенапряжений требуется учёт гистерезиса.

Для расчёта дозы фликера используется алгоритм, описанный в отдельном стандарте ГОСТ Р 51317.4.15.

4.7.2.2. Интервалы усреднения.

Значительные изменения коснулись объединения (в ГОСТ 13109–97 этот процесс назывался усреднением) данных измерения. ГОСТ 13109–97 использовал различные интервалы для усреднения различных показателей качества электроэнергии. ГОСТ Р 51317.4.30–08 использует единый ряд интервалов усреднения: 200 мс, 3 с, 10 мин и 2 ч для всех измеряемых параметров.

Используется следующий алгоритм усреднения результатов измерения:

- основной интервал измерения составляет 200 мс, что соответствует по длительности 10 периодам частоты 50 Гц и синхронизирован с периодами сетевой частоты;
- результаты за интервал 3 с получаются путём объединения 15 интервалов по 200 мс, интервал 3 с синхронизирован с периодами сетевой частоты;
- результаты за интервал 10 мин получаются путём объединения интервалов 200 мс, принадлежащих данному 10 мин интервалу реального времени, пограничные 200 мс интервалы учитываются в обоих 10 мин интервалах (В зависимости от значения частоты, на 10 мин интервал может приходиться различное количество 200 мс интервалов);
- результаты за интервал 2 ч получаются путём объединения 12 интервалов по 10 мин, интервал 2 ч синхронизирован с реальным временем.

Во всех случаях под усреднением интервалов подразумевается вычисление корня квадратного из среднего значения квадратов объединяемых значений. Для класса А пропуски интервалов измерения не допускаются.

Допускается применение интервала усреднения 1 мин, объединение должно выполняться аналогично 10 мин интервалу. При измерении напряжений и токов, дополнительно вычисляется среднеквадратическое значение за период и за половину периода. Основной интервал измерения частоты уменьшился с 20 с до 10 с. Интервал оценки ПКЭ, равный 24 ч, не используются.

⁷ Измерения тока в рабочем нулевом проводнике и нулевом защитном проводнике выполняются при их наличии в контролируемой сети

4.7.2.3. Маркирование.

Стандарт вводит концепцию маркирования измеряемых значений, предназначенную для того чтобы избежать учёта единственного события более чем один раз и получения недостоверных результатов измерения. При обнаружении провалов или выбросов напряжения, остальные измеряемые параметры маркируются. При объединении маркированных измеряемых значений, результаты объединения так же маркируются.

4.7.2.4. Измерение гармоник.

Изменилась сама концепция измерения гармоник, теперь этому вопросу посвящён отдельный ГОСТ Р 51317.4.7–08. Стандарт меняет алгоритм вычисления гармоник и вводит понятие интергармоник и высокочастотных спектральных составляющих.

Определения параметров гармоник даны исходя из использования дискретного преобразования Фурье (подразумевается использование быстрого преобразования) со следующими характеристиками. Для нормальных условий используется прямоугольное окно, длительностью 200 мс (10 периодов частоты 50 Гц), окно Ханнинга используется при потере синхронизации. Параметры преобразования Фурье должны выбираться так, чтобы обеспечить интервал 5 Гц между соседними спектральными составляющими, что соответствует 10 спектральным составляющим на гармонику.

Для оценки гармоник используются следующие параметры:

- гармоническая составляющая – единственная спектральная составляющая, с частотой самой гармоники,
- гармоническая подгруппа – сумма спектральной составляющей с частотой гармоники и двух соседних спектральных составляющих,
- гармоническая группа – сумма спектральной составляющей с частотой гармоники и по пять спектральных составляющих с каждой стороны, самые крайние спектральные составляющие берутся с коэффициентом 0,5.

Изменение стандартов: ГОСТ 13109–97 на ГОСТ Р 51317.4.30–08 и ГОСТ Р 51317.4.7–08.

Во всех перечисленных случаях имеется в виду суммирование по мощности, то есть для вычисления амплитуды гармонической группы или подгруппы, вычисляется корень квадратный из суммы квадратов амплитуд спектральных составляющих. Рис. 4.24 поясняет сказанное на примере 1-ой гармоники.

Вместе с введением группировки гармоник, введены суммарные коэффициенты гармоник (раньше это называлось коэффициент искажения синусоидальности) по гармоническим составляющим, гармоническим подгруппам и группам. Введён взвешенный коэффициент гармонических составляющих с весовыми коэффициентами равными номерам гармоник.

Стандарт вводит следующие параметры качества электроэнергии, связанные с оценкой интергармоник:

- интергармоническая подгруппа – сумма спектральных составляющих между двумя соседними гармоническими составляющими, не включая спек-

тральные составляющие непосредственно прилегающих к самим гармоническим составляющим;

– интергармоническая группа – сумма всех спектральных составляющих между двумя соседними гармоническими составляющими.

Рис. 4.24 поясняет сказанное на примере 3-й интергармоники.

Кроме этого, стандарт говорит об измерении высокочастотных спектральных составляющих в диапазоне от частоты максимальной гармоники (приблизительно 2 кГц) до частоты 9 кГц, спектральные составляющие суммируются в группы шириной 200 Гц.

Гармонические параметры усредняются с постоянной времени 1,5 с. Кроме напряжения измеряются параметры токов и мощности гармоник.



Рис. 4.24. Группировка гармоник

4.7.2.5. Точность измерения.

Новые стандарты определяют два класса измерительных приборов:

- класс А для точных измерительных приборов;
- класс S для относительно дешёвых измерительных приборов.

Требуемая точность измерений для класса А несколько возросла по сравнению с ГОСТ 13109–97. Точность измерения частоты возросла с 0,03 Гц до 0,01 Гц, напряжения и установившегося отклонения напряжения с 0,5 % до 0,1 %, несимметрии напряжения с 0,3 % до 0,15 %; точность измерения гармоник осталась на уровне 0,05 %. Необходимо заметить, что теперь требования к точности измерений касаются только погрешностей самого средства измерения, и не включают погрешность измерительных преобразователей. Точность измерения для класса S ниже требований предыдущего стандарта.

Стандарт определяет диапазон влияющих величин и условия проведения испытаний для подтверждения нахождения результатов измерений в допустимых пределах.

Для класса А, ГОСТ Р 51317.4.30–08 предъявляет жёсткие требования к точности установки времени: неопределённость установки времени не должна

превышать 20 мс, что достигается путём синхронизации с использованием приёмников систем ГЛОНАСС или GPS, при невозможности внешней синхронизации, уход не должен превышать 1 с за 24 ч. Для класса S синхронизация не требуется, допустимый уход 5 с за 24 ч.

4.7.3. Функциональные отличия

Как видно из сделанного сравнения, набор требуемых ПКЭ значительно расширился. Хотя и раньше выпускались приборы, близкие к требованиям ГОСТ Р 51317.4.30–08 по разнообразию измеряемых параметров.

4.7.3.1 Усложнение алгоритма.

Измерения высокочастотных спектральных составляющих требует увеличения частоты дискретизации аналогово-цифровых преобразователей. Если ГОСТ 13109–97 требовал частоты дискретизации порядка 6 кГц, то теперь она должна быть увеличена до 25 кГц. Основная часть алгоритма (расчёт среднеквадратических значений, гармоник и др.), как и раньше, может выполняться на относительно низкой частоте. Различие частот требует применения дециматора, подавляющего наложения в спектральной области. Для компенсации задержек между каналами аналогово-цифровых преобразователей, как будет сказано ниже, необходимо применение фильтров, компенсирующих задержку.

Группировка гармоник и интергармоник вместе с уменьшением шага спектральных составляющих до 5 Гц делает необходимым подстройку частот спектральных составляющих преобразования Фурье под частоту сети. Увеличение длины преобразования Фурье делает необходимым применение быстрого преобразования Фурье.

Более высокие требования к точности результатов измерения, сглаживание с большой постоянной времени и объединение данных за значительные интервалы времени ставит вопрос учёта конечной разрядности чисел. Например, при объединении напряжений за интервал 10 мин приходится вычислять корень квадратный из суммы квадратов 3000 значений напряжений за каждые 200 мс.

4.7.3.2. Инструментальная реализация.

Значительно возросли требования к аппаратным ресурсам. Так, только увеличение частоты дискретизации и увеличение длины преобразования Фурье приводит к росту требуемой производительности процессора почти на два порядка. Требуемая память растёт по причине усложнения алгоритма работы, увеличения количества измеряемых параметров, увеличения уровней объединения данных по времени. Размер памяти увеличивается тоже почти на два порядка.

Добавление каналов измерения токов приводит к увеличению количества каналов аналогово-цифровых преобразователей до 8.

Большинство многоканальных аналогово-цифровых преобразователей работают по принципу последовательного опроса входов, что приводит к фазовому сдвигу между каналами. Аналогово-цифровые преобразователи с одновременной выборкой по всем 8 каналам хотя и существуют, но выбор их весьма

узок. Это делает нецелесообразным их применение, особенно если требуются такие функции как переключения пределов измерения, гальванической развязки по входу и др. Более удобно оказывается применение аналогово-цифровых преобразователей с последовательным опросом и компенсации возникающего фазового сдвига цифровыми корректирующими фильтрами.

4.7.3.3. Заключение

Таким образом, разработка средств измерения показателей качества электроэнергии значительно усложнилась и требует не только больших усилий, но и более высокой квалификации в области цифровой обработки сигналов. Приобретение готового алгоритма, реализующего вычислительные функции, позволяет значительно сократить стоимость и сроки разработки.

4.8. Управление качеством электроэнергии

4.8.1. Цели и задачи управления качеством электроэнергии.

Проблема управления качеством электроэнергии особенно остро встаёт при взаимодействии поставщиков и потребителей электроэнергии. Эти взаимодействия должны быть взаимовыгодными при условии обеспечения нормируемого качества электроэнергии. Повышение качества электроэнергии, как товара, обеспечивается системой управления качеством. Система управления качеством электроэнергии имеет своё вещественное, экономическое и информационное содержание. Система управления качеством электроэнергии содержит такие типовые элементы, как объём потребности, нормативы качества, факторы и условия обеспечения качества, контроль и оценка уровня качества, разработка и реализация экономически оптимальных мероприятий по повышению или поддержанию качества электроэнергии.

Проблемы качества электроснабжения возникают на стыке производства (поставки) и потребления электроэнергии.

Снижение ПКЭ у потребителя приводит к снижению объёмов или качества выпускаемой продукции. В то же время, электросетевая организация несёт потери при низком качестве электроэнергии. Поэтому оценка качества электроэнергии производится в виде потерь потребителя и производителя (поставщика) электроэнергии от снижения уровня качества, выраженных в виде убытков (экономических ущербов).

При определении целей и задач управление качеством электроэнергии требует учёта характерных особенностей:

1. Возможность сбыта электроэнергии в объёмах существующей в каждый данный момент потребности в ней, выработка электроэнергии полностью зависит от потребления и автоматически изменяется в соответствии с графиком потребления электроэнергии.

2. Мгновенность процесса передачи и распределения электроэнергии. Отпуск электроэнергии происходит одновременно с её потреблением. Такая быстрота процессов предъявляет повышенные требования к автоматизации управления энергетическими установками.

3. В качестве показателей качества выступают Государственные стандарты, устанавливающие контрольные нормативы, выполнение которых является обязательным для всех пользователей электроэнергетики, независимо от их мощности и территориального расположения.

4. Качество электроэнергии у потребителя обеспечивается путём воздействия на параметры системы электросетевой организации и взаимосвязанной работой многих предприятий различных отраслей. Поэтому сравнение плановых и фактических показателей качества электроэнергии и разработка мероприятий по повышению качества являются обязанностью не только энергосбытовой и электросетевой организациями, но и потребителей в рамках требований, установленных Правилами пользования электроэнергией и прочими инструктивными материалами.

5. На качество электроснабжения влияет целый комплекс технических, организационных и экономических факторов. Улучшению ПКЭ способствуют научно-технический прогресс в электроэнергетике и электропромышленности, улучшение технико-экономических показателей работы электротехнических и технологических установок потребителей.

6. Экономический аспект проблемы качества электроэнергии, связанный с экономическими показателями, как потребителей, так и энергосбытовой и электросетевой организациями.

7. Поскольку потребителями электроэнергии являются не только производственные потребители, но и коммунально-бытовые, снижение качества электроэнергии отрицательно сказывается на работе бытовых приборов, приводит к убытку и создаёт дискомфорт в жизни населения. Поэтому необходимо рассматривать качество электроэнергии как социально-экономический показатель отношения между потребителем электроэнергии и энергосбытовой, электросетевой организациями.

8. Механизм управления качеством электроэнергии включает также правовые вопросы – исследование вопросов ответственности за низкое качество электроэнергии, за несоблюдение требований стандартов и правил эксплуатации, вопросы правоотношений поставщика и потребителя.

Основными функциями управления применительно к качеству электроэнергии являются:

- функция проектирования, которая подразумевает формирование системы электроснабжения с целью оптимизация ПКЭ;
- функция реализации, осуществляющая поставку электроэнергии надлежащего качества;
- функция контроля, направленная на выявление отклонений показателей качества от нормативных значений;
- функция управляющего воздействия подразумевает меры по соблюдению нормативных требований и средства по ликвидации существующих несоответствий.

Объектом управления выступает электроэнергия, то есть основные показатели её качества, надёжности электроснабжения и экономичности передачи электроэнергии.

В качестве субъектов управления выступают энергосбытовая организация и региональные органы государственного управления и надзора за электропотреблением, это, прежде всего, государственная инспекция по энергонадзору, энергосбытовая организация и государственная энергетическая комиссия. Федеральная и региональные энергетические комиссии в своей деятельности руководствуются законодательством Российской Федерации и работают на единой нормативно-методической основе. В энергосбытовой и электросетевой организациях ведётся непрерывный учёт частоты и периодический анализ качества электроэнергии (сопоставляются данные о фактическом и нормируемом уровне отклонений напряжения).

Обратная связь при управлении качеством электроэнергии в практической деятельности предполагает измерение и анализ показателей качества электроэнергии, анализ претензий потребителей по компенсации потерь в связи с нарушением качества электроэнергии, проведение мероприятий по устранению обнаруженных отклонений фактических показателей ПКЭ от нормативных значений.

Особая роль в соблюдении принципа обратной связи в системе управления качеством принадлежит государственной инспекции по энергонадзору и энергосбытовой организации.

Средствами управления в энергетике выступают нормативные и технические документы, регламентирующие показатели качества электроснабжения, а также мероприятия по повышению ПКЭ.

Таким образом, для достижения поставленных целей необходимо осуществлять скоординированную деятельность по руководству и управлению качеством электроэнергии. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000–2000 такая деятельность носит наименование менеджмент.

4.8.2. Менеджмент качества электроэнергии.

Для осуществления скоординированной деятельности по управлению качеством электроэнергии, должна быть создана система менеджмента качества – «совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов, предназначенных для разработки политики и целей организации в области качества электроэнергии и достижения этих целей».

Согласно ИСО 9001–2000, одно из ключевых понятий «Системы менеджмента качества» – процесс.

Процесс обеспечения качества – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, направленных на улучшение качества.

Среди всех видов деятельности, связанных с производством, передачей и распределением электроэнергии, можно выделить процессы, от качества реализации которых зависит качество поставляемой электроэнергии.

К ним можно отнести:

- маркетинг (система управления деятельностью по производству и сбыту электроэнергии);
- проектирование развития генерирующих и (или) сетевых объектов;
- присоединение новых потребителей к электрической сети;

- заключение договоров с поставщиками материально-технического обеспечения;
- заключение договоров с субъектами электроэнергетики и конечными потребителями;
- производство, передача, распределение;
- мониторинг процессов и контроля ПКЭ;
- анализ и улучшение ПКЭ.

4.8.3. Договорные условия между энергосбытовой, электросетевой организациями и потребителем электроэнергии.

Правовая сторона вопроса взаимоотношений энергосбытовой и электросетевой организацией с потребителями упорядочена Гражданским кодексом Российской Федерации. Основным документом, регламентирующим взаимоотношения производителя и потребителя электроэнергии, является договор на пользование электроэнергией, который должен быть составлен с учётом Гражданского кодекса РФ (ГК).

«По договору энергоснабжения энергосбытовая и электросетевая организация обязуется подавать абоненту (потребителю) через присоединённую сеть энергию, а абонент обязуется оплачивать принятую энергию, а также соблюдать предусмотренный договором режим её потребления, обеспечивать безопасность эксплуатации находящихся в его ведении энергетических сетей и исправность используемых им приборов и оборудования, связанных с потреблением электроэнергии» (ст. 539 ГК).

«Качество подаваемой электросетевой организацией электроэнергии должно соответствовать требованиям, установленным государственными стандартами и иными обязательными правилами или предусмотренным договором энергоснабжения... В случае нарушения электросетевой организацией требований, предъявляемых к качеству электроэнергии, абонент вправе отказаться от оплаты такой электроэнергии» (ст. 542 ГК).

«Абонент обязан обеспечивать надлежащее техническое состояние и безопасность эксплуатируемых энергетических сетей, приборов и оборудования, соблюдать установленный режим потребления электроэнергии, а также немедленно сообщать энергосбытовой и электросетевой организациям об авариях, о пожарах, неисправностях приборов учёта электроэнергии и об иных нарушениях, возникающих при пользовании электроэнергией» (ст. 543 ГК).

Потребитель электроэнергии, как и любой другой потребитель, вправе требовать возмещения убытков: «Лицо, право которого нарушено, может требовать полного возмещения причинённых ему убытков, если законом или договором не предусмотрено возмещение убытков в меньшем размере» (ст. 15). В то же время электросетевая организация, если она несёт убытки, может требовать компенсации этих потерь от потребителя.

В договоре должны быть определены:

- точки общего присоединения;
- точки контроля ПКЭ;

- электроприёмники, ухудшающие ПКЭ;
- значение наименьшей мощности короткого замыкания в точках общего присоединения;
- договорные значения ПКЭ в точках общего присоединения (точках контроля ПКЭ) по следующим показателям:
 - по установившемуся отклонению напряжения;
 - по длительности провала напряжения.

Договорные условия по остальным показателям качества электроэнергии следует принять в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–97.

Кроме того, в договоре определяются:

- условия, необходимые для контроля ПКЭ (интервала времени наибольших и наименьших нагрузок, тип, погрешность измерительных приборов и трансформаторов и др.);
- порядок присоединения резкопеременной, несимметричной и нелинейной нагрузок, вызывающих соответственно колебания, несимметрию и несинусоидальность напряжения;
- порядок определения ущерба;
- правила возмещения ущерба пострадавшей стороны.

4.8.4. Виды ущерба по каждому показателю качества электроэнергии.

Несоответствие каждого ПКЭ, наблюдаемого в ЭС и создаваемого электроприёмниками может привести к ущербу у потребителя электроэнергии или смежных с ним потребителей, к которым напряжение с искажениями поступает через электрическую сеть. Наиболее распространёнными видами ущерба являются:

- недовыпуск и брак продукции;
- сокращение срока службы электрооборудования;
- дополнительные потери мощности и электроэнергии в ЭС и электроприёмниках;
- неблагоприятное воздействие на зрение человека;
- сбои работы и выход из строя оборудования, в том числе электронного оборудования с угрозой безопасности жизни, здоровья человека.

4.8.5. Ответственность виновников ухудшения показателей качества электроэнергии.

При выявлении показателей качества электроэнергии, не соответствующих [12], определяется виновник ухудшения ПКЭ.

В случае нарушения энергосбытовой и электросетевая организациями требований, предъявляемых к качеству электроэнергии, абонент вправе доказывать размер ущерба и взыскивать его с энергосбытовой организации по правилам ст. 547 ГК. Вместе с тем, учитывая, что абонент всё-таки использовал энергию ненадлежащего качества, он должен оплатить её, но по соразмерно уменьшенной цене (п.2. ст. 542 ГК).

