

ШПИГАНОВИЧ А.Н. (*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*)

ШПИГАНОВИЧ А.А. (*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*)

ЗАЦЕПИНА В.И. (*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*)

ЗАЦЕПИН Е.П. (*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*)

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА БЕЗОТКАЗНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электроэнергетическая система Российской Федерации наибольшее развитие получила в 80–90-х годах прошлого столетия, после чего произошел практически двукратный спад выработки и передачи электрической энергии в системе с последующим ростом. Основной проблемой топливно-энергетических комплексов является прогрессирующее старение основных производственных фондов в условиях увеличения потребностей энергопотребления, что является источником повышенного риска возникновения крупных аварий. При этом негативные возмущения могут возникать как в самой системе, так и быть внешними по отношению к ней, и могут приводить не только к низкому качеству электрической энергии, но и к перерывам электроснабжения. Выполненные до настоящего времени исследования посвящены количественной оценке безотказности систем электроснабжения и их оборудования и не учитывают воздействия отказов электрооборудования на характеристики производственных процессов и работу технологических машин. Рассматривать безотказность систем электроснабжения изолированно от работы других систем (технологической, релейной защиты, автоматики, вентиляции, водоотлива и т.д.) – значит не использовать весь комплекс мероприятий, направленных на повышение надежности электроснабжения, в результате невозможно обеспечение оптимального уровня безотказности электроснабжения. Безотказность системы электроснабжения необходимо оценивать с учетом взаимодействия электрооборудования с оборудованием всех производственных систем. Проблема повышения эффективности функционирования производственных предприятий посредством оптимизации параметров безотказности систем электроснабжения является актуальной и имеет важное народнохозяйственное значение.

Ключевые слова: система электроснабжения, безотказность, негативные возмущения.

На современном уровне развития общества происходит интенсивный процесс роста потребления электрической энергии. Электрическая энергия используется во всех отраслях жизнедеятельности: на промышленных предприятиях, в организациях, в учреждениях, на транспорте, в городском и сельском хозяйстве, в космической сфере, в отраслях вычислительной техники, робототехники и т.д. Она является основной энергией из применяющихся видов энергии. Особенностью является то, что нельзя создать запасов электроэнергии. Вся получаемая электроэнергия должна немедленно потребляться. Большинство потребителей получают электроэнергию от энергосистем. В отдельных энергетических системах число аварий в течение года иногда достигает нескольких десятков. Из-за аварий годовой недоотпуск электроэнер-

гии может достигать нескольких миллионов киловатт. Ущерб, наносимый перерывом в электроснабжении, убытки, связанные с аварийными ремонтами, а также расходы на повышение безотказности отдельных предприятий, требуют сооружения собственных ТЭЦ. Даже этот подход не гарантирует необходимую безотказность в обеспечении электрической энергией приемников предприятия. В общем случае для обеспечения подачи электроэнергии соответствующего качества и требуемого количества от энергосистем к промышленным приемникам служат системы электроснабжения предприятий. Электроприемники обладают своими специфическими особенностями. Для их обеспечения к электроснабжению предъявляются определенные требования: надежность питания, качество электроэнергии, резервирование, защита от-



дельных элементов системы и др. Основными являются стабильность частоты и напряжения, синусоидальность напряжения и тока, симметрия напряжения. В Российской Федерации существует стандарт качества электроэнергии ГОСТ 32144–2013. В то же время по ряду причин не всегда эти нормативы выполняются. Вызвано это тем, что электрооборудование предприятий в процессе функционирования взаимодействует как между собой, так и с питающей системой. Часто такое взаимодействие является негативным. Негативность определяется целым рядом факторов, к которым относятся: грозовые и коммутационные перенапряжения; провалы напряжения; резонансные явления тока и напряжения; гармонические составляющие тока и напряжения и т.д. Всесторонний анализ влияния негативных факторов, а тем более их группы, на безотказность электрооборудования затруднителен. Он требует изучения и сопоставления результатов обработки данных, имеющих разную природу.