В соответствии с требованиями [18] энергосбытовая организация обязана

реализовывать электрическую энергию гражданам определённым образом: ПКЭ должны соответствовать ГОСТ 13109–97, а электроснабжение электроэнергией должно быть бесперебойным и надёжным.

Очевидно, что нарушения могут быть взаимными и по разным ПКЭ.

В договоре на электроснабжение между энергосбытовой, электросетевой, организациями и потребителем должны быть отражены вопросы взаимной ответственности.

5. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

5.1. Термины и определения

Каждый элемент СЭС должен обеспечивать бесперебойное (надёжное) электроснабжение электроприёмников. Надёжность электроснабжения – сложное, комплексное свойство, обладающее единичными свойствами или их сочетанием [21, 22, 23].

В надёжности технических систем можно выделить основные понятия, относящиеся, например, к объектам, свойствам, состоянию, событиям, процессами.

Объекты:

Объект – предмет определённого назначения, который рассматривается с точки зрения *анализа надёжности*.

Объектами анализа могут быть элементы технических устройств, электрооборудование, электроустановки, система электроснабжения, технологические установки, независимые источники питания, электроприёмники, потребители электроэнергии.

Элемент – объект, надёжность которого изучается независимо от надёжности составляющих его частей.

Электрооборудование – промышленные изделия, предназначенные для производства, передачи и распределения электроэнергии, её преобразования и использования, а также для обеспечения собственных нужд, контроля показателей и учёта электроэнергии и т. д. К электрооборудованию относятся электрические машины (генераторы и электродвигатели), аппараты (коммутационные, защитные, управления), приборы (контрольно-измерительные, учёта) и т. д.

Электрическая машина – электротехническое устройство, имеющее подвижные (вращающиеся) части.

Электрический аппарат – электротехническое устройство, предназначенное для управления потоком электроэнергии и защиты от аварийных и ненормальных режимов работы.

Электрический прибор – электротехническое устройство, являющееся средством измерения электрических параметров в системе электроснабжения и для учёта электроэнергии.

Техническая система – совокупность совместно функционирующих элементов, объединённых для выполнения общей задачи.

Система электроснабжения – объединённая общим производственным процессом совокупность электротехнических устройств, электроустановок, электрических сетей и устройств резервирования для обеспечения электроэнергией технологических установок.

Система электропотребления представляет собой совокупность электроприёмников рабочих механизмов (установок) участка, цеха, предприятия присоединённых с помощью электрических сетей к общему пункту электропитания.

Электроустановка – взаимосвязанное сочетание *полного комплекта* электрооборудования, устройств (например, заземляющие устройства), сопутствующих конструкций, сооружений (ограждения, порталы и прочее), помещений (электропомещения) необходимых для выполнения своего *функционального назначения*:

- производства;
- преобразования;
- преобразования и распределения;
- передачи (от п/ст);
- распределения;
- распределения и потребления на стороне низкого напряжения;
- потребления электроэнергии (имеется в виду стационарно установленные электроприёмники)

и имеющих границы, определяемые отведённым *пространством* (площадью, зданием) или *юридическим документом* (актом разграничения балансовой принадлежности, договором на обслуживание).

Электроприёмник – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электроэнергии в другие её виды (механическую, тепловую, световую, химическую).

Потребитель электроэнергии – один или группа электроприёмников, объединённых между собой технологическим процессом или территориально.

Электрооборудование – любое оборудование, предназначенное для выполнения электроустановкой своего функционального назначения.

К электрооборудованию относятся электрические машины (генераторы и электродвигатели), аппараты (коммутационные, управления), приборы (контрольно-измерительные, учёта) и т. д.

Электрическая сеть – в *общем* случае это взаимосвязанная совокупность электроустановок для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, линий электропередачи, работающих на определённой территории.

В *частном* случае это взаимосвязанная совокупность электроустановок для передачи электроэнергии, состоящая из линий электропередачи, работающих на определённой территории или площади.

Технологической установкой называется установка, выполняющая технологическую операцию.

Источник питания – часть электроэнергетической системы или системы

электроснабжения, к которой подсоединена питающей линией потребитель или электроприёмники.

Независимый источник питания – источник питания, на котором напряжение сохраняется при исчезновении его на других источниках питания.

В СЭС за источник питания принимаются выводы генераторов и трансформаторов, шины распределительных устройств.

К числу независимых источников питания относятся распределительные устройства двух электростанций или подстанций, а также секции сборных шин электростанции или подстанции при одновременном соблюдении следующих условий:

- каждая из секций, в свою очередь, имеет питание от независимого источника;
- секции не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключаемую при нарушении нормальной работы одной из секций.

Взаиморезервируемые источники питания – источники питания, которые при отказе одного из них обеспечивают требуемую пропускную способность без ограничения в подаче электроэнергии. Если указанное выше условие не соблюдается, то источники питания не могут рассматриваться как взаиморезервируемые.

Кратность резервирования – отношение разности всех элементов схемы объекта и необходимых для нормального функционирования к числу элементов схемы объекта необходимых для нормального функционирования.

Схема электрических соединений СЭС – схематическое представление связей между источниками питания и пунктами преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

Свойства объектов:

Надёжность объекта – способность объекта выполнять заданные функции в определённом объёме при нормальных условиях эксплуатации [21, 22].

В качестве заданных функций системы электроснабжения понимается *бесперебойное* электроснабжение потребителей электроэнергии необходимого *качества* и в необходимом *количестве*.

Безотказность – способность объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки.

Долговечность – способность объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе техобслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – приспособленность объекта к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – способность объекта сохранять в заданных пределах значение параметров после транспортирования и (или) хранения, а также в течение хранения.

Надёжность электроснабжения – способность системы электроснабжения в части обеспечения электроэнергией электроприёмников (потребителей)

нормированного качества и бесперебойного обеспечения электроэнергией в необходимом количестве.

Бесперебойность по минимуму обеспечения необходимых условий – способность системы электроснабжения в части обеспечения необходимого количества источников питания и времени восстановления питания.

Бесперебойность по максимуму обеспечения необходимых условий – способность системы электроснабжения в части обеспечения электроэнергией электроприёмников (потребителей) в необходимом количестве.

Функция реакции – способность системы электроснабжения реагировать на изменение параметров в системе в зависимости от их значения и продолжительности.

Надёжность системы электроснабжения характеризуется также и такими свойствами, как устойчивость, режимная управляемость и безопасность.

Устойчивость – способность противодействовать различным воздействиям внешней среды и явлениям, протекающим в системе (устойчивость к механическим воздействиям, к токам короткого замыкания и т. д.).

Режимная управляемость – приспособленность системы к управлению, обеспечивающему нормальный режим работы.

Живучесть – способность объекта:

- противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений;
- при нормальной эксплуатации;
- сохранять ограниченную работоспособность:
 - при непредусмотренных условиями эксплуатации воздействиях;
 - наличии дефектов или повреждений определённого вида;
 - отказе некоторых элементов.

Безопасность – способность объекта в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни, здоровья людей и окружающей среды.

Состояния объектов:

Рабочее состояние – состояние, при котором объект применяется по назначению.

Нерабочее состояние – состояние, при котором объект не применяется по назначению. Например, при отключении или выводе в ремонт.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативной и технической документацией.

Неисправное состояние – состояние, при котором объект не соответствует хотя бы одному из установленных требований нормативной и технической документацией.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующие способность выполнять заданные функции, соответствует всем установленным требованиям определяемым нормативной и технической документацией.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором

значения хотя бы одного параметра, характеризующие способность выполнять заданные функции, не соответствует установленным требованиям, определяемым нормативной и технической документацией.

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

События:

Отказ – событие, при котором нарушается работоспособное состояние объекта.

Повреждение – событие, при котором нарушается исправное состояние при сохранении работоспособного состояния объекта.

Термин употребляется применительно к объектам, находящимся в рабочем состоянии. Если объект находится в нерабочем состоянии, то применяется термин «дефект».

Временные понятия:

Наработка – продолжительность работы объекта или количество операций, характеризующих функционирование объекта.

Примечание. Нарботка может принимать непрерывные значения (продолжительность работы в часах), так и целочисленные значения (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Время восстановления – продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта.

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

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

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

Примечание. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативной и технической документацией на объект.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Примечание. Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения

Процессы:

Отключение – перевод объекта из рабочего состояния в нерабочее.

Преднамеренное отключение – отключение, намеченное и выполненное обслуживающим персоналом.

Оперативное переключение – изменение схемы или режима работы объекта, выполняемое оперативным персоналом.

Восстановление – событие, заключающееся в переводе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное.

Обслуживание – совокупность мер, предпринимаемых для сохранения или восстановления работоспособности объекта.

Ремонт – совокупность мер, предпринимаемых с целью восстановления работоспособного состояния объекта.

Включение – перевод объекта из нерабочего состояния в рабочее.

Старение – процесс постепенного изменения физико-химических свойств объекта, под влиянием факторов, независимых от режима работы объекта.

Износ – процесс постепенного изменения физико-химических свойств объекта под влиянием факторов, зависящих от режима работы объекта.

5.2. Требования к надёжности систем электроснабжения

5.2.1. *Требования к надёжности систем электроснабжения основных нормативных документов.*

В соответствии с требованиями ПУЭ в отношении обеспечения надёжности электроснабжения электроприёмники разделяются на следующие три категории.

Электроприёмники I категории – электроприёмники, 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.

Примером электроприёмников I категории на промышленных предприятиях являются электродвигатели питательных насосов котельных, аварийное освещение и т. д.

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

Примером электроприёмников *особой группы* I категории на предприятиях является системы охранной и пожарной сигнализации, система голосового оповещения и автоматические телефонные станции, система видеонаблюдения и т. д.

Электроприёмники II категории – электроприёмники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

Примером электроприёмников II категории на промышленных предприятиях являются электроприёмники цехов серийного производства продукции.

Электроприёмники III категории – все остальные электроприёмники, не подпадающие под определения I и II категорий.

Примером электроприёмников III категории на промышленных предприятиях являются электроприёмники цехов несерийного производства продукции, вспомогательных участков, склады неотчетливого назначения.

Электроприёмники I категории в нормальных режимах *должны*⁸ 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.

Как правило, время автоматического восстановления питания не превышает 1 с.

Для электроснабжения *особой группы* электроприёмников I категории *должно* предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

Перерыв электроснабжения *особой группы* электроприёмников I категории не допускается.

В качестве третьего независимого источника питания для *особой группы* электроприёмников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприёмников I категории *могут* быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем (в частности, шины генераторного напряжения), предназначенные для этих целей источники 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, путём установки взаимно резервирующих технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного останова технологического процесса, действующих при нарушении электроснабжения.

Электроснабжение электроприёмников I 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

⁸ Для обозначения обязательности выполнения требований ПУЭ применяются слова «должен», «следует», «необходимо» и производные от них.

Слово «рекомендуется» означает, что данное решение является одним из лучших, но не обязательным.

Слово «допускается» означает, что данное решение применяется в виде исключения как вынужденное (вследствие стеснённых условий, ограниченных ресурсов необходимого оборудования, материалов и т. п.).

Слово «может» означает, что данное решение является правомерным.

требования, определяемые особенностями технологического процесса.

Электроприёмники II категории в нормальных режимах *рекомендуется* обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Для электроприёмников II 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.

В аварийных случаях на стороне низшего напряжения допустимо использование временных перемычек шланговым проводом.

Как правило, время включения резервного питания и восстановления питания не превышает *нескольких часов* за исключением случаев приведённых ниже.

Допускается питание электроприёмников II категории по одной воздушной линии, в том числе с кабельной вставкой⁹, если обеспечена возможность проведения аварийного ремонта этой линии за время не более 24 ч. Кабельные вставки этой линии *должны* выполняться двумя кабелями, каждый из которых выбирается по наибольшему длительному току воздушной линии.

Допускается питание электроприёмников II категории по одной кабельной линии, состоящей не менее чем из двух кабелей, присоединённых к одному общему аппарату.

При наличии централизованного резерва трансформаторов и возможности замены повредившегося трансформатора за время не более 24 ч *допускается* питание электроприёмников II категории от одного трансформатора.

Для электроприёмников III категории электроснабжение *может* выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены повреждённого элемента системы электроснабжения, не превышают 24 ч.

Замечание.

1. Для промышленных потребителей в ПУЭ дано только общее определение категорий электроприёмников. Конкретная классификация с отнесением электроприёмников к той или иной категории по надёжности электроснабжения, содержится в общестроительных правилах и нормах отдельных отраслей промышленности. При отсутствии такой классификации категорирование следует производить, учитывая технологический процесс потребителя и последствия из-за возможного нарушения его электроснабжения.

2. Своеобразный «качественный» подход ПУЭ к решению вопросов надёжности без использования формализации процессов возникновения отказов в СЭС обусловлен сложностью и многообразием факторов, влияющих на надёжность электроснабжения. Кроме этого, отсутствуют утверждённые исходные данные для расчёта.

⁹ Кабельная вставка представляет собой небольшую по длине кабельную линию (обычно не превышающую 50 м) и необходимую для прохождения труднодоступного при обслуживании ВЛ участка местности или технически сложно реализуемого участка ВЛ. Например, при переходе ВЛ с номинальным напряжением $U_n = (6 - 10)$ кВ от п/ст расположенной с одной стороны дороги на другую сторону с помощью кабельной вставки и последующем выполнении воздушной линией

5.2.2. Некоторые особенности распространения требований основных нормативных документов к надёжности систем электроснабжения.

С целью выяснения специфических особенностей требований основных нормативных документов к надёжности систем электроснабжения необходимо напомнить определение надёжности электроснабжения.

Надёжность электроснабжения – способность системы электроснабжения в части обеспечения электроэнергией электроприёмников (потребителей) нормированного качества и бесперебойного обеспечения электроэнергией в необходимом количестве.

Следует особо отметить, что в понятие надёжности включают не только количественные показатели подаваемой электроэнергии, но также её *качественные* характеристики, имея в виду обеспечение требуемого уровня показателей качества электроэнергии. Подход, когда наряду с количественными характеристиками поставляемой электроэнергии должны рассматриваться и качественные характеристики поставляемой электроэнергии, обусловлен необходимостью учёта, например, такой характеристики долговечности, как ресурс.

Подход, заключающийся в одновременном учёте количественных и качественных характеристик поставляемой электроэнергии, значительно расширяет проблему надёжности. Если рассмотреть технические мероприятия, обеспечивающие количественные и качественные характеристики поставляемой электроэнергии, то можно утверждать, что решение вопросов, связанных с обеспечением этих характеристик, может производиться в подавляющем числе случаев независимо друг от друга. При этом имеется в виду, что средства, обеспечивающие количественные показатели подаваемой электроэнергии, являются основными элементами (линии, трансформаторы) системы электроснабжения. Эти элементы определяют технико-экономические показатели системы при её оптимизации.

Между тем средства, обеспечивающие качественные характеристики электроэнергии не являются основными элементами системы электроснабжения. Если в первом случае в результате учёта необходимой степени резервирования электроснабжения определяется глобальный оптимум системы, то во втором случае речь идёт о решении частной задачи, например о выборе рационального способа регулирования напряжения при заданных оптимальных параметрах системы электроснабжения.

В связи с тем, что вопросы качества электроэнергии рассмотрены ранее, то в дальнейшем, будут рассмотрены вопросы обеспечения потребителей (электроприёмников) необходимым *количеством* электроэнергии в соответствии с заданным графиком её потребления. То есть основное внимание будет сосредоточено на рациональной степени *бесперебойности* электроснабжения.

Требуемый уровень надёжности электроснабжения промышленных потребителей определяется особенностями их технологического процесса. При этом и случае технико-экономической оценки надёжности следует учитывать условия резервирования в технологической части предприятий, т. е. рассматривать систему электроснабжения и технологический процесс как единое целое.

Однако методика такого рода расчётов не разработана и вряд ли она

будет касаться вышестоящих ступеней систем электроснабжения, предназначенных для питания совокупности потребителей.

При решении поставленной проблемы возможны два подхода:

- расчёт надёжности на основе натуральных показателей;
- оптимизация надёжности с использованием стоимостных характеристик, путём сопоставления затрат на надёжность с предотвращением ущерба, возникающего из-за перерывов электроснабжения.

Следует подчеркнуть, что регламентированная методика расчёта надёжности, как на основе натуральных показателей, так и с использованием стоимостных характеристик, невзирая на многообразие опубликованных работ, до настоящего времени отсутствует. Кроме того, отсутствуют утверждённые в установленном порядке данные для расчёта показателей надёжности.

По этой причине при проектировании систем электроснабжения следует использовать соответствующие рекомендации ПУЭ и других нормативных документов.

Согласно ПУЭ, выбор надёжности электроснабжения регламентируется применительно к электроприёмникам потребителей. При этом под потребителем понимается предприятие или организация, имеющие комплекс электроприёмников, в то время как электроприёмником называется электрооборудование (электродвигатель, преобразователь, светильники и т. п.), потребляющее или преобразовывающее электроэнергию.

Все виды электроприёмников по надёжности их электроснабжения делятся ПУЭ на три категории. При создании системы электроснабжения конкретного потребителя, питание каждой группы электроприёмников должно рассматриваться самостоятельно. Учитывая многообразие электроприёмников, классификация их в ПУЭ не может не носить общего характера. Последнее порождает определённые затруднения при установлении категорий некоторых электроприёмников. Основным условием рационального решения вопросов электроснабжения потребителей является подробное знание технологии производственного процесса потребителей, а также последствий нарушения питания отдельных электроприёмников и потребителей в целом.

ПУЭ регламентирует обеспечение бесперебойности электроснабжения электроприёмников (потребителей) электроэнергией за счёт:

- наличия взаимного резервирования и, прежде всего, источников питания;
- нормирования времени восстановления питания.

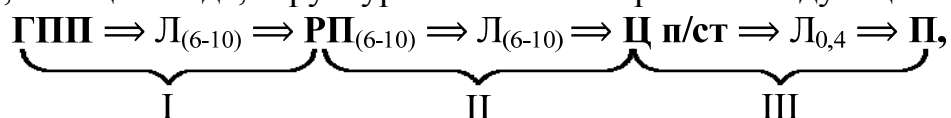
Такую бесперебойность электроснабжения условно можно назвать бесперебойностью по *минимуму* необходимых условий. В качестве условий обеспечения бесперебойности по *минимуму* электроснабжения достаточно выполнить требования по резервированию источников питания и не превышения времени восстановления питания любого элемента схемы электроснабжения от главной понизительной подстанции до границы балансовой принадлежности или электроприёмников.

Оценку бесперебойности электроснабжения с учётом обеспечения необходимым *количеством* электроэнергии условно можно назвать бесперебойностью по *максимуму* необходимых условий. В этом случае необходимо знание

значения среднего времени восстановления системы и показатель, определяющий среднюю частоту нарушения электроснабжения.

Необходимо остановиться на некоторых особенностях надёжного электроснабжения и выбора схемы электроснабжения.

Схему электроснабжения промышленного предприятия, представленную на рис. 1.1, в общем виде, структурно можно изобразить следующим образом



где ГПП – главная понизительная подстанция; РП₍₆₋₁₀₎ – распределительный пункт (6 – 10) кВ для питания цеховых п/ст; Ц п/ст – цеховые п/ст (6 – 10)/0,4 кВ; П – электроприёмники; Л₍₆₋₁₀₎, Л_{0,4} – питающие и распределительные линии (6 – 10) кВ и 0,4 кВ; I, II, III – ступени системы электроснабжения.

Источником питания электроприёмников П является цеховые п/ст (6 – 10)/0,4 кВ.

Источником питания потребителя на II-й ступени является распределительный пункт РП (6 – 10) кВ.

Источником питания потребителя на I-й ступени является главная понизительная подстанция ГПП.

В свою очередь ГПП должна иметь источники питания соответствующие требованиям надёжности электроснабжения всех потребителей запитанных от неё.

Из структурной схемы следует, что электроприёмники П находятся на III ступени системы электроснабжения и замыкают структурную цепь. Источником питания электроприёмников являются либо исключительно цеховые п/ст, либо цеховые п/ст и другие независимые взаимно резервирующие источники питания в зависимости от категории надёжности электроснабжения.

Определяющим фактором, влияющим на выбор распределительной сети, является удельный вес электроприёмников разных категорий.

На современных промышленных предприятиях даже на III ступени встречаются электроприёмники разных категорий. Особое внимание следует уделять электроприёмникам I категории, к источникам питания которых предъявляются наиболее жёсткие требования. Электроснабжение электроприёмников должно сохраняться при повреждении любого элемента системы, включая выход из работы одного из источников питания. Необходимо дублирование всех элементов, начиная от ввода к электроприёмнику П и до источников питания.

В случае наличия электроприёмников разных категорий их разделение может быть затруднено. Электроприёмники II-й и III-й категорий в этом случае могут обеспечиваться электроэнергией наряду с электроприёмниками I категории от двух источников питания.

Для электроприёмников II категории, согласно ПУЭ, предусматривается резервное питание, автоматический ввод которого не является обязательным. Между тем известно, что основная часть затрат при сооружении резервного питания потребителей определяется стоимостью осуществления основных ре-

зервных элементов: линий, трансформаторов и т. д. Затраты на создание автоматических устройств для ввода резервного питания, как правило, незначительны. Поэтому представляется целесообразным использовать такие устройства в системах электроснабжения электроприёмников II категории во всех случаях, если применение этих устройств не требует дополнительных резервных элементов в системе электроснабжения, по сравнению с использованием ручного ввода резервного питания. Последнее значительно увеличивает надёжность электроснабжения потребителей.

При создании системы электроснабжения и рассмотрении условий резервирования на I-й и II-й ступенях системы, следует различать отдельный электроприёмник и совокупность электроприёмников одной категории. Это обстоятельство касается электроприёмников III категории, так как при их большом объёме и значительной мощности в составе рассматриваемого потребителя они в ряде случаев могут относиться по надёжности электроснабжения к электроприёмникам II категории¹⁰. При этом имеется в виду, что совокупность электроприёмников требует более высокой надёжности электроснабжения, так как перерывы в их питании будут равным образом связаны с массовым недоотпуском продукции, простоем рабочих и другими признаками, характеризующими электроприёмники II категории.

5.2.3. Факторы, влияющие на надёжность электрооборудования и систем электроснабжения.

Всё выше отмеченное относится к этапу проектирования электроустановок и системы электроснабжения в целом. Опыт эксплуатации показывает, что надёжность зависит от многочисленных и разнообразных факторов. Условно они могут быть разделены на три основные группы: конструктивные, производственные, эксплуатационные.

Конструктивные факторы обусловлены установкой в устройство малонадёжных элементов; недостатками схемных и конструктивных решений, принятых при проектировании; применением комплектующих элементов, не отвечающих условиям окружающей среды.

Производственные факторы обусловлены нарушениями технологических процессов, загрязнённостью окружающего воздуха, рабочих мест и приспособлений, слабым контролем качества изготовления и монтажа, отсутствие достаточного складского резерва электрооборудования и др.

При изготовлении и монтаже электрооборудования, электроустановок большое влияние на их надёжность оказывают процессы хранения и транспортировки, во время которых они часто повреждаются.

Наибольшее влияние на надёжность электротехнических устройств оказывают *условия эксплуатации*. Удары, вибрация, перегрузки, температура, влажность, солнечная радиация, песок, пыль, плесень, коррозирующие жидкости и газы, электрические и магнитные поля – все влияет на работу устройств. Поэтому особенно важно, чтобы обслуживающий персонал хорошо знал уро-

¹⁰ Здесь налицо переход количественных изменений в качественные изменения

вень, продолжительность, характер воздействия каждого из перечисленных выше факторов и степень их влияния на надёжность работы электрооборудования. Это особенно важно, поскольку различные условия эксплуатации по-разному могут сказываться на сроке службы и надёжности работы электрооборудования.

Ударно-вибрационные нагрузки значительно снижают надёжность электрооборудования в целом, их отдельных узлов и деталей. Воздействие ударно-вибрационных нагрузок может в ряде случаев быть значительно сильнее воздействия других механических, а также электрических и тепловых нагрузок. В результате длительного знакопеременного воздействия даже небольших ударно-вибрационных нагрузок происходит накопление усталости в материале элементов, что приводит к отказам, обычно внезапным. Под воздействием вибраций и ударов возникают многочисленные механические повреждения элементов конструкции, ослабевают крепления элементов и нарушаются контакты электрических соединений.

Нагрузки при циклических режимах работы, связанных с частыми включениями и выключениями электрооборудования, так же как и ударно-вибрационные нагрузки, способствуют возникновению и развитию признаков усталости материала элементов. Опыт показывает, что частые включения и выключения устройств приводят к довольно частым отказам их элементов. Физическая природа повышения опасности отказов устройств при их включении и выключении заключается в том, что во время переходных процессов в их элементах возникают сверхтоки и перенапряжения, значение которых часто намного превосходит, хотя и кратковременно, значения, допустимые по нормативной и технической документации.

Электрические и механические перегрузки. Очень часто электрооборудованию приходится работать в режиме перегрузок. Причиной перегрузок может служить неисправность рабочих механизмов, значительные изменения частоты или напряжения питающей сети, загустение смазки рабочих механизмов в холодную погоду, превышение номинальной расчётной температуры окружающей среды в отдельные периоды года и дня, высокая загрузка в моменты форсирования производственного процесса и т. д. Перегрузки приводят к повышению температуры нагрева изоляции электрооборудования выше допустимой и резкому снижению срока её службы.

Климатические воздействия. Существенное влияние на надёжность любого электрооборудования оказывает окружающая среда. Больше всего на надёжность работы устройств влияют низкая и высокая температура, большая влажность.

При низких температурах снижается ударная вязкость металлических деталей электротехнических устройств; меняются значения технических параметров таких элементов, как конденсаторы, реакторы, резисторы; происходит «залипание» контактов реле; разрушается резина. Благодаря замерзанию или загустению смазочных материалов затрудняется работа переключателей, ручек управления и т. д.

Высокие температуры также вызывают механические и электрические

повреждения элементов электрооборудования, ускоряя износ и старение. Влияние повышенной температуры на надёжность работы электрооборудования проявляется в самых разнообразных формах. Так, в жару портятся изоляционные материалы, уменьшается сопротивление изоляции, а значит, увеличивается опасность электрических пробоев, нарушается герметичность (начинают вытекать заливочные и пропиточные компаунды). В результате нарушения изоляции в обмотках электромагнитов, электродвигателей и трансформаторов возникают повреждения. Заметное влияние оказывает повышенная температура на работу механических элементов электрооборудования.

Большое воздействие на надёжность элементов электроустановок оказывает влажность. Под влиянием влаги происходит очень быстрая коррозия металлических деталей электротехнических устройств. Изоляционные материалы устройств поглощают влагу, в результате чего уменьшается поверхностное и объёмное сопротивление. Появляются различные утечки, резко увеличивается опасность поверхностных пробоев. Большая влажность вызывает также рост грибковой плесени, под воздействием которой поверхность материалов разъедается, и электрические свойства устройств ухудшаются.

Воздействие пыли. На надёжность электрооборудования влияет пыль, представляющая собой обычно мелкие частицы. Эти частицы попадают в смазку, оседают на частях и механизмах электрооборудования и вызывают быстрый износ трущихся частей и загрязнение изоляции. Пыль наиболее опасна для электродвигателей, в которые она попадает с засасываемым для вентиляции воздухом. Однако и в других элементах электрооборудования износ намного ускоряется, если пыль проникает сквозь уплотнения к поверхностям трения. Поэтому при большой запылённости особое значение приобретает качество уплотнений элементов электрических устройств и уход за ними.

Качество эксплуатации электротехнических устройств зависит от степени научной обоснованности применяемых методов эксплуатации и обслуживания, уровня подготовки обслуживающего персонала (знание материальной части, теории и практики надёжности, умение быстро находить и устранять неисправности и т. п.). Применение профилактических мероприятий (регламентные работы, визуальный контроль, испытания), ремонта, использование опыта эксплуатации электрооборудования и устройств обеспечивает их более высокую эксплуатационную надёжность.

5.3. Виды отказов

Работоспособность устройств, системы определяется совокупностью заданных параметров, характеристик и допустимыми пределами их изменений – допусками [21]. На рис. 5.1 показаны изменения параметра Π во времени и границы его изменения, при которых гарантируется работоспособность электрооборудования. Параметр Π может представлять собой характеристику напряжения, тока и т. д. Если изменяемый во времени параметр будет выходить за допустимые границы изменений, а его допуски будут превосходить установленные значения, наступает *повреждение* или *отказ*.

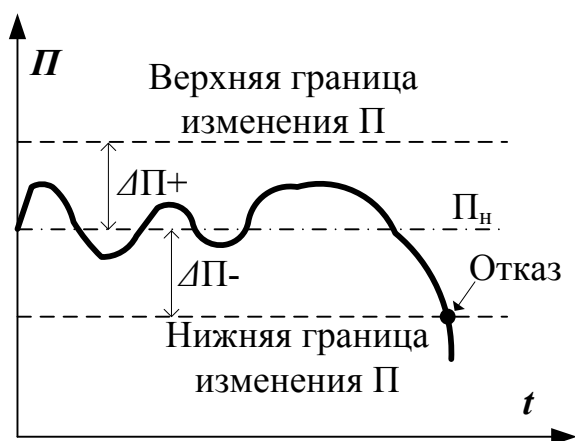


Рис.5.1. Изменение параметра Π во времени:

$(\Delta\Pi-)$, $(\Delta\Pi+)$ – допустимые отклонения показателя и соответственно отрицательный, положительный допуски показателя;
 Π_n – номинальное значение показателя

Отказы, возникающие в условиях эксплуатации, можно разделить на:

- полные и частичные (при частичных отказах электротехническое устройство теряет частично свою работоспособность);
- внезапные и постепенные (Постепенные отказы характеризуются постепенным изменением и выходом за заданную границу одного или нескольких параметров. При внезапных отказах изменение параметра протекает с большой скоростью);
- независимые и зависимые (зависимые отказы зависят от отказов других устройств);
- устойчивые и неустойчивые (сбои – самоустраняющиеся отказы, приводящие к кратковременному нарушению работоспособности).

В электрооборудовании, функционирующего не постоянно во времени, отказы могут быть следующих видов:

- отказ срабатывания;
- ложное срабатывание.

Примером таких устройств могут быть электрооборудование релейной защиты, выключатели, предохранители и т. п.

Отказы в СЭС с точки зрения их происхождения можно разделить на два класса – аппаратные и эксплуатационные. К аппаратным отказам относятся отказы, вызванные неполадками и повреждениями электрооборудования и устройств, входящих в СЭС. К эксплуатационным отказам относятся отказы, вызванные ошибочными или вынужденными действиями обслуживающего персонала.

К отказам аппаратного класса могут привести:

- ошибки, допущенные при разработке электротехнических устройств, выборе условий эксплуатации этих устройств;
- ошибки, допущенные при изготовлении, монтаже, ремонте электрооборудования;
- отказы, вызванные старением изоляции, износом оборудования;
- непредвиденные отказы (повреждение электрооборудования и устройств грозой, повреждение линий электропередачи транспортом).

К эксплуатационным отказам можно отнести:

- отказы, вызванные сложностью СЭС, схем релейных защит

и автоматики, структур управления;

- отказы, обусловленные недостаточной квалификацией обслуживающего персонала;
- отказы, вызванные воздействием механических и климатических факторов внешней среды, которые не должны были появиться в условиях эксплуатации.

Все отказы, какими бы причинами они не вызывались, носят случайный характер.

5.4. Характер и причины отказов и повреждений электротехнических устройств в системах электроснабжения

Для отдельного электрооборудования и устройств СЭС можно выделить следующие виды отказов.

Генераторы электростанций энергосистем и собственных электростанций предприятий. Генераторы являются источниками электроэнергии на электростанциях. Повреждения на генераторах, их отказ в функционировании сказывается на всех потребителях электроэнергии. Характерные отказы и повреждения на генераторах могут быть следующие:

- повреждения первичных двигателей;
- повреждения подшипников, систем охлаждения, нарушение центровки осей валов приводного двигателя и генератора;
- нарушения в работе устройств возбуждения, форсировки, синхронизации.

Трансформаторы. Трансформаторы устанавливаются на подстанциях электрических сетей энергосистем, главных подстанциях предприятий и на потребительских подстанциях. В связи с этим мощность и номинальные напряжения трансформаторов различны. Различны и ущербы от их простоя. Трансформаторы повреждаются довольно редко, однако их отказы приводят к перерыву в электроснабжении большого количества электроприёмников и потребителей. Восстановление работоспособности трансформаторов требует значительного времени.

Отказами трансформаторов являются:

- отключения, вызванные повреждениями обмоток (Причинами повреждения обмоток являются внешние перенапряжения в сети и короткие замыкания);
- отключения, вызванные повреждениями переключателей и регулировочных устройств, перекрытиями вводов (Переключатели, в основном, выходят из строя у трансформаторов с регулированием под нагрузкой. Вводы повреждаются, чаще всего, из-за перенапряжений в сети, механических повреждений изоляторов, некачественных контактных соединений);
- отключения, вызванные повреждениями смежных элементов;
- отключения, вызванные ложными действиями защиты и ошибками персонала.

Линии электропередачи. Они выполняются в виде воздушных

и кабельных линий на напряжение до 1000 В и выше 1000 В. Повреждения чаще наблюдаются в электрических линиях на напряжение до 1000 В, однако повреждения в линиях на напряжение выше 1000 В приводят к перерыву в электроснабжении большого количества потребителей. Наиболее распространёнными являются обрывы проводов воздушных линий и жил кабелей.

Воздушные линии электропередачи. На воздушных линиях электропередачи могут возникнуть как устойчивые повреждения (повреждения опор, проводов, изоляторов), так и неустойчивые (самоустраняющиеся). К самоустраняющимся повреждениям могут быть отнесены кратковременные касания проводов (от ветра, проезжающим автотранспортом). Перерыв в электроснабжении при этом, в результате автоматического отключения, может быть восстановлен путём успешного действия устройств автоматического повторного включения или оперативного ручного включения.

Повреждения воздушных линий могут быть связаны с грозовыми перекрытиями изоляции, гололёдными отложениями, ветровыми нагрузками, вибрацией и пляской проводов, ослаблением прочности деталей опор, возгоранием деревянных опор, внешними воздействиями на провода и опоры линий, деревянных опор, внешними воздействиями на провода и опоры линий, короткими замыканиями на линиях.

Возможны повреждения линий также и в нормальных условиях. Причинами таких повреждений могут быть:

- неправильный выбор проводов, опор, изоляторов при проектировании;
- скрытые дефекты при изготовлении деталей опор, проводов, изоляторов, линейной арматуры;
- нарушение правил монтажа и эксплуатации линий;
- токовые перегрузки на провода.

Все названные повреждения возможны как в системных сетях, так и в сетях предприятий.

Кабельные линии. Повреждения в кабельных линиях возникают в связи с старением межфазной и поясной изоляции, электролитической и химической коррозией, перегрузкой кабелей, нарушение изоляции грызунами. Наиболее часто возникают механические повреждения кабелей строительными машинами и механизмами при производстве строительных и ремонтных работ.

Повреждаемость кабельных линий зависит от способа прокладки кабелей (в земле, блоках, кабельных каналах, тоннелях, по строительным конструкциям), от возможности попадания влаги на кабели. Пробой изоляции чаще наблюдается в местах установки соединительных муфт, концевых воронок, чем на целых участках кабеля.

Коммутационные и защитные аппараты, аппараты управления и автоматики. Коммутационные и защитные аппараты делят на аппараты на напряжение выше 1000 В и до 1000 В. К аппаратам на напряжение выше 1000 В относятся выключатели, разъединители, отделители, короткозамыкатели, устанавливаемые в основном на трансформаторных подстанциях и пунктах распределения электроэнергии. К аппаратам на напряжение до 1000 В относятся автоматические и неавтоматические выключатели, разъединители.

Выключатели. Отказом выключателя является невыполнение им оперативных, защитных и противоаварийных функций, а также повреждения, при которых он должен быть выведен в ремонт. К ним относятся:

- невозможность отключения короткого замыкания в ячейке выключателя при оперативных коммутациях или в рабочем состоянии;
- невозможность отключения короткого замыкания в линии;
- невозможность автоматического или оперативного включения выключателя без короткого замыкания в ячейке или в линии;
- повреждения выключателя при отключении короткого замыкания;
- ложные отключения.

Отделители. Отказом отделителя является всякое случайное электрическое или механическое повреждение, приводящее к замыканию, а также невозможность отключения в бестоковую паузу.

Короткозамыкатели. Отказами короткозамыкателя могут быть короткие замыкания из-за самопроизвольного или ложного включения, а также невозможность включения короткозамыкателя при переключениях.

Разъединители. Отказом разъединителя является случайное механическое или электрическое повреждение, приводящее к короткому замыканию или невозможности отключения его без нагрузки.

Автоматические выключатели на напряжение до 1000 В. Отказы автоматических выключателей связаны с неотключением коротких замыканий и перегрузок на линиях, в распределительных устройствах, в электроприёмниках. Также имеют место отказы, связанные с неотключением при снижении напряжения до недопустимого значения. Эти отказы зависят от работы соответствующих расцепителей. К отказам приводят ложные срабатывания расцепителей. Большое количество отказов связано с механическими устройствами выключателей и контактной системой. Отказы в дугогасительных системах выключателей могут привести к возникновению пожаров.

Аппараты управления (контакторы, магнитные пускатели). Отказы аппаратов управления приводят к перерыву в электроснабжении отдельных электроприёмников. Отказы наблюдаются при включении и отключении электроприёмников. Причинами отказов могут быть повреждения в контактной системе контактора или кнопочного выключателя (поста управления), некачественная сборка и регулировка контактной системы, обрывы в цепи управления электромагнитом или некачественная регулировка фиксирующего устройства в контакторах с защёлкой.

Предохранители. Предохранители применяются в электроустановках на напряжения до 1000 В и выше 1000 В. К отказам предохранителей относятся их повреждения, неселективные и ложные срабатывания.

Электрооборудование релейной защиты и автоматики. Отказами устройств релейной защиты и автоматики являются отказы в срабатывании, ложные срабатывания и срабатывания при несоответствии командного импульса. Причинами этих отказов являются повреждения элементов устройств автоматики, разрегулировка контактной системы контактных реле, образование на их

поверхности непроводящих плёнок из-за коррозии, загрязнения и эрозии, некачественная пайка. Причинами ложных срабатываний могут быть воздействия ударных и вибрационных нагрузок.

Электроприёмники. К простому технологического оборудования приводят также повреждения электроприёмников, часто входящих в состав самого технологического оборудования.

Электродвигатели. Наибольшая часть отказов электродвигателей происходит из-за повреждений обмоток статора, связанными с обрывами обмоток, межвитковыми и межфазными замыканиями в обмотках, замыканиями обмоток на корпус. Для короткозамкнутого ротора характерными повреждениями являются термическое разрушение алюминиевой обмотки. Для ротора с фазной обмоткой – обрыв обмотки, межвитковые и межфазные замыкания. У электродвигателей любой конструкции ротора наблюдаются затирания ротора о статор из-за износа подшипников и нарушения центровки осей ротора и статора, одностороннего магнитного притяжения, недопустимого прогиба вала ротора (для двигателей большой мощности).

Сварочные трансформаторы. Отказами у сварочных трансформаторов являются межвитковые замыкания, приводящие к обрыву и термическому разрушению обмотки, повреждения устройств регулирования сварочного тока. Наиболее часто эти повреждения появляются у трансформаторов, работающих на открытом воздухе, в условиях атмосферных осадков (на строительных площадках).