При наличии возмущающих факторов в системах электроснабжения возникают не стандартные энергетические процессы [1, 2]. Если для проектируемых систем электроснабжения негативное взаимовлияние электрооборудования друг на друга и систему электроснабжения как-то учитывается, то на существующих предприятиях любая замена электрооборудования может вызвать малопредсказуемые последствия, вплоть до выхода из строя отдельных подсистем электроснабжения и остановки технологического процесса. Поэтому такие явления должны решаться как совершенствованием технологических процессов производства, так и заменой отдельных электроприемников. По мере развития предприятия электрические системы видоизменяются, их структуры постоянно усложняются. Возрастают требования к качеству отпускаемой электроэнергии, к надежности процесса электроснабжения приемников предприятия. В то же время снижаются перегрузочные способности оборудования, происходит сближение

параметров, характеризующих аварийные и номинальные режимы. Системный подход при решении оптимальных задач предполагает управление безотказным обеспечением электроэнергией приемников, направленным на уменьшение ее потерь в системах электроснабжения, а также повышение производительности технологических машин и качества выпускаемой продукции.

Основная часть энергии распределяется по потребителям электрическими сетями напряжением 6–35 кВ. Оказывается, что в распределительных сетях происходит до 55–75 % нарушений связанных с электроснабжением потребителей [3, 4]. Анализ аварий и обобщение опыта эксплуатации распределительных сетей 6–110 кВ позволили выявить путем использования экспериментальных данных опасные феррорезонансные перенапряжения на действующих сетях. Они возникают при неполнофазных режимах питания и в случае самопроизвольных смещений нейтрали. Установлено, что феррорезонансные перенапряжения являются причиной возникновения повреждений изоляции на землю, так же как и дуговые замыкания на землю становятся причиной возникновения и развития феррорезонансных процессов. Это позволяет оценивать степень перенапряжений при их повторном зажигании от горения заземляющих дуг [5]. Статистические данные аварийных ситуаций в распределительных сетях 6–35 кВ свидетельствует, что переход замыканий в межфазные короткие замыкания от перенапряжений составляет до 65 %, в то время как от заземляющих дуг – около 35 %. Соотношение причин междуфазных коротких замыканий такое же и для воздушных, а также кабельных сетей. Катодно-осциллографические измерения перенапряжений и кинографические исследования особенностей горения заземляющих дуг необходимы для определения форм и уровней перенапряжений [6]. Данный подход в настоящее время и в перспективе является востребованным как наиболее эффективный и экономически дешевый способ обеспечения необходимой



надежности электроснабжения [7, 8]. Возможность работы сетей при однофазных коротких замыканиях на землю в течение времени, достаточного для устранения повреждений без отключения потребителей, обеспечивают отдельные варианты режима заземления нейтрали [9, 10]. Регламентируемые требования к режимам работы сетей напряжением 3–35 кВ, регламентируемые, по мнению многих авторов научных исследований, не являются бесспорными. Компенсация емкостного тока в электрических распределительных сетях необходима для ограничения величины короткого замыкания на землю, снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе, уменьшения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и создания условий ее самопогасания.

Компенсацию можно применять также и в воздушных сетях 6–10 кВ в случае емкостного тока менее 10 А. Чтобы осуществить компенсацию емкостного тока замыкания на землю, следует применять дугогасящие заземляющие реакторы с плавным или ступенчатым регулированием индуктивности. Если в процессе эксплуатации емкостный ток замыкания на землю изменяется не более чем на 10 %, то необходимо использовать дугогасящие реакторы со ступенчатым регулированием индуктивности. Плавное регулирование индуктивности реактора используют в случае изменения емкостного тока замыкания на землю более чем на 10 %. Регулирование осуществляется вручную или автоматически. Автоматическая настройка рекомендуется в сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю более 10 А, а в сетях 6–10 кВ при емкостном токе более 50 А [11]. Дугогасящие реакторы настраиваются на ток компенсации, равный емкостному току замыкания на землю. Осуществляется резонансная настройка, также допускается настройка с перекомпенсацией. Индуктивная составляющая тока замыкания на землю не должна превышать 5 А, а степень расстройки – 5 %. Когда используются в сетях 6–20 кВ дугогасящие реакторы со ступенчатым регулированием,

имеющие большую разность токов смежных ответвлений, индуктивная составляющая тока замыкания на землю допускается в пределе не более 10 А. В сетях 35 кВ при емкостном токе менее 15 А степень расстройки должна быть не более 10 % [6–13]. Для воздушных сетей 6–10 кВ с емкостным током замыкания на землю менее 10 А степень расстройки не нормируется. Настройку с недокомпенсацией можно производить в случае недостаточной мощности реактора и при условии, что аварийные несимметрии емкостей фаз сети (обрыв проводов, растяжка жил кабеля) не могут вызвать появления напряжения смещения нейтрали, превышающего 70 % от фазного напряжения. В случае недокомпенсации расстройка не должна превышать 5 %. Степень несимметрии фазных напряжений не должна быть больше 0,75 % фазного напряжения, а напряжение смещения нейтрали – 15 % фазного напряжения. Напряжение смещения нейтрали допускается в течение 1 ч до 30 %, а также в течение времени поиска места замыкания на землю – 100 % фазного напряжения. В настоящее время нашей промышленностью выпускаются плавнорегулируемые дугогасящие реакторы. Их применение сняло проблему точной настройки компенсации в резонанс [8, 18]. Согласно [14] максимальное рабочее напряжение сетей 6–20 кВ не должно превышать 120 %, а для 35 кВ – 115 %.

Технический прогресс в области мер защиты дает возможность создать комплекс мер ограничения и защиты от перенапряжений. Величина перенапряжений и соответствующие коэффициенты запаса электрической прочности изоляции определяются электрофизическими процессами запаздывания развития ее пробоя вследствие кратковременности перенапряжений [15]. Повышение рабочего напряжения электрических линий, а также тенденция снижения их габаритов делают актуальной задачу ограничения коммутационных перенапряжений. То же самое относится и к кабельным линиям различного конструктивного исполнения. В связи с этим часто возникает необхо-



димось уточнения расчетов перенапряжений и условий работы устройств ограничения [16]. В общем случае причины возникновения перенапряжений приведены на рис. 1, а характеризующие их параметры на рис. 2. Перенапряжения можно разделить на фазные, междуфазные, внутриобмоточные, межконтактные [17, 18]. Практически всегда после коммутации в системе электроснабжения возникают коммутационные перенапряжения. Наибольшую значимость в отношении безотказности функционирования систем представляют фазные перенапряжения, воздействующие на изоляцию токоведущих частей по отношению к земле. Происходят они из-за изменения структуры и параметров системы в результате перезаряда емкостей в процессе перехода системы из одного состояния в другое. Коммутационные перенапряжения характеризуются вынужденной и переходной составляющими. При отдельных коммутациях перенапряжения могут быть больше в результате увеличения переходной составляющей. Обычно ее ограничивают использованием разрядников или нелинейных ограничителей напряжения. Переходную составляющую можно уменьшить, ограничивая вынужденную составляющую. На практике основным средством ограничения коммутационных перенапряжений служит уменьшение вынужденной составляющей перенапряжений. Она определяется условиями передачи энергии в системах электроснабжения [19]. Коммутационные перенапряжения могут возникнуть в любой части системы электроснабжения – на секциях шин подстанций при отключении нагруженных линий, зажимах двигателей и трансформаторов при их включении и отключении. Часто присоединенная емкость меньше емкости отключаемой линии в 2,0–3,5 раза. В этом случае для сети с изолированной нейтралью в результате отключения ненагруженной кабельной линии, возможно появление коммутационных перенапряжений со стороны шин с кратностью 2,3–3,5. Если длина кабельной линии не более 300 м, то перенапряжения могут вызвать пробой

изоляции, например, двигателей. Перенапряжения вызывают не только аварийные и плановые отключения линий, но и трансформаторов и других элементов системы, а также короткие замыкания между фазами и на землю [20]. Многократные переходные процессы с перенапряжениями и повторные зажигания дуги на контактах выключателя могут возникнуть при отключении емкостных токов электрических цепей. Отключение индуктивных токов холостого хода трансформаторов приводит к принудительному обрыву дуги в выключателе и колебательным процессам перехода энергии магнитного поля трансформатора в энергию электрического поля его параллельных емкостей.

Всякая электрическая система состоит из совокупности сосредоточенных и распределенных индуктивностей и емкостей. В результате она потенциально обладает колебательными свойствами. В переходном процессе вследствие наложения колебательной составляющей на установившуюся составляющую коммутационные перенапряжения могут в 2 раза превышать номинальное напряжение. Наличие емкостного эффекта в симметричных линейных схемах даже в установившемся режиме приводит к повышению напряжения. Неустойчивый характер горения дуги в выключателе при отключении малых индуктивных токов вызывает переход электромагнитной энергии в электростатическую энергию. Это приводит к перенапряжениям на отключаемой индуктивности [21, 22]. В электрических сетях 6–35 кВ коммутационные (кратковременные) и феррорезонансные (длительные) перенапряжения следует рассматривать отдельно, так как они возникают при различных условиях независимо друг от друга. Согласно технико-экономическим расчетам величины коммутационных перенапряжений по отношению к максимальному напряжению не должны быть больше определенных значений. Они должны быть уменьшены по амплитуде с увеличением длительности их действия.