Светильники. Отказами светильников может быть выход из строя электрических ламп, нарушение контакта между цоколем лампы и светильника, обрыв монтажных проводников, повреждения цоколя и дросселя (в светильниках с люминесцентными лампами).

Последствия различных видов отказов не одинаковы, что можно увидеть на примере, приведённом на рис. 5.2.

При коротком замыкании в ячейке выключателя Q1 происходит отключение выключателя Q и перерыв в электроснабжении не только группы электроприёмников П1, но и П2. При отказах выключателя Q1, не приводящих к короткому замыканию в ячейке, электроснабжение для группы электроприёмников П2 не прерывается.

5.5. Основные показатели надёжности и их расчёт

5.5.1. Основные показатели надёжности систем электроснабжения.

Надёжность СЭС может быть охарактеризована рядом показателей [22], среди которых можно выделить:

- среднее время восстановления $T_{\text{в}}$;
- вероятность безотказной работы $P_{(t)}$;
- частоту отказов $a_{(t)}$;
- параметр потока отказов $\omega_{(t)}$;
- интенсивность отказов $\lambda_{(t)}$;

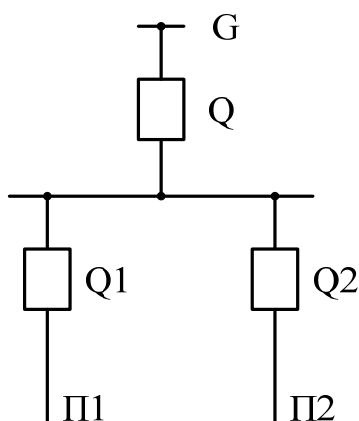


Рис. 5.2. Участок распределительной сети:

Q, Q1, Q2 – выключатель;
П1, П2 – приёмник (группа приёмников)

- наработку на отказ T_0 ;
- среднюю наработку до отказа $T_{0.ср}$;
- коэффициент готовности K_g ;
- коэффициент вынужденного простоя (восстановления) K_b ;
- коэффициент ремонтного режима K_p ;
- коэффициент технического использования $K_{ти}$;
- средний ресурс, T_p ;
- средний срок службы, T_c .

Показатели надёжности являются мерой оценки надёжности системы или отдельных её элементов.

Вероятность безотказной работы $P_{(t)}$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени от 0 до t или в пределах заданной наработки отказ элементов СЭС не произойдёт.

Вероятность безотказной работы оценивается выражением

$$P_{(t)} = N_{(t)}/N = [N - n_{(t)}]/N,$$

где N – количество элементов системы в начале испытаний; $N_{(t)}$ – число оставшихся в работе элементов за время t ; $n_{(t)}$ – число отказавших элементов за время t .

Вероятность отказа $Q_{(t)}$ – вероятность того, что при определённых условиях эксплуатации в заданном интервале времени от 0 до t произойдёт хотя бы один отказ.

Вероятность отказа оценивается выражением $Q_{(t)} = n_{(t)}/N$.

В связи с тем, что отказ и безотказная работа являются событиями противоположными, можно записать $P_{(t)} + Q_{(t)} = 1$.

Пример 5.5.1. Из 1000 силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации в сетях с одинаковым номинальным напряжением в течение одного года отказали 15. Определим вероятность безотказной работы трансформаторов и вероятность возникновения отказов в них.

Условия примера: $N = 1000$, $n_{(t)} = 15$, $N_{(t)} = 1000 - 15 = 985$, $t = 1$.

Решение: $P_{(1)} = (1000 - 15)/1000 = 0,985$; $Q_{(1)} = 15/1000$.

Средняя частота отказов $a_{(t)}$ – это отношение числа отказавших элементов электрооборудования к первоначальному числу за период наблюдения

$a = n/N$, где n – число отказавших элементов, приведших к отказу электрооборудования; N – первоначальное число наблюдаемых элементов.

Интенсивность отказов $\lambda_{(t)}$ – среднее число отказов, наблюдавшихся у однотипных устройств в единицу времени $\lambda_{(t)} = n_{(\Delta t)}/(N \cdot \Delta t)$, где $n_{(\Delta t)}$ – число устройств, отказавших за время Δt ; N – число наблюдаемых устройств; Δt – период наблюдения.

Пример 5.5.2. В условиях эксплуатации на предприятиях одного промышленного района, в течение 10 лет находились под наблюдением 100 трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций. За это время зафиксированы отказы 5 различных трансформаторов. Определим интенсивность отказов цеховых трансформаторов.

Условия примера: $N = 100$ шт., $n_{(\Delta t)} = 5$, $\Delta t = 10$ лет.

Решение: $\lambda = 5/(100 \cdot 10) = 0,005$ [год⁻¹].

Важным понятием при определении соотношения между показателями надёжности является понятие *потока событий* – последовательность событий, происходящие одно за другим в какие-то моменты времени. Далее будут рассмотрены так называемые стационарные пуассоновские потоки.

Для стационарного пуассоновского потока вероятность появления k отказов элемента за период времени t при параметре интенсивности отказов $\lambda = \text{const}$ подчиняется закону распределения Пуассона:

$$Q_k = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}.$$

Вероятность безотказной работы элемента, т. е. вероятность того, что не произойдет ни одного отказа ($k = 0$), составляет:

$$P_{(t)} = \frac{(\lambda t)^0 e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t},$$

где λ – средняя постоянная интенсивности внезапных отказов; t – время работы электрооборудования в годах.

Вероятность возникновения отказа за период времени t можно определить из выражения

$$Q_{(t)} = 1 - e^{-\lambda t}.$$

На рис. 5.3 показаны кривые изменения функций $P_{(t)}$ и $Q_{(t)}$ во времени.

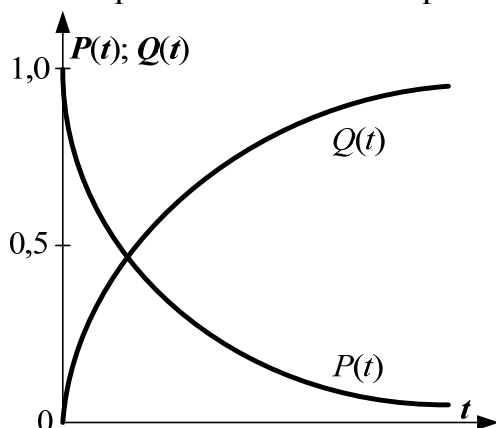


Рис. 5.3. Кривые вероятности безотказной работы $P_{(t)}$ и вероятности отказа $Q_{(t)}$

Надёжность элементов системы под воздействием различных факторов (старение изоляции, выявление скрытых дефектов, износ и т. д.) с течением

времени изменяется, то есть изменяется интенсивность отказов.

На рис. 5.4 показан характерный вид функции $\lambda_{(t)}$, где можно выделить три характерные зоны изменения $\lambda_{(t)}$:

1 – период приработки, когда выявляются скрытые дефекты.

2 – период нормальной эксплуатации. В этом периоде можно принять $\lambda_{(t)} = \lambda = const$;

3 – период интенсивного износа.

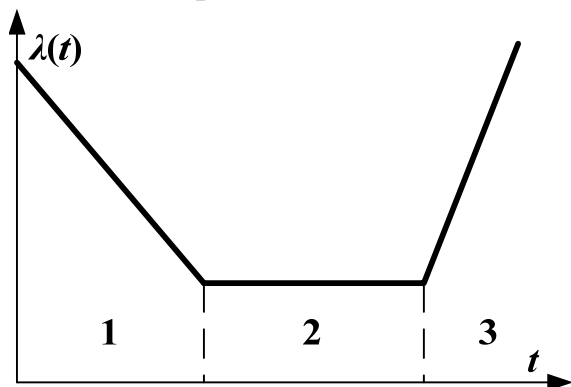


Рис. 5.4. Изменение интенсивности отказов $\lambda_{(t)}$ во времени:

1 – этап приработки; 2 – этап нормальной эксплуатации ($\lambda_{(t)} = const$);

3 – этап интенсивного износа

Оценка надёжности СЭС производится, как правило, для периода нормальной эксплуатации, поэтому принимается $\lambda_{(t)} = \lambda$.

Важным показателем надёжности является средняя наработка до отказа $T_{o.ср}$. Средняя наработка до отказа есть математическое ожидание продолжительности безотказной работы неремонтируемого электрооборудования до первого отказа

$$T_{o.ср} = \int_0^{\infty} P_{(t)} dt.$$

По известным сведениям об отказах среднюю наработку до отказа можно определить по выражению

$$T_{o.ср} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{o.i}}{n} \quad \text{или} \quad T_{o.i} = \frac{1}{\lambda_i},$$

где $T_{o.i}$ – продолжительность безотказной работы i -го элемента электрооборудования (системы); n – число испытываемых элементов; λ_i – интенсивности отказов i -го элемента электрооборудования (системы).

Наработка до отказа измеряется временем, числом циклов или переключений.

Вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказа, средняя наработка до отказа – основные показатели, характеризующие безотказность неремонтируемого электрооборудования.

Для оценки безотказности восстанавливаемого электрооборудования используется наработка на отказ и поток отказов.

Наработка на отказ – среднее значение продолжительности безотказной работы между соседними отказами

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{m},$$

где T_i – продолжительность безотказной работы элемента между $(i-1)$ и i -м

отказами; m – число отказов за время t .

Поток отказов $\omega_{(t)}$ электрооборудования – это среднее количество отказов восстанавливаемого электрооборудования в единицу времени за рассматриваемый период времени при условии замены отказавших изделий новыми

$$\omega_{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{i(\Delta t)}}{N \cdot \Delta t},$$

где $m_{i(\Delta t)}$ – число отказов i -го электрооборудования за момент времени $\Delta t < t$; N – число устройств, находящихся на испытании; Δt – рассматриваемый период времени.

Если вероятность совмещения двух и более событий в один и тот же момент времени фактически невозможен, что является характерным для большинства элементов СЭС, а поток событий можно считать стационарным, то принимают $\omega = \lambda$.

Среди показателей долговечности следует отметить средний ресурс и срок службы электрооборудования.

Средний ресурс электрооборудования T_p – наработка электрооборудования от начала эксплуатации или её возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Срок службы T_c – календарная продолжительность эксплуатации электрооборудования от начала работы или её возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Наиболее широко применяемым показателем ремонтпригодности электрооборудования, используемого в СЭС, является *среднее время восстановления* T_v . Это среднее время простоя электрооборудования, связанное с обнаружением и устранением одного отказа

$$T_v = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где τ_i – время обнаружения и устранения i -го отказа; m – количество отказов.

Время, в течение которого элемент СЭС будет находиться в состоянии восстановления после отказа за год, равно $T_{вс} = \omega T_v$.

Ремонт электрооборудования проводится с целью продлить срок их службы и вновь использовать изношенные или повреждённое электрооборудование.

В практике широко используются комплексные показатели надёжности: коэффициент готовности K_r , коэффициент вынужденного простоя (коэффициент восстановления) K_v , коэффициент ремонтного режима K_p , коэффициент технического использования $K_{ти}$.

Коэффициент готовности K_r представляет собой вероятность того, что устройство или система окажется в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме планируемых периодов, когда их использование по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности может быть определён по формуле

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_v},$$

где T_o – наработка на отказ; T_v – среднее время восстановления.

Коэффициент вынужденного простоя K_B – вероятность того, что элемент будет неработоспособен в произвольный момент времени. Он определяется по формуле

$$K_B = \frac{T_B}{T_0 + T_B},$$

где T_0 – наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления.

Сумма указанных коэффициентов равна $K_r + K_B = 1$.

Коэффициент ремонтного режима K_p – это вероятность того, что элемент системы) будет находиться в состоянии планового ремонта. Он может быть определён по формуле

$$K_p = \frac{T_{пр}}{T_0 + T_{пр}},$$

где T_0 – наработка на отказ; $T_{пр}$ – среднее время планового ремонта.

Электрооборудование, находящееся в ремонте (в режиме восстановления) может быть восстановлено в заданное время и может оказаться невосстановленным за это время.

Вероятность восстановления $S_{(t)}$ представляет вероятность того, что отказавший элемент будет восстановлен в течение заданного времени t , то есть характеризует вероятность своевременного завершения ремонта $S_{(t)} = N_B / N_{B(0)}$, где N_B – количество элементов, время восстановления которых меньше времени t , то есть восстановленных в заданное время; $N_{B(0)}$ – количество элементов, поставленных на восстановление.

Вероятность невосстановления (несвоевременного завершения ремонта) представляет вероятность того, что отказавший элемент не будет восстановлен в течение заданного времени $G_{(t)} = (N_{B(0)} - N_B) / N_{B(0)}$.

Техническое обслуживание и плановый ремонт устройств СЭС позволяет поддерживать их работоспособность более длительное время и обеспечивать надёжность СЭС. Однако, проведение плановых ремонтов может привести к отказам даже при резервировании элементов СЭС. Влияние плановых ремонтов на надёжность СЭС можно проиллюстрировать следующим примером (рис. 5.5) В случае выведения в плановый ремонт линии Л1 с выключателем Q1 на время $T_{пр1}$ в работе остаётся линия Л2. Если в течение времени $T_{пр2}$ произойдёт отказ

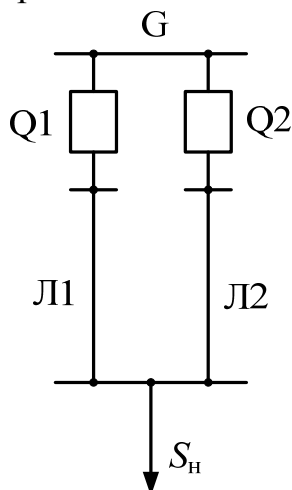


Рис. 5.5. Схема электроснабжения с взаимным резервированием двух линий:

G – источник питания; Л1, Л2 – линии;

Q1, Q2 – выключатели; S_H – нагрузка

на линии Л2, то нагрузка S_n будет находиться в состоянии простоя. Для схем электроснабжения следует учитывать только вероятность наложения аварийного состояния одной цепи на плановый ремонт другой. Наложение плановых ремонтов на время аварийных простоев исключено.

Длительность перерыва электроснабжения зависит от соотношений времён аварийного простоя $T_{вi}$ и планового ремонта $T_{прj}$ двух резервирующих друг друга элементов i и j . Если $T_{вi} \geq T_{прj}$, то одновременный простой заканчивается с окончанием планового ремонта элемента j независимо от момента отказа элемента i в пределах времени $T_{прj}$. Если $T_{вi} \leq T_{прj}$, то одновременный простой заканчивается после устранения отказа в цепи с элементом i .

Если цепь i содержит несколько ремонтируемых элементов, то общее число перерывов электроснабжения можно будет определить как $\mu = \sum_1^n \mu_i$, где μ_i – частота плановых ремонтов i -го ремонта.

С целью сокращения времени простоя при плановых ремонтах ремонты всех элементов цепи совмещают.

Коэффициент технического использования системы $K_{ти}$ – отношение наработки за определённый период к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период

$$K_{ти} = \frac{\sum T_{oi}}{\sum T_{oi} + \sum T_{вi} + \sum T_{прi}},$$

где $\sum T_{oi}$ – сумма наработок на отказ; $\sum T_{вi}$ – сумма средних времён восстановления; $\sum T_{прi}$ – сумма времён плановых ремонтов.

Перерыв в электроснабжении наблюдается и при преднамеренных отключениях. При анализе надёжности систем электроснабжения предприятий учитывается частота преднамеренных отключений, их продолжительность.

Отказы электрооборудования в СЭС приводят к перерыву в электроснабжении электроприёмников, что ведёт к сокращению выпуска и браку продукции, поломке оборудования и, в конечном счёте, к экономическому ущербу предприятия. Оценка надёжности СЭС производится по рассмотренным показателям и, кроме того, по количеству недополученной электроэнергии и экономическому ущербу.

5.5.2. Влияние на показатели надёжности соединений элементов схем электроснабжения.

5.5.2.1. Модели надёжности без учёта восстановления.

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

$$p + q = 1.$$

Для группы из двух элементов возможны следующие сочетания:

- 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.

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

Вероятность сложного события группы из двух элементов, когда первый элемент в вынужденном простое, а второй в рабочем состоянии, будет равна произведению вероятностей этих состояний: $q_1 p_2$.

Вероятность сложного события группы из двух элементов, когда первый элемент в рабочем состоянии, второй в вынужденном простое, будет равна произведению вероятностей этих состояний: $p_1 q_2$.

Вероятность сложного события группы из двух элементов, когда оба элемента в вынужденном простое, будет равна произведению вероятностей этих состояний: $q_1 q_2$.

Очевидно, что

$$(p_1 + q_1)(p_2 + q_2) = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2 + q_1 q_2 = 1.$$

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

$$q_c = q_1 q_2,$$

а вероятность надёжной работы в этом случае

$$p_c = 1 - q_c = 1 - q_1 q_2 = p_1 p_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2.$$

Таким образом, вероятность надёжной работы системы из двух взаиморезервируемых элементов можно определить, пользуясь теоремами сложения и умножения вероятностей.

Теорема сложения формулируется так: вероятность состояния группы элементов, состоящего в появлении хотя бы одного из заданных несовместимых состояний, равна сумме вероятности этих состояний.

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

$$p_c = p_1 p_2$$

А вероятность отказа в данном случае:

$$q_c = 1 - p_c = 1 - p_1 p_2 = q_1 q_2 + q_1 p_2 + p_1 q_2.$$

Для анализа показателей надёжности электрической схемы соединений элементов или её части используют структурные (логические) схемы надёжности, 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 надёжности не всегда совпадает с электрической схемой, особенно для схем с большим количеством присоединений.

В СЭС элементы включаются между собой последовательно и параллельно, имеет место и смешанное соединение. Для оценки надёжности СЭС определяют показатели надёжности.

5.5.2.2. Последовательное соединение нескольких 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**.

На рис. 5.6 показана схема электроснабжения и её структурная схема, состоящая из четырёх последовательно соединённых элементов: выключателя Q, линии Л, трансформатора Т и автоматического выключателя QF.

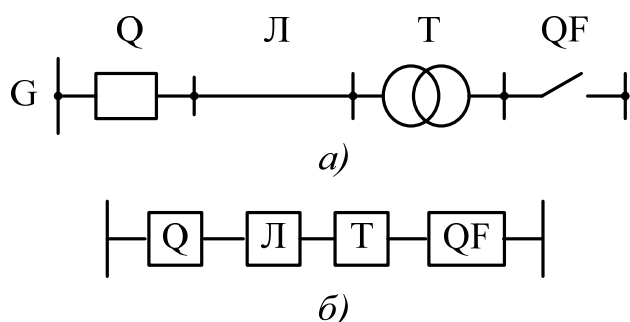


Рис. 5.6. Схема электроснабжения, состоящая из последовательно соединённых элементов (а) и её структурная схема (б):

G – источник питания; Q – выключатель; Л – линия; Т – трансформатор; QF – автоматический выключатель

Система из n элементов 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:

$$p_c = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod p_i, \quad (5.1)$$

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

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

$$q_c = 1 - p_c = 1 - \prod p_i,$$

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

$$q_c = \Sigma q_i - \Sigma(q_i q_j) + \Sigma(q_i q_j q_k) - \dots - (-1)^{(n-1)} q_1 q_2 \dots q_n \approx \Sigma q_i. \quad (5.2)$$

Для элементов электрических систем вероятности отказов q_i, q_j, q_k гораздо меньше единицы, то есть $q_i \ll 1, q_j \ll 1, q_k \ll 1$, а, следовательно, произведения вероятностей отказов будут ещё значительно меньше единицы, то есть $(q_i q_j), (q_i q_j q_k) \dots (q_1 q_2 \dots q_n) \ll \ll 1$. Поэтому при определении состояния отказа из n последовательно соединённых элементов вторым, третьим и последующими слагаемыми правой части равенства (5.2) можно пренебречь, как числами более высокого порядка малости. В практических расчётах используют формулу

$$q_c = \Sigma q_i.$$

При последовательном соединении элементов в логической схеме надёжности вероятности безотказной работы элементов перемножаются (5.1), поэтому при экспоненциальном законе¹¹ распределения

$$p_c = e^{-\Sigma \lambda_i} = e^{-\lambda_c},$$

Отсюда интенсивность отказов при последовательном соединении определяется как

$$\lambda_c = \Sigma \lambda_i,$$

то есть при последовательном соединении элементов интенсивность отказов элементов складываются.

Следовательно, чем большее число элементов n соединено последовательно в логической схеме надёжности, тем больше интенсивность отказов системы и тем меньше вероятность её надёжной работы.

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

$$T_{cp} = 1/\lambda_c = 1/\Sigma \lambda_i = 1/(1/T_1 + 1/T_2 + \dots + 1/T_n).$$

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

$$T_{вс} = q_c/\lambda_c = \Sigma q_i/\Sigma \lambda_i,$$

где $q_c = \Sigma q_i = \Sigma \lambda_i T_{вi}$ – вероятность состояния отказа системы; λ_i и $T_{вi}$ – соответственно интенсивность отказов и время восстановления i -го элемента.

В случае простейшей системы, состоящей из двух последовательно соединённых элементов, показатели надёжности системы рассчитываются по формулам:

– интенсивность отказов

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2,$$

– среднее время восстановления

$$T_{вс} = \frac{\lambda_1 \cdot T_{в1} + \lambda_2 \cdot T_{в2}}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

¹¹ Приближённые расчёты надёжности, необходимость в которых возникает при проектировании электроустановок, проводят обычно при четырёх предположениях: анализируемая система структурно является последовательной; условия эксплуатации не учитываются; отказы элементов независимы; модели отказов любых элементов полагаются экспоненциальными.

Два последних условия позволяют иметь модель отказов всей системы экспоненциальной, что значительно упрощает и делает наглядными все расчёты.

Структурой из последовательно соединённых элементов можно моделировать надёжность 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.

Пример 5.5.3. Рассмотрим участок электрической сети, состоящей из последовательно соединённых элементов: высоковольтного выключателя Q, воздушной линии электропередачи Л, трансформатора Т и автоматического выключателя QF, представленной на рис. 5.6, а.

Определим показатели надёжности участка электрической сети – интенсивность отказов λ_c и среднее время восстановления $T_{вс}$.

Условия примера:

Элемент	Q	Л	Т	QF
$\lambda_i,$ год ⁻¹	0,01	0,05	0,01	0,1
$T_{вi},$ ч	10	10	40	5

Решение: Параметр интенсивности отказов системы с последовательно соединёнными элементами равен сумме параметров интенсивности отказов отдельных элементов:

$$\lambda_c = \lambda_Q + \lambda_L + \lambda_T + \lambda_{QF} = 0,01 + 0,05 + 0,01 + 0,1 = 0,17 \text{ [год}^{-1}\text{]}.$$

Средняя вероятность отказа равна сумме вероятностей отказов элементов:

$$q_c = q_Q + q_L + q_T + q_{QF} = \lambda_Q T_{вQ} + \lambda_L T_{вЛ} + \lambda_T T_{вТ} + \lambda_{QF} T_{вQF} = (0,01 \cdot 10 + 0,05 \cdot 10 + 0,01 \cdot 40 + 0,1 \cdot 5) / 8760 = 1,5 / 8760 = 0,00017,$$

где 8760 – число часов в году.

Среднее время восстановления:

$$T_{вс} = q_c / \lambda_c = 0,00017 / 0,17 = 0,001 \text{ [год]} = 0,001 \cdot 8760 = 8,76 \text{ ч.}$$

5.5.2.2. Параллельное соединение нескольких элементов.

Вероятность надёжной работы такой системы наиболее просто определяется через вероятность противоположного события, то есть 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

$$q_c = q_1 q_2 q_3 \dots q_n = \prod q_i = \prod \lambda_i T_{вi},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – элементы в параллельно соединённой системе; q_i – вероятность безотказной работы i -го элемента; λ_i и $T_{вi}$ – соответственно интенсивность отказов и время восстановления i -го элемента.

Вероятность рабочего состояния определяется как вероятность события, противоположного состоянию отказа

$$p_c = 1 - q_c = 1 - \prod q_i.$$

Для наиболее распространённой схемы из двух параллельно соединённых элементов в логической схеме надёжности вероятность безотказной работы в течение одного года равна

$$p_c = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) = p_1 + p_2 - p_1 p_2 = e^{-\lambda_1} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)}.$$

При $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ имеем

$$p_c = 2e^{-\lambda} - e^{-\lambda}.$$

Для двух элементов в параллельной схеме надёжности средняя наработка на отказ равна

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)}.$$

Если $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, то имеем

$$T_{\text{ср}} = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda}.$$

Под интенсивностью отказов группы элементов, соединённых параллельно в логической схеме надёжности, понимают событие, заключающееся в совпадении вынужденных простоев всех элементов группы.

Для системы из двух элементов интенсивность отказов равна:

$$\lambda_c = \lambda_1 q_2 + \lambda_2 q_1 = \lambda_1 \lambda_2 T_{\text{в}2} + \lambda_2 \lambda_1 T_{\text{в}1} = \lambda_1 \lambda_2 (T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2}), \quad (5.3)$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов первого и второго элементов; q_1 и q_2 – вероятности (коэффициенты) вынужденного простоя; λ_1 и $T_{\text{в}1}$ – соответственно интенсивность отказов и время восстановления первого элемента; λ_2 и $T_{\text{в}2}$ – соответственно интенсивность отказов и время восстановления второго элемента.

В (5.3) 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

$$q_c = q_1 q_2 = \lambda_1 T_{\text{в}1} \cdot \lambda_2 T_{\text{в}2} = \lambda_1 \lambda_2 T_{\text{в}1} T_{\text{в}2}.$$

Тогда среднее время восстановления

$$T_{\text{вс}} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (T_{\text{в}1} T_{\text{в}2})}{\lambda_1 \lambda_2 (T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2})} = \frac{T_{\text{в}1} T_{\text{в}2}}{(T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2})}.$$

Таким образом, интенсивность отказов и среднее время восстановления при параллельном соединении элементов уменьшаются.

По известным интенсивности отказов и вероятности отказа, используя выражение (5.3), найдём время восстановления системы $T_{\text{вс}}$ и при *одинаковых* параметрах элементов получим

$$T_{\text{вс}} = q_c / \lambda_c = T_{\text{в}} / 2,$$

где $T_{\text{в}}$ – время восстановления одного элемента.

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

На рис. 5.7, а изображена электрическая схема двухцепной ЛЭП, которая может быть представлена параллельным соединением элементов в логической схеме её надёжности рис. 5.7, в.

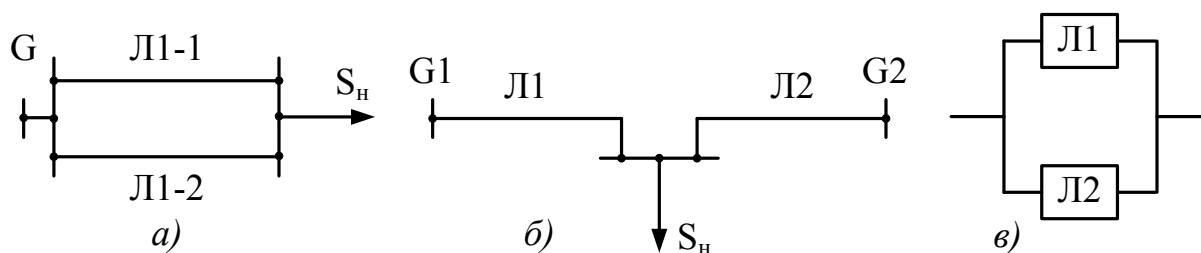


Рис. 5.7. Схемы линии электропередачи без выключателей (а) двухцепной, (б) двух одноцепных и логическая схема надёжности (в):
 G, G1, G2 – источники питания; Л1-1, Л1-2 – цепи двухцепной линии;
 Л1, Л2 – одноцепные линии; $S_{\text{н}}$ – нагрузка

На рис. 5.7, б изображена электрическая схема двух одноцепных линий электропередачи, которая может быть представлена так же параллельным соединением элементов в логической схеме её надёжности рис. 5.7, в.

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

Пример 5.5.4. Потребитель (рис. 5.7, б) получает электроэнергию по двум независимым линиям электропередачи Л1 и Л2, отказы которых *независимы*. Каждая линия может пропустить всю необходимую мощность потребителю.

Определим показатели надёжности системы – интенсивность отказов λ_c и среднее время восстановления $T_{\text{вс}}$.

Условия примера:

Элемент	Л1	Л2
$\lambda_{\text{Лi}}, \text{ год}^{-1}$	0,1	0,2
$T_{\text{вЛi}}, \text{ ч}$	50	50

Решение: Интенсивность отказов для системы с двумя параллельно соединёнными элементами логической схемы надёжности

$$\lambda_c = \lambda_{\text{Л1}} q_{\text{Л2}} + \lambda_{\text{Л2}} q_{\text{Л1}} = \lambda_{\text{Л1}} \lambda_{\text{Л2}} T_{\text{вЛ2}} + \lambda_{\text{Л2}} \lambda_{\text{Л1}} T_{\text{вЛ1}} = \lambda_{\text{Л1}} \lambda_{\text{Л2}} (T_{\text{вЛ1}} + T_{\text{вЛ2}}) = 0,1 \cdot 0,2 \cdot (50 + 50) / 8760 = 2 / 8760 = 2,283 \cdot 10^{-4} [\text{год}^{-1}],$$

где 8760 – число часов в году.

Средняя вероятность отказа равна произведению вероятностей отказов элементов $q_c = q_{\text{Л1}} q_{\text{Л2}} = \lambda_{\text{Л1}} T_{\text{вЛ1}} \cdot \lambda_{\text{Л2}} T_{\text{вЛ2}} = \lambda_{\text{Л1}} \lambda_{\text{Л2}} T_{\text{вЛ1}} T_{\text{вЛ2}} = 0,1 \cdot 0,2 \cdot 50 \cdot 50 / 8760^2 = 50 / 8760^2 = 6,5157 \cdot 10^{-7}$.

Среднее время восстановления

$$T_{\text{вс}} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{\lambda_{\text{Л1}} \lambda_{\text{Л2}} (T_{\text{вЛ1}} T_{\text{вЛ2}})}{\lambda_{\text{Л1}} \lambda_{\text{Л2}} (T_{\text{вЛ1}} + T_{\text{вЛ2}})} = \frac{T_{\text{вЛ1}} T_{\text{вЛ2}}}{(T_{\text{вЛ1}} + T_{\text{вЛ2}})} = \frac{50 \cdot 50}{50 + 50} = 25 \text{ ч} =$$

$$= \frac{25}{8760} = 2,8539 \cdot 10^{-3} [\text{год}].$$

Параллельное соединение элементов системы с целью повышения надёжности называют резервированием. Резервирование различают пассивное и активное. При пассивном резервировании отказавшие элементы автоматически отключаются, а оставшиеся в работе – обеспечивают нормальную работу элек-

троприёмников. При активном резервировании автоматически отключается элемент, допустивший отказ, и включается резервный.

На рис. 5.8 приведены простейшие схемы резервирования. Пассивное резервирование применяется в основном, в сетях энергосистем, при напряжении 35 кВ и выше. В сетях промышленных предприятий при напряжении (6 – 10) кВ и до 1 кВ из-за стремления снизить токи короткого замыкания применяют двухлучевые схемы с активным резервированием.

Из-за возможных отказов секционного выключателя Q, находящегося при нормальной работе в отключенном состоянии, интенсивность отказов системы увеличивается, надёжность несколько становится ниже. Применение таких схем тем не менее оправдывается более низкими капитальными затратами в связи с использованием коммутационных аппаратов и источников питания, рассчитанных на меньшие значения токов короткого замыкания.

Целесообразность резервирования элементов СЭС может оцениваться по экономическим показателям

$$Z_i = pK_i + I_i + V_i,$$

где Z_i – приведённые затраты в вариантах без резервирования к с резервированием элементов; p – нормативный коэффициент стоимости капитальных вложений; K_i – капитальные затраты в соответствующем варианте; I_i – эксплуатационные расходы варианта; V_i – ожидаемый ущерб от перерывов и ограничения

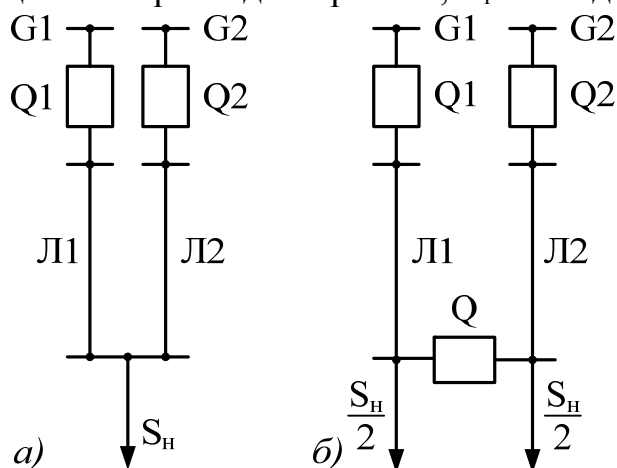


Рис. 5.8. Схемы резервирования:

- а) – пассивное резервирование;
- б) – активное резервирование;
- G1, G2 – источники питания;
- Q1, Q2 – линейные выключатели;
- Л1, Л2 – линии;
- Q – секционный выключатель;
- S_n – нагрузка

в электроснабжении в рассматриваемом варианте.

5.5.3. Анализ надёжности схем системы электроснабжения.

При анализе надёжности схем СЭС выделяются три составляющие надёжности – структурная, функциональная и технологическая [24]. При оценке структурной надёжности исходят из изменения состояния схемы из-за отказов её элементов. Расчёты параметров режима при этом не производятся.

Оцениваются только качественные показатели изменения режима, влияние которых на работоспособность очевидно без проведения расчётов. При оценке структурной надёжности анализируются только аварийные ситуации, связанные с полным перерывом электроснабжения электроприёмников.

Под анализом функциональной надёжности обычно понимается оценка аварийных ситуаций в СЭС на основе количественных показателей аварийных и послеаварийных режимов.

Технологическая составляющая надёжности определяется совокупностью участков производства, одновременно лишённых электроснабжения, возможностью их технологического резервирования, последствиями аварийного прекращения электроснабжения и способом восстановления технологического процесса.

Для схем электроснабжения промышленных предприятий первоочередное внимание уделяется определению показателей структурной составляющей надёжности, однако целостное представление о надёжности СЭС достигается при рассмотрении всех её составляющих.

Рассмотрим простейшую схему соединения электрооборудования цеховой трансформаторной подстанции, входящей в систему электроснабжения предприятия (рис. 5.9).

Каждый из элементов схемы может находиться в одном из четырёх состояний: в работе, в резерве, аварийном простое и профилактическом ремонте.

При повреждении элементов СЭС или отказе происходит их автоматическое отключение или недопущение в работу. В отдельных случаях может быть ручное аварийное отключение.

Все повреждения элементов СЭС, не имеющих автоматического

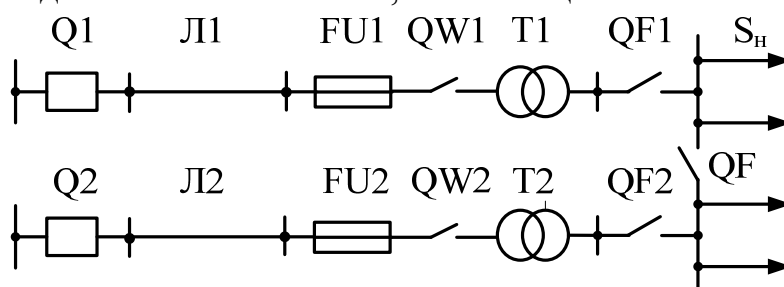


Рис. 5.9. Схема цеховой трансформаторной подстанции:

Q1, Q2 – выключатели, Л1, Л2 – линии электропередачи;

FU1, FU2 – плавкие предохранители; QW1, QW2 – выключатели нагрузки;

T1, T2 – трансформаторы; QF1, QF2 – низковольтные автоматические выключатели;

QF – секционный выключатель; Sн – нагрузка

повторного включения (АПВ), и повреждения коммутационных аппаратов рассматриваются как устойчивые повреждения. В приведённой схеме все элементы, кроме секционного выключателя QF, находятся в работе, выключатель QF – в резерве. Он отключен, но всегда готов к немедленному включению. При выходе из работы любого элемента любой из двух рассматриваемых линий секционный выключатель QF автоматически включается в работу, создавая ремонтный режим.

Надёжность схем, создаваемых на время ремонта того или иного элемента, оценивается вероятностью аварийной потери любого элемента за время работы схемы в ремонтном режиме. При анализе надёжности схем электроснаб-

жения исходят из того, что одновременного повреждения элементов СЭС не происходит.

5.5.4. *Расчёт показателей надёжности.*

Расчёт показателей надёжности СЭС предприятия, безотказность системы, готовность системы к работе, обычно производятся по известным среднестатистическим показателям надёжности элементов СЭС как интенсивность отказов λ , время восстановления электрооборудования в СЭС $T_{в}$, а также частота μ и продолжительность $T_{пр}$ плановых ремонтов.

Среднестатистические показатели надёжности и плановых ремонтов главных элементов систем электроснабжения приведены в Приложении А. К отказам элементов СЭС, снабжённых средствами релейной защиты и автоматики, приводят отказы в этих средствах. В Приложении Б приведены показатели надёжности средств релейной защиты и автоматики, монтируемых на выключателях или воздействующих на выключатель. Отказы разделены на две группы – отказы в срабатывании и отказы, вызванные ложными срабатываниями.

5.5.5. *Расчёт безотказности главной понизительной подстанции предприятия.*

Расчёт показателей надёжности электроустановок относится, прежде всего, к понизительным трансформаторным подстанциям и распределительным пунктам. Показатели надёжности, как правило, определяются на шинах распределительного устройства низшего напряжения.

Для примера рассмотрим схему главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия с двумя трансформаторами, двумя питающими воздушными линиями на железобетонных опорах. На узловом распределительном пункте напряжением 110 кВ в качестве линейного выключателя используется воздушный выключатель. В схеме мостика на подстанции используются разъединители (рис. 5.10). Расстояние от ГПП до узлового распределительного пункта – 50 км [24].

Расчёт безотказности подстанции производится на основе логических связей между фактами отказов отдельных элементов. Вероятность безотказной работы ГПП оценим, исходя из условия, что отказом схемы подстанции является одновременное отключение двух трансформаторов. Одновременный выход из строя двух трансформаторов или двух линий практически не возможен. Отключение второго трансформатора возможно при нахождении первого трансформатора или линии в аварийном или плановом ремонте. На основании данных Приложения А можно установить, что продолжительность нахождения одного из двух трансформаторов в плановом и аварийном ремонте составляет $t' = 0,004$ года, а относительная продолжительность нахождения любой из линий в состоянии ремонта с учётом ремонтного состояния воздушного выключателя на узловом распределительном пункте и разъединителя на ГПП составляет $t'' = 0,01$ года.