Рис. 1. Причины возникновения перенапряжений

Ограничение длительных перенапряжений достигается путем использования схемных мероприятий. Перенапряжения возникают не только при включениях, но и отключениях ненагруженных распределительных линий или слабонагруженных трансформаторов, при обрыве токов сети короткого замыкания, токов нагрузки, разрыве электропередачи при выпадении из синхронизма (отключение асинхронного режима) [23, 24].

Для малых индуктивных токов степень ионизации дуги выключателей незначительна. Еще до того когда ток проходит через нулевое значение, сопротивление дуги резко возрастает, а ее ток падает до нуля. Наблюдается «срез» тока. Выделяется значительная энергия, запасенная в индуктивностях системы. Это приводит к значительным перенапряже-

ниям [25]. Кроме значений индуктивных токов, величина «среза» тока определяется конструкцией выключателя, типом дугогасящей среды, емкости, отключаемой цепи и материала контактов [26–28]. После обрыва тока электрическая прочность межконтактного промежутка возрастает. Если восстанавливающееся напряжение между контактами выше, чем прочность межконтактного промежутка, то произойдет пробой промежутка. Осуществится повторное включение цепи. Чередующиеся отключения будут происходить до тех пор, пока при расхождении контактов выключателя дуга окончательно не оборвется [29]. В случае отключения тока в одной фазе в двух других фазах возможно прохождение высокочастотной составляющей через ноль. Наличие вакуумного выключателя может вы-

звать обрыв этих токов. Происходит внутренний «срез» тока, который может сопровождаться большими перенапряжениями. При таких коммутациях кратности перенапряжений могут достигать 6-8 [30]. Большинство замыканий на землю сопровождается возникновением дуги,

что приводит к перенапряжениям на аварийной и «здоровых» фазах [17]. Обычно такие перенапряжения превышают фазные напряжения в 2–3 раза, а в отдельных случаях могут достигать 3,5–4 раз.



Рис. 2. Параметры перенапряжений

Длительные повышения напряжения достигают наибольшей величины, если они связаны с феррорезонансными явлениями. Феррорезонансные перенапряжения обусловлены высшими гармониками. Основную опасность в данном случае представляют резонансные явления. Резонанс тока повышает интенсивность старения изоляции, а напряжения – ее пробой. В общем случае высокий уровень высших гармонических составляющих оказывает негативное влияние на все элементы систем электроснабжения. Они могут вызвать не только перенапряжения, но и его провалы, приводящие к нарушениям технологического процесса. Одной из первых в этом направлении является работа [31]. Широкое внедрение в по-

следнее время мощной преобразовательной техники усугубляет проблему помехозащищенности оборудования систем электроснабжения. Проводился и проводится анализ эффективности функционирования как электрооборудования, вызывающего высшие гармонические искажения, так и чувствительных к ним устройств релейной защиты и автоматики.

Наличие мощной нелинейной нагрузки – источника несинусоидальных искажений – резонанс может произойти на одной из высших гармоник. Произойдет резкий скачок тока или напряжения, что может вызвать выход из строя электрооборудования. Оригинальные подходы к определению возможности возникновения резонансных явлений при нали-



чии в системах электроснабжения источников высших гармоник рассмотрены в работе Зацепиной В.И. [32]. Оценку влияния высших гармонических составляющих и их резонансных явлений на функционирование системы электроснабжения следует осуществлять с учетом классификации электроприемников по соответствующим признакам. Классификация электрооборудования как источника на искажения в рассматриваемом случае неприемлема. Она должна учитывать параметры оценки уровней искажений в системе электроснабжения при совместном функционировании ее электрооборудования. Объединение при анализе приемников необходимо осуществлять не только на частотном спектре искажений, но также использовать фазово-частотные характеристики и мощности.