Средние статистические времена t' и t'' могут быть принятыми за

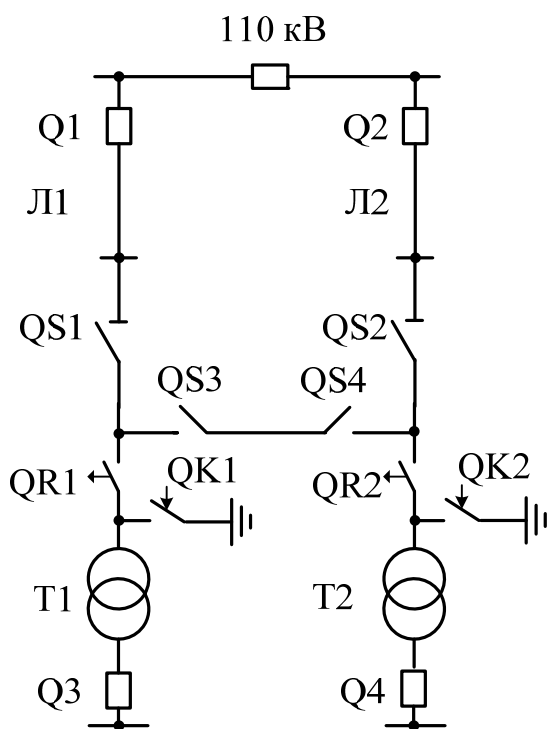


Рис. 5.10. Схема электроэнергетической системы и главной понизительной подстанции:

Л1 и Л2 – воздушные линии;
 (QS1 – QS4) – разъединители;
 QR1, QR2 – отделители;
 QK1, QK2 – короткозамыкатели;
 Т1, Т2 – трансформаторы;
 Q1 – Q4 – выключатели

расчётные при определении вероятности безотказной работы ГПП в течение календарного периода $t = 1$ году.

Вероятность безотказной работы ГПП может быть определена по формуле

$$P_{(t)} = e^{-(t' \Sigma \lambda_i + t'' \Sigma \lambda_j)},$$

где $\Sigma \lambda_i$ – сумма интенсивностей отказов всех элементов СЭС, работающей линии во время нахождения второй линии и второго трансформатора в состоянии ремонта; $\Sigma \lambda_j$ – сумма интенсивностей отказов всех элементов СЭС работающей линии во время нахождения второй линии в состоянии ремонта.

Исходные данные надёжности элементов СЭС для ГПП приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Наименование элементов СЭС	Обозначение λ	Значение λ , 1/год	Количество элементов при	
			$\lambda' = 0,004$	$\lambda'' = 0,010$
Выключатель воздушный, 110 кВ	$\lambda_{\text{ВВ}}$	0,025	1	1
Линия воздушная 110 кВ, 50 км	$\lambda_{\text{ВЛ}}$	0,500	1	1
Разъединитель, 110 кВ	$\lambda_{\text{Р}}$	0,0001	1	3
Отделитель, 110 кВ	$\lambda_{\text{О}}$	0,017	1	2
Короткозамыкатель 110 кВ	$\lambda_{\text{К}}$	0,013	1	2
Трансформатор 110/10 кВ	$\lambda_{\text{Т}}$	0,013	1	2
Выключатель масляный, 10 кВ	$\lambda_{\text{ВМ}}$	0,008	1	2
Итого	$\Sigma \lambda$	0,5781/0,6313		

Вероятность безотказной работы ГПП, заключающейся в отсутствии отказов элементов СЭС, находящихся в работе

$$P_{(t)} = e^{-(0,5781 \cdot 0,004 + 0,6313 \cdot 0,01)} = 0,9914.$$

5.5.6. Расчёт надёжности системы электроснабжения предприятия по коэффициенту готовности.

Зная интенсивность отказов λ и время восстановления любого элемента СЭС $T_{\text{в}}$, можно найти вероятное время нахождения системы в состоянии вынужденного простоя из-за отказов рассматриваемых элементов СЭС (электротехнических устройств), как долю года или как коэффициент вынужденного простоя или коэффициент восстановления $K_{\text{в}}$ [24]

$$q = \sum \lambda_i \cdot T_{\text{в}i} / 8760; \quad K_{\text{в}} = \sum \lambda_i \cdot T_{\text{в}i} / 8760.$$

Доля времени бесперебойной работы или коэффициент готовности будут определяться выражениями:

$$q = \sum \lambda_i \cdot T_{\text{в}i} / 8760; \quad K_{\text{г}} = 1 - K_{\text{в}}.$$

Для ответственных потребителей стремятся достигнуть $K_{\text{г}} = 0,9990 - 0,9999$. В этих случаях достигается вероятность гарантированной обеспеченности электроснабжения. При необходимости надёжность системы электроснабжения может быть повышена за счёт резервирования отдельных или всех элементов СЭС.

Выполним расчёт надёжности электроснабжения ГПП предприятия, схема которой представлена четырьмя вариантами (рис. 5.11).

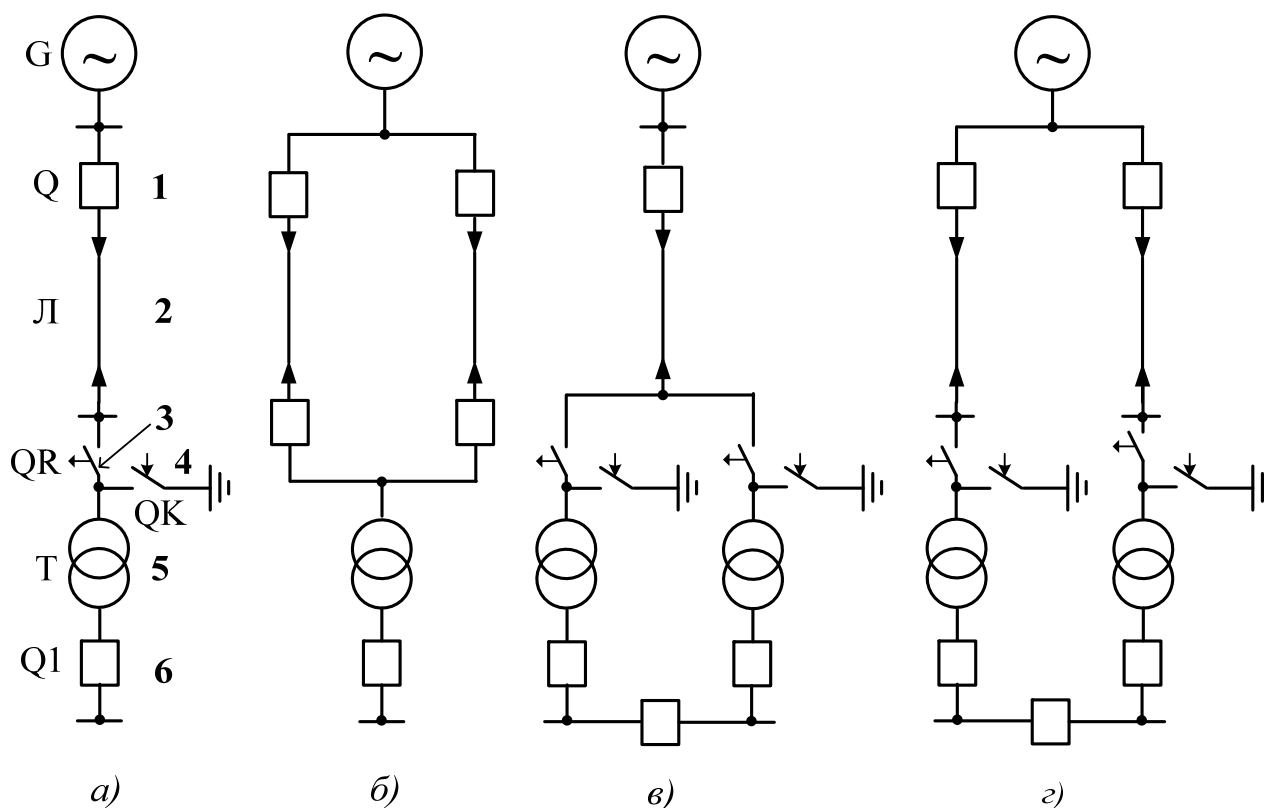


Рис. 5.11. Варианты схемы электроснабжения ГПП:

G – источник питания; Q, Q1 – выключатели; Л – линия электропередачи;
 QR – отделитель; QK – короткозамыкатель; Т – трансформатор;
 (1 – 6) – цифровое обозначение электрооборудования

Пусть потребитель получает электроэнергию от энергосистемы по воздушной линии (линиям) на железобетонных опорах напряжением 110 кВ. Длина линии 150 км. Силовой трансформатор с номинальным напряжением обмотки низкого напряжения 35 кВ. Нагрузка 32 МВА. Показатели надёжности для элементов СЭС в соответствии с Приложением А приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$\lambda_i, \text{ год}^{-1}$	0,025	0,100	0,017	0,013	0,015	0,015
$T_{\text{в}i}, \text{ ч}$	100	14	10	10	200	30

Вариант а) – рис. 5.11, а.

Определим относительное время простоя системы электроснабжения для восстановления работоспособности как коэффициент восстановления $K_{\text{в}}$ при последовательном соединении элементов (1-2-3-4-5-6) СЭС:

$$K_{\text{в}(a)} = \frac{\sum(\lambda_i \cdot T_{\text{в}i})}{T_{\text{зод}}} = \frac{0,025 \cdot 100 + 0,1 \cdot 14}{8760} + \frac{0,017 \cdot 10 + 0,013 \cdot 10 + 0,015 \cdot 200 + 0,015 \cdot 30}{8760} = 0,00087329.$$

Средняя доля времени безотказной работы, определяемая коэффициентом готовности, составит:

$$K_{\text{г}(a)} = 1 - K_{\text{в}(a)} = 1 - 0,00087329 = 0,99912671.$$

Вариант б) – рис. 5.11, б.

При параллельном соединении элементов (1-2-1) СЭС друг другу коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{\text{в}(б)} = K_{\text{в}(пар.)} = K_{\text{в}(ветви)}^2;$$

$$K_{\text{в}(б)} = K_{\text{в}(1-2-1)}^2 + K_{\text{в}(5-6)} = \left(\frac{2 \cdot 0,025 \cdot 100 + 0,1 \cdot 14}{8760} \right)^2 + \frac{0,015 \cdot 200 + 0,015 \cdot 30}{8760} = 0,00039437;$$

$$K_{\text{г}(б)} = 1 - 0,00039437 = 0,99960563.$$

Вариант в) – рис. 5.11, в.

При параллельном соединении элементов (3-4-5-6) СЭС друг другу коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{\text{в}(в)} = K_{\text{в}(1-2)} + K_{\text{в}(3-4-5-6)}^2 = \frac{0,025 \cdot 100 + 0,1 \cdot 14}{8760} + \left(\frac{0,017 \cdot 10 + 0,013 \cdot 10 + 0,015 \cdot 200 + 0,015 \cdot 30}{8760} \right)^2 = 0,00044539;$$

$$K_{\text{г}(в)} = 1 - 0,00044539 = 0,99955461.$$

Вариант з) – рис. 5.11, з.

При параллельном соединении элементов (1-2-3-4-5-6) СЭС друг другу коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{в(з)} = K_{в(а)}^2 = 0,00087329^2 = 0,00000076;$$

$$K_{г(з)} = 1 - 0,00000076 = 0,99999924.$$

Надёжность электроснабжения ГПП в соответствии с расчётами по вариантам представлена следующим образом.

Вариант схемы	Вероятность безотказной работы
<i>а</i>	0,99912671
<i>б</i>	0,99960563
<i>в</i>	0,99955461
<i>з</i>	0,99999924

Наиболее надёжной является схема по варианту з), с резервированием всех элементов.

Выполним расчёт надёжности электроснабжения цеха по коэффициенту готовности схемы на шинах РУ–0,4 кВ, схема которой представлена на рис. 5.12.

В системах цехового электроснабжения широко применяется однострансформаторные и двухтрансформаторные комплектные трансформаторные подстанции (КТП).

Пусть электроснабжение цеха осуществляется от ГПП по схеме рис. 5.11, з ($K_{г} = 0,99999924$). В цехе имеются однострансформаторные и двухтрансформаторная КТП.

Линейные выключатели на ГПП масляные. Кабельные линии к цеховым ТП выполнены кабелями с алюминиевыми жилами, проложенными в траншее. Длина линий 200 м. КТП имеет шкафы ввода высокого напряжения с выключателями нагрузки и предохранителями. Мощность трансформаторов 1000 кВА.

Шины РУ-0,4 кВ секционированы автоматическим выключателем.

Вероятность отказов на шинах 10 кВ ГПП (ЦРП) характеризуется $K_{в} = 0,00000076 \approx 0$. В силу её незначительности не учитываем при расчёте надёжности СЭС. Показатели надёжности для элементов СЭС в соответствии с Приложением А приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

№ элемента	1	2	3	4	5	6
$\lambda_i, \text{ год}^{-1}$	0,008	3	0,01	0,05	0,1	0,06
$T_{вi}, \text{ ч}$	10	40	8	100	5	3

Однотрансформаторная КТП, включённая по радиальной схеме – ветвь I с трансформатором Т в составе элементов (1-2-3-4-5-6). Коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{B(I)} = \frac{\sum(\lambda_i \cdot T_{gi})}{T_{год}} = \frac{0,008 \cdot 10 + 3 \cdot 0,2 \cdot 40/100 + 0,01 \cdot 8 + 0,05 \cdot 100}{8760} + \frac{0,1 \cdot 5 + 0,06 \cdot 3}{8760} = 0,00069406.$$

$$K_{r(I)} = 1 - K_{B(I)} = 1 - 0,00069406 = 0,99930594.$$

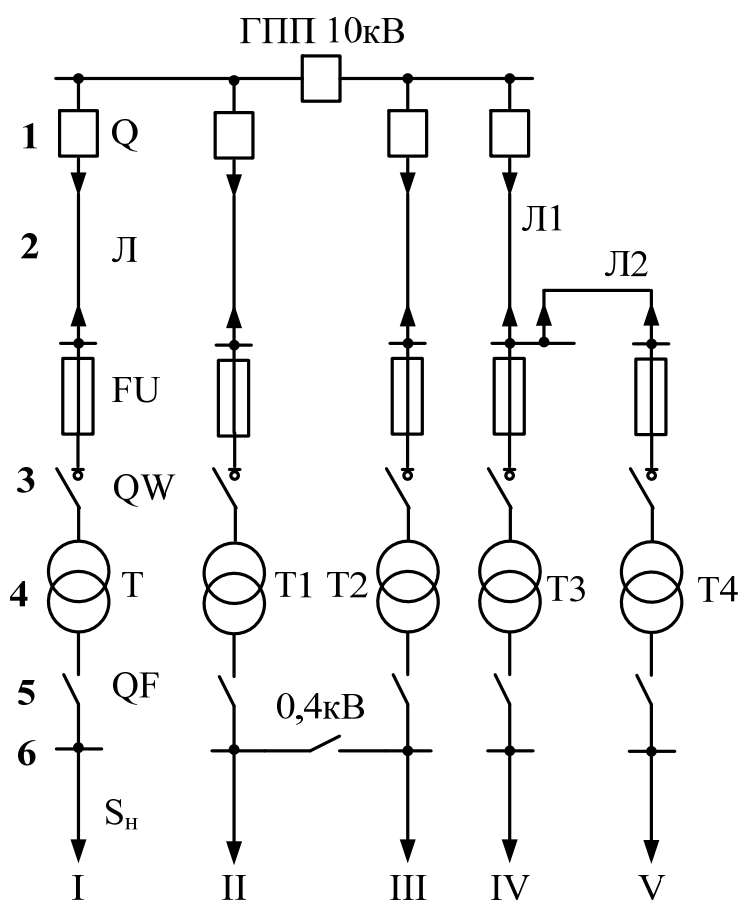


Рис. 5.12. Схема электроснабжения цеха:
(1 – 6) – цифровое обозначение электрооборудования;
Q – выключатель;
Л, Л1, Л2 – линии электропередачи;
FU – плавкий предохранитель;
QW – выключатель нагрузки;
Т, (Т1 – Т4) – трансформаторы;
QF – автоматический выключатель;
S_н – нагрузка; (I – V) – номера ветвей СЭС цеха

Двухтрансформаторная КТП, включённая по радиальной схеме – ветви II + III с трансформаторами Т1 и Т2 в составе элементов (1-2-3-4-5-6) // (1-2-3-4-5-6). Коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{B(II+III)} = K_{B(I)}^2 = 0,00069406^2 = 0,00000048,$$

$$K_{r(II+III)} = 1 - K_{B(II+III)} = 1 - 0,00000048 = 0,99999952.$$

Надёжность электроснабжения двухтрансформаторной подстанции значительно выше, чем в предыдущем случае.

Однотрансформаторные КТП, включённые по магистральной схеме:

- ветвь IV с трансформатором Т3 и в составе элементов (1-2-3-4-5-6);
- ветвь V с трансформатором Т4 и в составе элементов (1-2-3-4-5-6),

то отказ элементов (1-2-2) – выключатель Q и линии Л1, Л2 приведёт к отключению потребителей на этих трансформаторах. Коэффициент восстановления и готовности:

$$K_{B(IV)} = K_{B(V)} = \frac{\sum(\lambda_i \cdot T_{ei})}{T_{год}} = \frac{0,008 \cdot 10 + 2 \times (3 \cdot 0,2 \cdot \frac{40}{100})}{8760} + \frac{0,01 \cdot 8 + 0,05 \cdot 100 + 0,1 \cdot 5 + 0,06 \cdot 3}{8760} = 0,00072146.$$

$$K_{Г(IV)} = K_{Г(V)} = 1 - K_{B(IVили V)} = 1 - 0,00072146 = 0,99927854.$$

Надёжность электроснабжения цеховых КТП при включении трансформаторов по магистральной схеме снижается по сравнению с надёжностью по радиальной схеме.

Надёжность электроснабжения цеховых КТП в соответствии с расчётами по вариантам представлена следующим образом.

Вариант схемы	Вероятность безотказной работы
<i>Однотрансформаторная КТП</i> с трансформатором Т , радиальная схема	0,99930594
<i>Двухтрансформаторная КТП</i> с трансформаторами Т1 и Т2 , радиальная	0,99999952
<i>Однотрансформаторная КТП</i> с трансформатором Т3 , магистральная схема	0,99927854
<i>Однотрансформаторная КТП</i> с трансформатором Т4 , магистральная схема	0,99927854

При оценке надёжности СЭС следует оценить и капитальные затраты на сооружение СЭС, так как для повышения надёжности требуется применить избыточность (резервирование) элементов СЭС или элементы более дорогие с более высокими качественными характеристиками.

5.5.7. Влияние надёжности коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики на надёжность систем электроснабжения.

С целью локализации отказавшего элемента и обеспечения подачи питания в узел нагрузки от резервного источника должно сработать электрооборудование релейной защиты и автоматики, а также коммутационные аппараты, на которые воздействует релейная защита и автоматика [23].

Рассмотрим распределительное устройство, имеющее две секции шин, между которыми установлен секционный выключатель QВ. Секционный выключатель снабжён устройством автоматического ввода резерва (АВР) двустороннего действия (рис. 5.13). В нормальном режиме каждая секция шин питается от своего источника питания по своей линии, а секционный выключатель находится в отключённом положении.

При повреждении линии Л1 релейная защита на выключателе Q1 подаёт команду на его отключение, выключатель Q1 отключает линию Л1 от источника питания G1. Под действием релейной защиты выключатель Q3 отключает

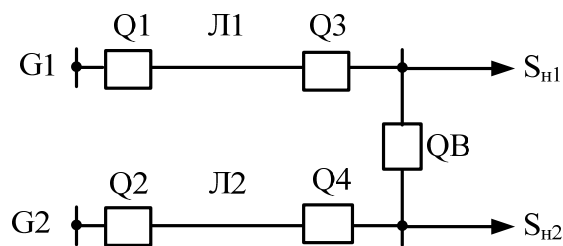


Рис. 5.13. Действие релейной защиты на обеспечение надёжности электроснабжения:
G1, G2 – источники питания;
(Q1 – Q4) – выключатели; QВ – секционный выключатель; Л1, Л2 – линии; S_{н1}, S_{н2} – нагрузки

линию Л1 от узла нагрузки. При исчезновении напряжения на секции с нагрузкой S_{н1} срабатывает устройство АВР, включающее выключатель QВ. После его включения напряжение от линии Л2 через выключатель QВ подаётся на шины для электроснабжения нагрузки S_{н1}.

Фактически количество операций по обеспечению надёжности в узле нагрузки значительно больше, чем отмечено, так как в каждый комплект релейной защиты входит несколько реле различного назначения (реле тока, реле времени и т. д.). При этом каждый элемент при выполнении соответствующей операции может допустить отказ. Тогда надёжность восстановления питания в узле нагрузки может быть не обеспечена. Поэтому при анализе надёжности систем электроснабжения должны учитываться не только элементы главных цепей, но и цепей РЗА, сигнализации, контроля параметров системы электроснабжения.

5.5.8. Использование блок-схем при определении показателей надёжности.

Рассмотренные выше расчёты показателей надёжности применимы для относительно простых схем электроснабжения. С усложнением схем электроснабжения усложняются и расчёты показателей надёжности [25].

Расчёты показателей надёжности сложных схем электроснабжения удобно производить при помощи блок-схем. Реальная схема электроснабжения, состоящая, например, из трёх линий (рис. 5.14) заменяется схемой, в которой каждый элемент представлен отдельным блоком или несколькими блоками.

Все источники питания G1 и G2 в исходной схеме объединяют одной линией, которая является началом блок-схемы. Концом блок-схемы является точка или узел, для которых определяют показатели надёжности.

Двухцепная линия на блок-схеме представляется тремя блоками: блок Л2 учитывает такие отказы, когда повреждения обеих цепей происходят одновременно или когда повреждение одной цепи приводит к отказу другой. Блоки Л2-1 и Л2-2 учитывают отказы каждой из цепей в отдельности. Это относится ко всем параллельно соединяемым элементам.

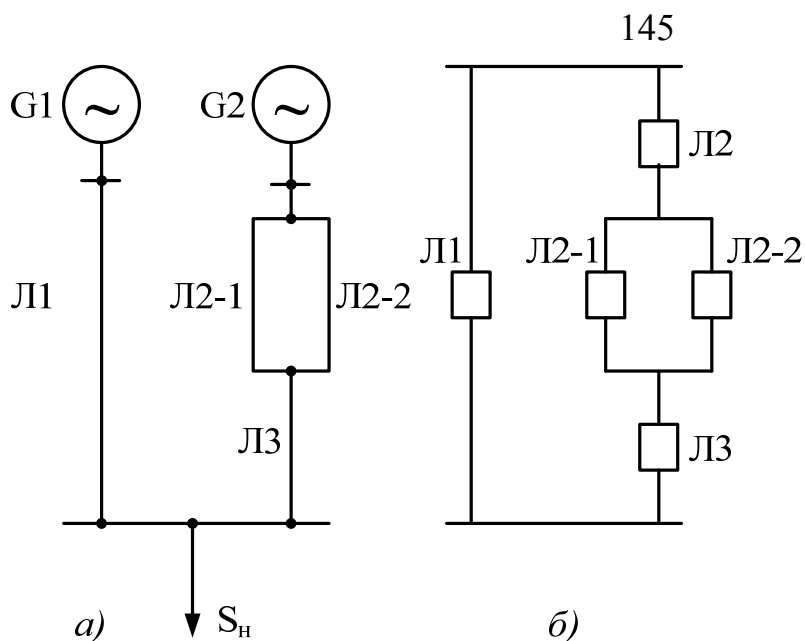


Рис. 5.14. Схема электроснабжения:
a – исходная; *б* – блок-схема;
 G1, G2 – источники питания;
 Л1, Л2, Л2-1, Л2-2, Л3 – линии;
 S_n – нагрузка

Если интенсивность отказов для двухцепной линии (рис. 5.15) обозначить $\lambda_{ц}$, то

$$\lambda_{i,j} = K_c \cdot \lambda_{ц},$$

$$\lambda_i = \lambda_j = \lambda_{ц}(1 - K_c),$$

где K_c – коэффициент, учитывающий долю совмещённых отказов.

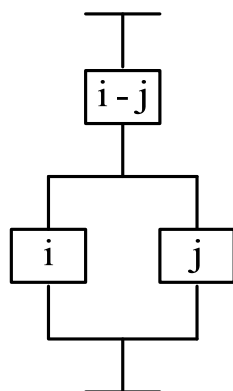


Рис. 5.15. Блок-схема двухцепной линии:
 i, j – параллельные цепи двухцепной линии;
 (i-j) – двухцепная линия, зависящая от отказов в каждой цепи

Для кабелей, приложенных в одной траншее $K_c = (0,15 - 0,30)$, для двухцепных линий $K_c = (0,30 - 0,35)$, для близких одноцепных линий $K_c = (0,1 - 0,2)$. На конфигурацию и состав блок-схемы значительное влияние оказывают коммутационные аппараты и их размещение в исходной схеме.

Составим блок-схему для определения показателей надёжности у электроприёмников с потребляемой мощностью S_n , на шинах цеховой ТП (рис. 5.16).

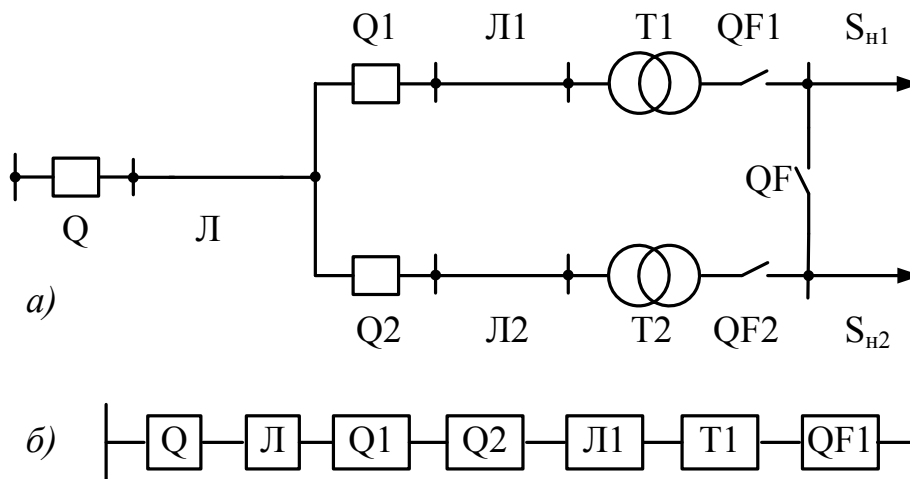


Рис. 5.16. Схема электроснабжения двухтрансформаторной подстанции (а) и блок-схема (б):

Q, Q1, Q2 – выключатели, Л, Л1, Л2 – линии электропередачи;
 T1, T2 – трансформаторы; QF1, QF2 – автоматические выключатели;
 QF – секционный выключатель; S_{н1}, S_{н2} – нагрузки

В блок-схему включён последовательно выключатель Q2, так как его отказ может привести к отключению выключателя Q к исчезновению напряжения у потребителя S_{н1}. Этот блок помечен точкой, что означает возможность замены при расчёте времени восстановления элемента T_v на время коммутационных переключений $t_k = t_0 + n\tau_k$, где t_0 – время на поиск отказа элемента; τ_k – время, необходимое для выполнения одной операции включения или отключения коммутационного аппарата; n – число коммутационных операций, необходимое для восстановления электроснабжения потребителя после отказа элемента схемы.

Для блоков, имеющих метки, при определении показателей надёжности не учитывают показатели плановых ремонтов, так как ремонты этих элементов не приводят к перерыву электроснабжения потребителя S_{н1}.

В схемах с большим числом элементов элементы можно обозначить цифрами.

Блок-схема с секционными выключателями более сложная, здесь присутствуют не только последовательно или параллельно соединённые элементы, но и такие, которые создают внутри схемы сложные контуры. На рис. 5.17 приведена схема электроснабжения с секционными выключателями в РУ высокого и низкого напряжения и блок-схемы её заменяющие.

На блок-схемах блок $N \cdot n$ означает, что в схеме могут присутствовать n одинаковых по назначению элементов. Секционные выключатели помечаются точкой потому, что их можно быстро отключить.

Блок-схема упрощается, если последовательно и параллельно соединённые блоки заменить эквивалентными. Зная показатели надёжности элементов СЭС, можно легко, путём постепенного преобразования, определить показатели надёжности системы в целом.

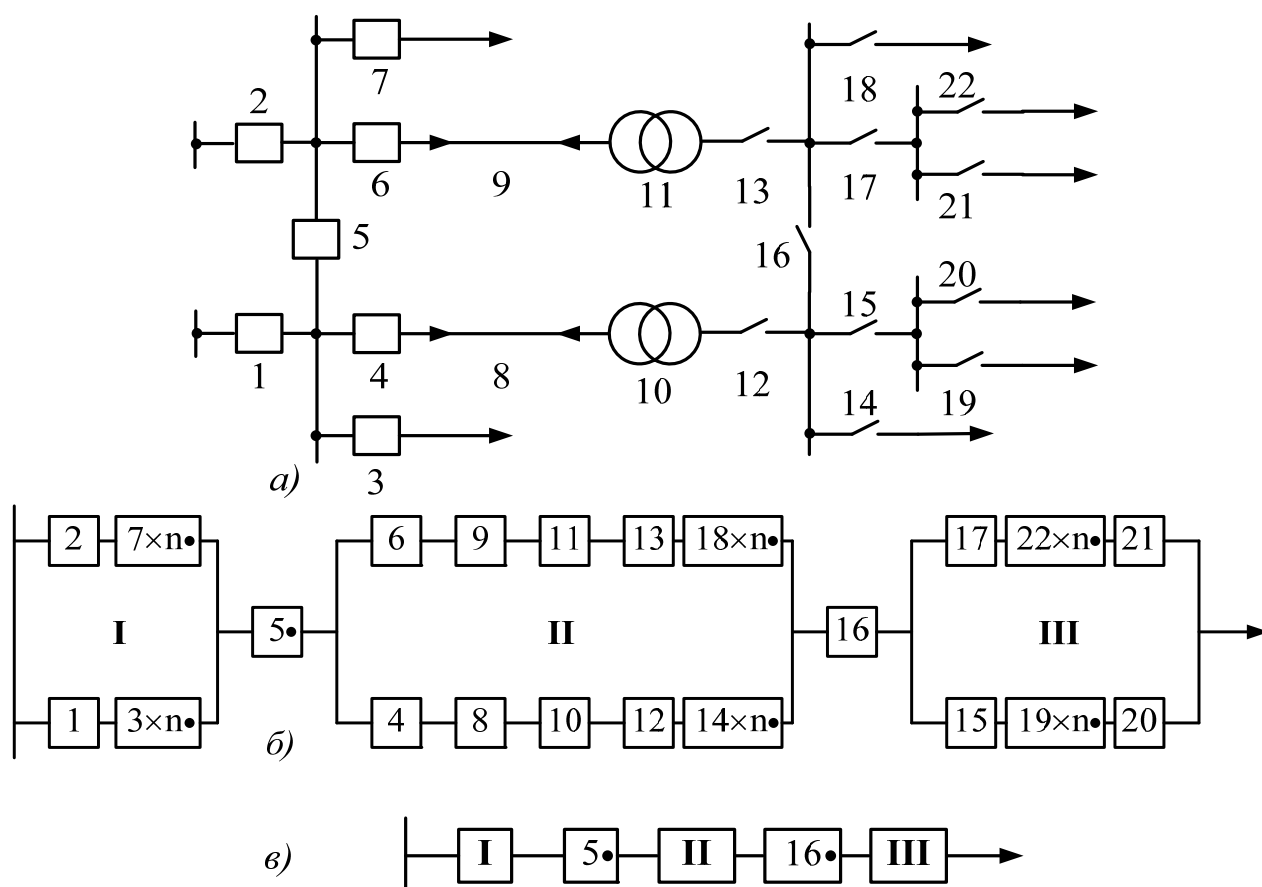


Рис. 5.17. Сложная схема электроснабжения с секционными выключателями:
 а – исходная схема электроснабжения; б, в – блок-схемы при свёртывании исходной
 схемы; (1 – 22) – цифровое обозначение электрооборудования; I, II, III – ступени схема
 электроснабжения; n – количество одинаковых по назначению элементов

5.6. Влияние надёжности электроснабжения на производство

5.6.1. Взаимосвязь технологии производства и надёжности электро-снабжения предприятия.

Отказы и перерывы в Электроснабжении промышленного предприятия приводят не только к недоотпуску электроэнергии. Недоотпуск электроэнергии сам по себе вызывает экономический ущерб, вызванный сокращением объёма выпуска продукции. Кроме того, перерыв в электроснабжении может привести к выходу из строя технологического оборудования или расстройству технологического процесса, к браку продукции. Например, перерыв в электроснабжении сталеплавильной печи приведёт к застыванию металла и к выходу из строя печи.

В то же время технологические особенности предприятия и режимы его работы (сменность, загруженность смен) существенно влияют на показатели надёжности системы электроснабжения. Это положение можно рассмотреть на примере машиностроительного завода, имеющего двухсменный режим работы при 40 ч рабочей неделе. Проведение планового ремонта наиболее ответственных элементов СЭС может быть перенесено на нерабочую смену или на выход-

ные дни. При этом исключается возможность наложение аварий на плановые ремонты резервирующих друг друга цепей. Если даже такое наложение и происходит, то никакого влияния на режим работы предприятия не оказывает. Надёжность таких схем определяется без учёта плановых отключений элементов.

Если предприятие имеет непрерывное производство (металлургия, нефтегазопереработка, химическая и цементная промышленность), то перенос плановых ремонтов на нерабочее время не производится и показатели плановых ремонтов должны учитываться при определении показателей надёжности электроснабжения.

Разное влияние на ущерб предприятия оказывает перерыв в электроснабжении одного из цехов или технологической установки. Это объясняется технологическими связями предприятия. Так, при перерывах в электроснабжении до нескольких часов (меньше продолжительности смены) механических цехов машиностроительного завода при сборке готовой продукции используются запасы деталей (задел) цеха. Только использование всех запасов может привести к недовыпуску продукции.

В то же время, перерыв в электроснабжении отделения подготовки шихты ферросплавного завода ведёт к простою не только этого отделения, но и дуговых печей, создавая значительный ущерб предприятию.

В ряде случаев необходимый запас надёжности обеспечивается не столько резервированием в системе электроснабжения, сколько введением технологического резервирования.

5.6.2. Живучесть систем электроснабжения.

При внезапном прекращении электроснабжения электроприёмников особой группы I категории и электроприёмников I категории (особенно в химической и металлургической промышленности) могут возникнуть опасные концентрации газов, взрывы, пожары, выбросы ядовитых веществ, повреждения технологических установок. Для предотвращения аварий технологических установок, электрооборудование защиты и противопожарной автоматики должны обеспечить безаварийную остановку технологического процесса, а СЭС должна обеспечить работу этих устройств при отказе системы внешнего электроснабжения. Следовательно, система электроснабжения должна обладать живучестью, то есть способностью сохранять питание электроприёмников, осуществляющих безаварийную остановку и не допускающих каскадного развития аварии [26].

При внезапном перерыве электроснабжения идёт резкий процесс сокращения производительности Π (рис. 5.18), вплоть до полной остановки (кривая 1-2- t_2). Для многих технологических процессов и установок это может привести к пагубным последствиям. Например, резкая остановка обжиговой печи по обжигу клинкера в цементной промышленности может привести к прогоранию футеровки и обечайки. Перерыв в электроснабжении сталеплавильной печи приведёт к застыванию металла и невозможности выпуска его.

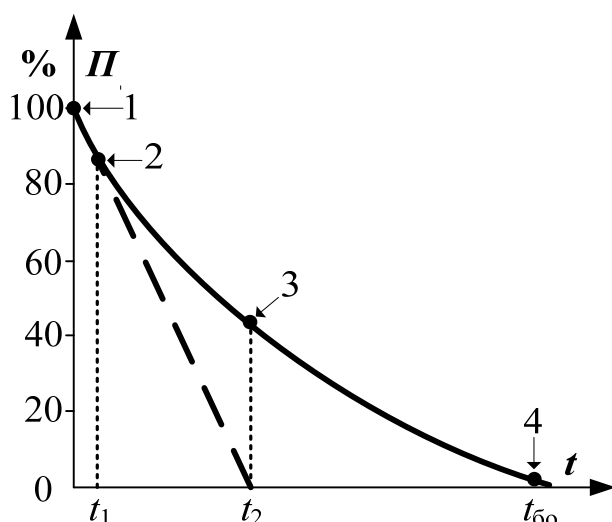


Рис. 5.18. Изменение производительности технологической установки при противоаварийной остановке: Π – производительность технологической установки; (1-2- t_2) – зависимость $\Pi = f(t)$ при аварийной остановке; (1-2-3-4) – зависимость $\Pi = f(t)$ при безаварийной остановке; t_1 – время начала перевода установки в режим холостого хода; t_2 – время окончания перевода установки в режим холостого хода; t_{60} – минимальное время безаварийной остановки технологической установки

С целью обеспечения безаварийной остановки в точке 2 установка переводится на режим холостого хода (участок 2-3), а затем на режим остановки технологического процесса (участок 3-4).

Для безаварийной остановки технологической установки требуется не только определённое время, но и определённая мощность (30 – 50) % P_n . Если мощность будет меньше, чем требуется для остановки, то остановка безаварийной может не быть. Безаварийная остановка невозможна и в случае, если время остановки меньше времени, требуемого для безаварийной остановки ($t_{ост} < t_{60}$). Для питания всех электроприёмников, обеспечивающих безаварийную остановку, используются автономные источники питания или электрооборудование бесперебойного электроснабжения.

5.6.3. Определение недоотпуска электроэнергии при перерывах и ограничениях электроснабжения.

Повреждения элементов СЭС могут привести либо к полному прекращению электроснабжения потребителей, либо к его ограничению, если пропускная способность оставшихся в работе элементов окажется недостаточной.

Если в аварийном режиме электроснабжение предприятия или цеха будет прекращено полностью, то математическое ожидание недоотпущенной электроэнергии можно будет представить выражением

$$\Delta \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_r K_B = P_m T_m K_B,$$

где $\Delta \mathcal{E}_n$ – недоотпущенная электроэнергия при полном прекращении электроснабжения; \mathcal{E}_r – годовое потребление электроэнергии; P_m – максимальная нагрузка потребителя; T_m – время использования максимальной нагрузки в течение года; K_B – коэффициент вынужденного простоя (восстановления).

Если в аварийном режиме электроснабжение прекращается частично и потребляемая мощность P_1 снижается до значения P_2 (рис. 5.19), то недоотпуск электроэнергии может быть определён следующим выражением

$$T_{o.ср} = \int_{t_1}^{t_2} (P_1 - P_2) dt.$$

где t_1 и t_2 – время начала частичного прекращения и время восстановления электроснабжения.

Значение недоотпущенной электроэнергии $\Delta \mathcal{E}_{ог}$ при ограничении электроснабжения определяет заштрихованная часть графика [24, 26].

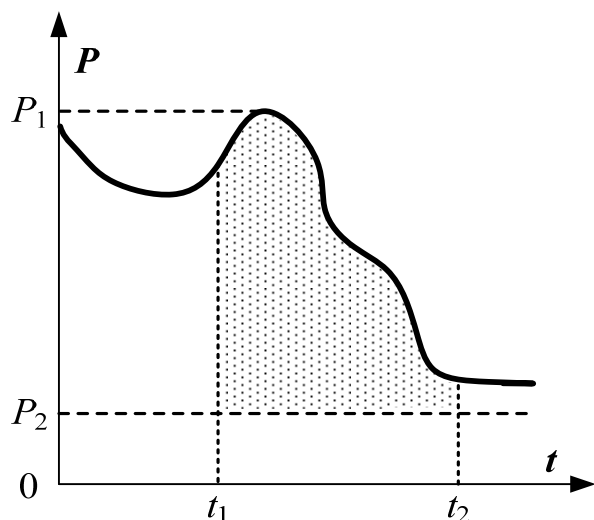


Рис. 5.19. График потребления электроэнергии:

P_1 – потребляемая мощность до ограничения потребления; P_2 – потребляемая мощность при ограничении потребления; t_1 – время начала ограничения потребления; t_2 – время восстановления электроснабжения

Недоотпущенную в течение года электроэнергию определяют как сумму недоотпущенной электроэнергии при полном перерыве и частичном ограничении электроснабжения $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{п} + \Delta \mathcal{E}_{ог}$.