Оценка степени влияния гармонических составляющих тока и напряжения, а тем более резонансных от них явлений на эффективность функционирования систем электроснабжения, не является простой задачей. Усложняет решение задачи и то, что электрооборудование систем одновременно подвергается целому ряду возмущающих факторов. Воздействие отдельных из них может быть описано только на основании вероятностного подхода [33, 34]. Основными элементами, оказывающими негативное воздействие на показатели качества электроэнергии, служат преобразователи. Их особенностью является импульсный характер процессов преобразования энергии. Наличие преобразователей в системе вызывает искажение формы кривой тока сети. В результате осуществляется передача мощности на высших гармониках [35]. Все это оказывает неблагоприятное воздействие на функционирование системы электроснабжения, вызывая отказы ее элементов.

Силовые преобразователи служат связующим звеном между системой электроснабжения и системой автоматического управления. Преобразователям присущи жесткие аппаратные функции. В зависимости от вида управляемого сигнала преобразователь может, например,

стабилизировать по величине выходное напряжение или изменять его частоту, обеспечивая нужную мощность. Преобразователи оснащаются элементами системы автоматического управления. Они улучшают режим работы преобразователей, снижают пиковые значения напряжения на силовых элементах, уменьшают величины паразитных токов и т.д. Анализ проблем, связанных с использованием силовых преобразователей их негативного влияния на качество электрической энергии, посвящены работы как иностранных [36, 37], так и русских [32, 35] авторов. На основании проведенных исследований авторы составляют или математические зависимости, или представляют их в виде таблиц, диаграмм, графиков [38]. Такой подход позволяет оценивать процессы, происходящие в отдельном преобразователе. Его нельзя использовать при анализе функционирования систем, содержащих группу преобразователей, а тем более, когда необходимо описывать электрические процессы, относящиеся к отдельным участкам системы электроснабжения. В данном случае следует применять специализированные программы математического программирования. В настоящее время уровень развития компьютерной техники довольно высокий. Он позволяет осуществлять анализ несинусоидальных режимов систем электроснабжения путем использования программ имитационного моделирования. Наиболее часто для таких целей используется Matlab 7.0 (с приложением Simulink SimPowerSystems), OrCAD и Electronics Workbench. Обычно, как показывает практика, Matlab обладает более широкими возможностями по сравнению с другими программами, хотя те могут отличаться быстродействием.

Для решения проблем влияния высших гармонических составляющих отдельными авторами предлагается использовать преобразователи с большим числом фаз (6, 14) или дополнительно применять фазосдвигающие трансформаторы. Автор [37] предлагает последовательное включение выпрямительных мостов. Необходимо заметить, что реали-



зация подобных методов усложняет структуру системы электроснабжения, что послужит причиной повышенных тепловых потерь, низкого КПД, а следовательно, и увеличения числа отказов электрооборудования.

В техническом отношении решение подобных задач следует осуществлять, используя резонансные фильтры высших гармоник [32], состоящие из ряда последовательно соединенных индуктивных и емкостных элементов. Настройка фильтра на частоту соответствующей гармоники производится за счет изменения параметров входящих в его состав элементов. Такие фильтры обладают и целым рядом недостатков. С их использованием суммарная емкость системы будет постоянно изменяться с течением времени. Это снижает эффективность применения фильтрокомпенсирующей установки. Необходимо отметить, что с применением резонансных фильтров возможно возникновение в сети антирезонанса [38, 39]. Такое явление может привести к увеличению амплитуд высших гармоник, осуществить генерацию в сеть реактивной мощности на основной гармонике [40]. К параметрам комплектующих емкостей и индуктивностей фильтров предъявляются повышенные требования. Вызвано это тем, что например различие в номинале индуктивности на 5 % приведет к изменению резонансной частоты на 7 %. Можно осуществлять полную компенсацию высших гармоник, если использовать статические преобразователи, работающие на принципе широтно-импульсной модуляции [41]. На основе статических преобразователей с развитием науки и техники были разработаны средства активной фильтрации [42–44]. Авторами основных разработок являлись японские ученые. Ими создана теория «Теория мгновенной реактивной мощности».