5.6.4. Определение ущерба предприятия при перерывах электроснабжения.

Отказы СЭС предприятия приводят к убыткам из-за простоев, нарушений технологического процесса, брака продукции, поломки оборудования [24, 26].

Значение ущерба U может быть учтена в уравнении расчётных затрат на сооружение системы электроснабжения

$$Z_a = pK + I + U,$$

где p – нормативный коэффициент эффективности, принимается $p = 0,12$;

K – капитальные вложения на сооружение СЭС; I – эксплуатационные издержки; U – ожидаемый ущерб.

Ожидаемый ущерб определяется по выражению

$$U = \Delta \mathcal{E} \cdot U_0 = U_1 + U_2,$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – ожидаемый недоотпуск электроэнергии от перерывов и ограничений электроснабжения; U_0 – значение удельного ущерба на недоотпущенный киловаттчас электроэнергии; U_1 – ущерб от внезапных перерывов в электроснабжении (нарушение технологических процессов, брак продукции, поломка оборудования); U_2 – ущерб, зависящий от длительности перерыва (недовыпуск продукции).

При сравнении двух вариантов СЭС можно принять, что эксплуатационные издержки I в обоих вариантах одинаковы. Тогда оптимальность варианта определяется соотношением

$$\Delta Z_{ij} = p(K_i - K_j) \geq U_j - U_i,$$

где K_i и K_j – капитальные затраты сравниваемых вариантов; U_i и U_j – ожидаемые ущербы сравниваемых вариантов.

Уменьшение ущерба должно превышать увеличение приведённых затрат.

5.6.5. Взаимосвязь показателей качества электроэнергии и надёжности электроснабжения.

Нормальное функционирование электроприёмников может быть нарушено не только вследствие отказов элементов СЭС, но и по причине резкого ухудшения качества электроэнергии [26, 27].

Условия ненадёжной работы потребителя можно выразить следующим соотношением

$$P_{\phi} > P_n \text{ при } t > t_{кр},$$

где P_{ϕ} – фактический показатель качества электроэнергии (δU_v , δU_b , K_{2U} , K_{0U} , K_U – соответственно установившееся отклонение напряжения, размах изменения напряжения, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения); P_n – нормируемый показатель качества электроэнергии по ГОСТ 13109–97; t – продолжительность работы электроприёмника с недопустимыми показателями качества электроэнергии; $t_{кр}$ – критическое время для данной установки при данных показателях качества электроэнергии.

При включении в работу новых электроприёмников должна быть проверена электромагнитная совместимость электрооборудования и электрической сети [19]. Недопустимые отклонения показателей качества электроэнергии могут привести:

- к перегреву обмоток электрооборудования, пробоем изоляции и выходу оборудования из строя;
- к необеспечению параметров срабатывания электрооборудования и его отказам;
- к повышенному расходу электроэнергии, снижению производительности технологического оборудования, расстройству технологического процесса и браку продукции;
- к расстройству устойчивого режима работы потребителей в узле нагрузки.

Синхронные электродвигатели выпадают из синхронизма, у асинхронных электродвигателей прогрессирует рост скольжения – вплоть до их остановки.

Отказы в работе оборудования, перерыв в электроснабжении и аномальные режимы в СЭС создают экономический ущерб предприятию.

5.6.6. Методы и средства повышения надёжности электроснабжения предприятий.

Повышения надёжности систем электроснабжения можно добиться доведением электротехнических устройств в процессе разработки и освоения до требований национальных и международных стандартов. Для этого проводится

комплекс испытаний, при которых устанавливаются основные технические параметры электрооборудования и его показатели надёжности. Так, при испытаниях электрических аппаратов [10] устанавливается номинальный ток для различных режимов и условий работы, коммутационные возможности аппарата, в том числе предельная коммутационная способность, то есть гарантия отключения максимально возможных токов короткого замыкания и включения аппарата на эти токи. Причём отключение аппаратов при токах короткого замыкания не должно приводить к отказам смежных электротехнических устройств, смежных элементов СЭС. При испытаниях устанавливаются способности аппарата противостоять воздействиям механических и климатических факторов внешней среды. При испытаниях также устанавливаются показатели надёжности аппарата, определяется ресурс, наработка на отказ, интенсивность отказов и другие показатели, важные для его эксплуатации.

Повышают надёжность электроснабжения путём резервирования элементов СЭС. Резервное оборудование может вводиться в работу для замены повреждённого элемента либо автоматически, либо путём переключений оперативным персоналом. При не резервируемых элементах СЭС сокращает срок перерыва в электроснабжении наличие холодного складского резерва электрооборудования. Резервное оборудование должно находиться в исправном состоянии, которое поддерживается системой проведения планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания. Дорогостоящее оборудование иметь в качестве складского резерва экономически не выгодно. Такое оборудование может быть заимствовано в крупных энергохозяйствах на условиях аренды или проката.

Электроснабжение отдельных потребителей требует наличия третьего источника питания. В качестве третьего источника могут применяться линии электропередачи от ТЭЦ или соседней подстанции, не связанной с подстанцией основной схемы электроснабжения или агрегаты резервного питания. Имеются агрегаты резервного питания с накопителем энергии и без накопителя энергии, машинные и безмашинные агрегаты резервного питания. Широко применяются генераторы электростанции предприятия, находящиеся в горячем резерве или передвижные электростанции, аккумуляторные батареи.

Повышение надёжности системы электроснабжения достигается, благодаря применению устройств релейной защиты и автоматики [9]. Средства релейной защиты автоматически отключают повреждённый элемент СЭС или участок сети, чем способствуют сокращению сроков восстановления повреждённого элемента СЭС и сохранению в работоспособном состоянии других элементов в послеаварийном режиме, которые были отключены вместе с повреждённым элементом.

Электрооборудование автоматики АПВ автоматически восстанавливают электроснабжение при неустойчивых, самовосстанавливающихся повреждениях. Электрооборудование АВР автоматически восстанавливают электроснабжение по резервной схеме. При этом возможна автоматическая токовая разгрузка отдельных элементов СЭС. Восстановление повреждённых элементов и их ввод не повлечёт длительного перерыва в электроснабжении.

Повышает надёжность электроснабжения внедрение диспетчерской службы предприятия с использованием средств телемеханики.

Перерывы в электроснабжении возможны и по вине обслуживающего и ремонтного персонала. Обслуживающий персонал может не своевременно отыскать повреждение, выявить причины отказов. Ремонтный персонал может не качественно выполнить ремонт, не своевременно ввести в эксплуатацию восстанавливаемое оборудование. В целях недопущения и сокращения перерывов в электроснабжении по вине обслуживающего и ремонтного персонала на предприятиях должны быть организованы курсы переподготовки и повышения квалификации электротехнического персонала, должны быть чётко разграничены функции деятельности каждого работника, обобщаться опыт эксплуатации, выявление причин, развития и ликвидации аварий, разработка чётких инструкций, проведение тренировок.

Приложение А

Среднестатистические показатели надёжности и плановых ремонтов электротехнических устройств в системах электроснабжения предприятий

Наименование электрооборудования	$\lambda,$ год^{-1}	$T_{\text{в}},$ ч	$\lambda_{\text{пр}},$ год^{-1}	$T_{\text{пр}},$ ч
1. Воздушные линии на 100 км длины напряжением, кВ:				
1.1. На металлических и железобетонных опорах				
220	0,07	16	6	8
110	1,0	14	5	8
35	2,0	12	5	8
1.2. На деревянных опорах				
110	0,5	10	7	8
35	1,2	8	6	8
6 – 10	2,0	15	4	8
до 1	5,0	4	1	6
1.3. Кабельные линии напряжением (6 – 10) кВ:				
в грунте	3,0	40	1	8
в блоках, каналах	0,5	0	1	8
1.3. 1. Кабельные линии до 1 кВ (на 1 км)	1,0	4	0,5	8
2. Трансформаторы с высшим напряжением, кВ:				
220	0,020	250	1	40
110	0,015	200	1	30
20 – 35	0,020	150	1	30
3. Отделители на напряжение, кВ:				
220	0,017	10	0,3	15
35	0,020	7	0,3	10
4. Короткозамыкатели на напряжение, кВ:				
220	0,013	10	0,3	15
110	0,013	10	0,3	15
35	0,015	7	0,3	10
5. Разъединители на напряжение, кВ:				
220	0,0001	10	0,3	8
110	0,0001	10	0,3	8
35	0,0002	6	0,3	5
6 – 10	0,0003	6	0,3	5
до 1,0	0,0005	4	0,3	3

Наименование электрооборудования	λ , гОД^{-1}	$T_{\text{в}}$, ч	$\lambda_{\text{пр}}$, гОД^{-1}	$T_{\text{пр}}$, ч
6. Выключатели воздушные на напряжение, кВ:				
220	0,030	150	0,3	250
110	0,025	100	0,3	150
35	0,020	70	0,3	120
7. Выключатели масляные на напряжение, кВ:				
220	0,025	70	0,3	120
110	0,020	50	0,3	100
35	0,015	30	0,3	80
6 – 10	0,008	10	0,3	3
8. Выключатели нагрузки на напряжение, кВ:				
6 – 10	0,010	8	0,5	6
до 1,0	0,150	4	0,5	4
9. Автоматические выключатели на напряжение, до 1,0 кВ:	0,10	5	0,5	5
10. Шины РУ напряжением, кВ:				
6 – 10	0,01	5	0,3	5
до 1,0	0,06	3	0,5	5
11. Шинопроводы в сети напряжением до 1 кВ:				
Магистральные	0,05	3	0,5	5
Распределительные	0,03	3	0,6	5
12. Электродвигатели на напряжение, кВ				
6 – 10	0,10	50	0,5	90
до 1,0	0,15	40	0,5	50

Приложение Б

Показатели надёжности устройств релейной защиты и автоматики

Наименование устройств релейной защиты и автоматики	Интенсивность отказов в срабатывании, год ⁻¹	Интенсивность потока ложных срабатываний, год ⁻¹
1. Дифференциальная защита шин 110 кВ и выше	0,005	0,035
2. Дифференциальная защита трансформаторов	0,001	0,015
3. Газовая защита трансформаторов с действием на отключение	0,001	0,011
4. Электрооборудование автоматического повторного включения	0,001	0,001
5. Электрооборудование автоматического включения резерва при напряжении:		
до 1 кВ	0,020	0,030
6 – 10 кВ	0,012	0,026
6. Электрооборудование частотной разгрузки	0,0003	0,008
7. Максимальная токовая защита	0,042	0,003

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное пособие не претендует на полное описание методов и способов повышения качества и надёжности в системах электроснабжения предприятий. В нём приведены только основные показатели качества электротехнических устройств, применяемых в СЭС, формируемые на стадиях разработки, производства, монтажа и наладки электрооборудования. Рассмотрены показатели качества электроэнергии, их влияние на работу электроприёмников и основные мероприятия по повышению качества электроэнергии, а также надёжности СЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
2. Петров, В. М. О влиянии бытовых электроприёмников на работу смежных электротехнических устройств / В. М. Петров, Е. Ф. Щербаков, М. В. Петрова // Промышленная энергетика. – 1998. – № 4.
3. ГОСТ Р 50579.11–2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 2001.
4. Управление качеством продукции : справочник. – М. : Издательство стандартов, 1985.
5. Методика оценки уровня качества промышленной продукции. – М. : Издательство стандартов, 1972.
6. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1982.
7. Каплан, В. В. Синтетические испытания высоковольтных выключателей / В. В. Каплан, В. М. Нашатырь. – М. – Л. : Энергия, 1980.
8. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005.
9. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов – Ульяновск : Изд-во «Вектор-С», 2007.
10. Щербаков, Е. Ф. Электрические аппараты / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.
11. ГОСТ 23875–88. Качество электрической энергии. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1989.
12. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Издательство стандартов, 1999.
13. Суднова, В. В. Качество электрической энергии / В. В. Суднова. – М. : ЗАО «Энергосервис», 2000.
14. Петрова, М. В. Анализ совместного электроснабжения коммунальной и промышленной нагрузки / М. В. Петрова, Е. Ф. Щербаков, В. М. Петров // «Энергосбережение». – 1999. – № 2.
15. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1986.
16. Ханс Де Кюленер. Самостоятельная оценка качества электроэнергии / Ханс Де Кюленер // «Энергосбережение». – 2005. – № 2.
17. Карташев, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения / И. И. Карташев, Э. Н. Зуев. – М. : МЭИ, 2001.

18. Положение о лицензировании деятельности по продаже электрической энергии гражданам. Постановление правительства Российской Федерации от 6 мая 2005 г. N 291.

19. Петров, В. М. Контроль показателей качества электрической энергии для определения электромагнитной совместимости потребителей на шинах распределительного пункта / В. М. Петров, Е. Ф. Щербаков, С. Я. Королёв // Промэнергетика. – 1992. – № 2.

20. Конюхова, Е. А. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева – М. : «Энергопрогресс», 2001.

21. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / Под ред. А. А. Фёдорова. Том I. Электроснабжение. – М. : Энергоатомиздат, 1986.

22. Китушин, В. Г. Надёжность энергетических систем / В. Г. Китушин. – М. : Высшая школа, 1984.

23. Анищенко, В. А. Надёжность систем электроснабжения / В. А. Анищенко. – Минск : УП «Технопринт», 2001.

24. Гук, Ю. Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат, 1988.

25. Розанов, М. И. Надёжность электроэнергетических систем / М. И. Розанов. – М. : Энергоатомиздат, 1984.

26. Михайлов, В. З. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / В. З. Михайлов. – М. : Энергоиздат, 1982.

27. Фокин, Ю. А. Оценка надёжности систем электроснабжения / Ю. А. Фокин, Б. А. Туфанов. – М. : Энергоиздат, 1981.

28. ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – М. : Издательство стандартов, 2009.

29. ГОСТ Р 51317.4.30–2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М. : Издательство стандартов, 2009.

30. ГОСТ Р 53333–2008 «Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

31. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / под редакцией В. А. Строева. – М. : Высшая школа, 1999.

32. <http://www.ee-system.ru/book/nadejnost>.

33. <http://possessconquerrealty.com/>

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ	5
1.1. Генераторы электростанций	5
1.2. Трансформаторы на подстанциях	6
1.3. Системы электроснабжения и электрические сети предприятий	7
1.4. Коммутационные и защитные аппараты в системах электроснабжения	11
1.5. Источники оперативного тока в системах электроснабжения	13
2. ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	14
2.1. Классификация электроприёмников	14
2.2. Характеристика электроприёмников	15
2.3. Режимы работы электроприёмников	17
2.4. Потребление реактивной мощности	19
3. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	20
3.1. Электротехнические устройства в системах электроснабжения	20
3.2. Формирование качества электротехнических устройств на стадии разработки	25
3.3. Формирование качества электротехнических устройств при промышленном производстве.....	28
3.4. Испытание электрооборудования	29
3.5. Формирование качества электрооборудования при его монтаже и эксплуатации	32
3.6. Формирование качества системы электроснабжения при проектировании	34
4. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	37
4.1. Показатели и нормы качества электроэнергии	38
4.2. Электромагнитная совместимость электроприёмников и электрической сети	41
4.3. Характеристика показателей качества электроэнергии	43
4.3.1. Установившееся отклонение частоты.	43
4.3.2. Отклонение напряжения.	45
4.3.3. Колебания напряжения.	48
4.3.4. Несимметрия напряжения.....	49
4.3.5. Несинусоидальность напряжения.	57
4.3.6. Провал напряжения.	64
4.3.7. Импульсное напряжение.	66
4.3.8. Временное перенапряжение.....	67
4.3.9. Пульсация напряжения.	67
4.3.10. Свойства электроэнергии, показатели качества электроэнергии и вероятные виновники её ухудшения.....	69
4.4. Влияние качества электроэнергии на работу электроприёмников	71
4.4.1. Влияние отклонения частоты в энергосистеме на работу электроприёмников. ..	71
4.4.2. Влияние отклонения напряжения на работу электроприёмников.....	72
4.4.3. Влияние колебаний напряжения на работу электроприёмников.....	74
4.4.4. Влияние несимметрии напряжения на работу электроприёмников.....	74
4.4.5. Влияние несинусоидальности напряжения на работу электроприёмников.....	75
4.4.6. Влияние качества напряжения на работу бытовых электроприёмников.	76
4.5. Технические средства и меры повышения показателей качества электроэнергии	78
4.5.1. Снижение отклонений напряжения.	78
4.5.2. Ограничение колебаний напряжения.	79
4.5.3. Снижение несимметрии напряжения.	81
4.5.4. Снижение несинусоидальности напряжения.	82
4.6. Контроль показателей качества электроэнергии	82
4.6.1. Задачи контроля показателей качества электроэнергии.....	82
4.6.2. Приборы контроля показателей качества электроэнергии.....	83

4.6.3. Организация контроля показателей качества электроэнергии.....	88
4.6.4. Анализ и статистическая обработка результатов измерения показателей качества электроэнергии.	92
4.7. Изменение стандартов: ГОСТ 13109–97 на ГОСТ Р 51317.4.30–08 и ГОСТ Р 51317.4.7–08	93
4.7.1. Общие положения.....	89
4.7.2. Сравнение стандартов.....	90
4.7.3. Функциональные отличия.....	94
4.8. Управление качеством электроэнергии	99
4.8.1. Цели и задачи управления качеством электроэнергии.	99
4.8.2. Менеджмент качества электроэнергии.....	101
4.8.3. Договорные условия между энергосбытовой, электросетевой организацией и потребителем электроэнергии.	102
4.8.4. Виды ущерба по каждому показателю качества электроэнергии.	103
4.8.5. Ответственность виновников ухудшения показателей качества электроэнергии.....	103
5. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	104
5.1. Термины и определения	104
5.2. Требования к надёжности систем электроснабжения	109
5.2.1. Требования к надёжности систем электроснабжения основных нормативных документов.....	105
5.2.2. Некоторые особенности распространения требований основных нормативных документов к надёжности систем электроснабжения.....	108
5.2.3. Факторы, влияющие на надёжность электрооборудования и систем электроснабжения.....	111
5.3. Виды отказов	117
5.4. Характер и причины отказов и повреждений электротехнических устройств..... в системах электроснабжения.....	119
5.5. Основные показатели надёжности и их расчёт	118
5.5.1 Основные показатели надёжности систем электроснабжения.....	118
5.5.2. Влияние на показатели надёжности соединений элементов схем электроснабжения.....	128
5.5.3. Анализ надёжности схем системы электроснабжения.....	135
5.5.4. Расчёт показателей надёжности.....	137
5.5.5. Расчёт безотказности главной понизительной подстанции предприятия.....	137
5.5.6. Расчёт надёжности системы электроснабжения предприятия по коэффициенту готовности.....	139
5.5.7. Влияние надёжности коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики на надёжность систем электроснабжения.....	143
5.5.8. Использование блок-схем при определении показателей надёжности.....	138
5.6. Влияние надёжности электроснабжения на производство	147
5.6.1. Взаимосвязь технологии производства и надёжности электроснабжения предприятия.....	147
5.6.2. Живучесть систем электроснабжения.....	148
5.6.3. Определение недоотпуска электроэнергии при перерывах и ограничениях электроснабжения.....	149
5.6.4. Определение ущерба предприятия при перерывах электроснабжения.....	144
5.6.5. Взаимосвязь показателей качества электроэнергии и надёжности электроснабжения.....	151
5.6.6. Методы и средства повышения надёжности электроснабжения предприятий.....	151

Приложение А

Среднестатистические показатели надёжности и плановых ремонтов электротехнических устройств в системах электроснабжения предприятий.....	148
Приложение Б	
Показатели надёжности устройств релейной защиты и автоматики.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	150
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	151