Активные фильтры строятся на основе тиристорных ключей с использованием широтно-импульсной модуляции или специальных алгоритмов, заложенных в их структуру управления. Результаты исследования процессов управления

силовыми ключами активных фильтров представлены в зарубежных изданиях [45–52]. Особенностью устройств активной фильтрации служит исключение из системы электроснабжения неактивных составляющих мощности, а также мощности высших гармоник и реактивной мощности основной гармоники сети. Компенсация высших гармоник активным фильтром состоит в генерации гармоник, действующих в противофазе с высшими гармониками сети. Алгоритмы управления силовыми ключами являются непростыми. Для этой цели в работах [37–50] предлагается использовать нечеткие регуляторы, а также элементы нейронных сетей, что обеспечивает автоматическую адаптацию к изменениям нагрузки. В системах электроснабжения с высшими гармониками применяются и гибридные фильтры [46]. Условно гибридный фильтр можно представить в виде пассивной части, состоящей из индуктивных и емкостных элементов, а также цепей управления активного фильтра [53–60]. Силовая часть гибридного фильтра может отображать последовательное [55–57], параллельное [52] и смешанное соединение пассивной и активной частей. Наибольшее распространение получили цифровые схемы управления активными элементами [55–58]. Могут применяться и специализированные аналоговые схемы управления. Они адаптированы под соответствующий вид несинусоидальной нагрузки. В работе [52] представлены систематизированные результаты многолетнего опыта разработок устройств активной фильтрации, а также намечены основные направления возможных исследований в данной области.

Высшие гармоники обуславливают феррорезонансные явления, которые приводят к длительным повышенным напряжениям. Такие напряжения могут возникнуть в установках любых номинальных напряжений, особенно при неполнофазных режимах. Для этих режимов характерны также повышения напряжения вследствие емкостного эффек-



та и несимметрии короткого замыкания на землю [17].

Ограничители перенапряжений, вентильные разрядники, реакторы с искровыми присоединением, защитные искровые промежутки, различные управляемые схемы вступают в действие только тогда, когда напряжение в точке их установки превышает заданную величину. Используются также устройства, осуществляющие ограничения напряжений не только на момент начала коммутации, но и в течение всего периода действия опасных перенапряжений. К ним относятся: шунтирующие сопротивления в выключателях, быстродействующие выключатели без повторных зажигания дуги с управлением моментами коммутаций, устройства для разряда распределительных линий во время бестоковой паузы, дугогасящие катушки, РС-цепочки. В настоящее время высоковольтные выключатели выполняются многоразовыми. Их конструкции состоят из последовательного соединения однотипных элементов, обычно рассчитанных на напряжение 50 кВ. Эти элементы шунтируются активными сопротивлениями, что позволяет снизить возникающие перенапряжения. Для распределительных линий предприятий достаточно двух ступеней шунтирования в выключателе. Выбор параметров защит и места их установки должны основываться на строгом технико-экономическом анализе с использованием математического моделирования процессов в защищаемых аппаратах, а также учетом характеристик элементов системы электроснабжения [61]. На рис. 3 приведены основные средства защиты от перенапряжений.

Ограничители напряжений являются основным средством защиты от дуговых замыканий на землю. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что в распределительных се-

тях с компенсацией емкостного тока при резонансной настройке дугогасящих реакторов создаются нормальные условия работы [62]. Так, в сетях с изолированной нейтралью, где расстройка компенсации составляет более 5 %, дуговые пробой могут наблюдаться каждый полупериод. Уровень перенапряжений при этом достигает (3,0–4,0) U_{ϕ} . С резонансной настройкой пробой возникают в 15–20 раз реже, уровень перенапряжений снижается до (2,0–2,5) U_{ϕ} , а энергия, поглощаемая ограничителями, будет примерно в два раза меньше.

Большинство автоматических регуляторов, эксплуатируемых в энергосистемах, физически и морально устарели. Их целесообразно менять на автоматические регуляторы, оснащенные микропроцессорной техникой, обеспечивающей сбор, хранение и передачу информации о нарушениях в системах электроснабжения. Для этих целей рекомендуется регулятор МИРК-4. Он обладает значительной чувствительностью и помехозащищенностью. Резонансная настройка по амплитуде и фазовому углу напряжения полностью исключает ложное срабатывание регулятора.

В распределительных сетях целесообразно использовать индуктивно-активный способ заземления нейтрали. В случае замыкания на землю параллельно дугогасящему реактору подключается резистор на время, достаточное для срабатывания защиты. Такой тип заземления легко использовать в действующих сетях. Он не требует значительных затрат по реконструкции электрических подстанций [5]. Известно, что в настоящее время ведутся разработки по созданию микроконтроллерного регулятора МИРК-5. Он будет осуществлять управление работой дугогасящего реактора и резистора [11].

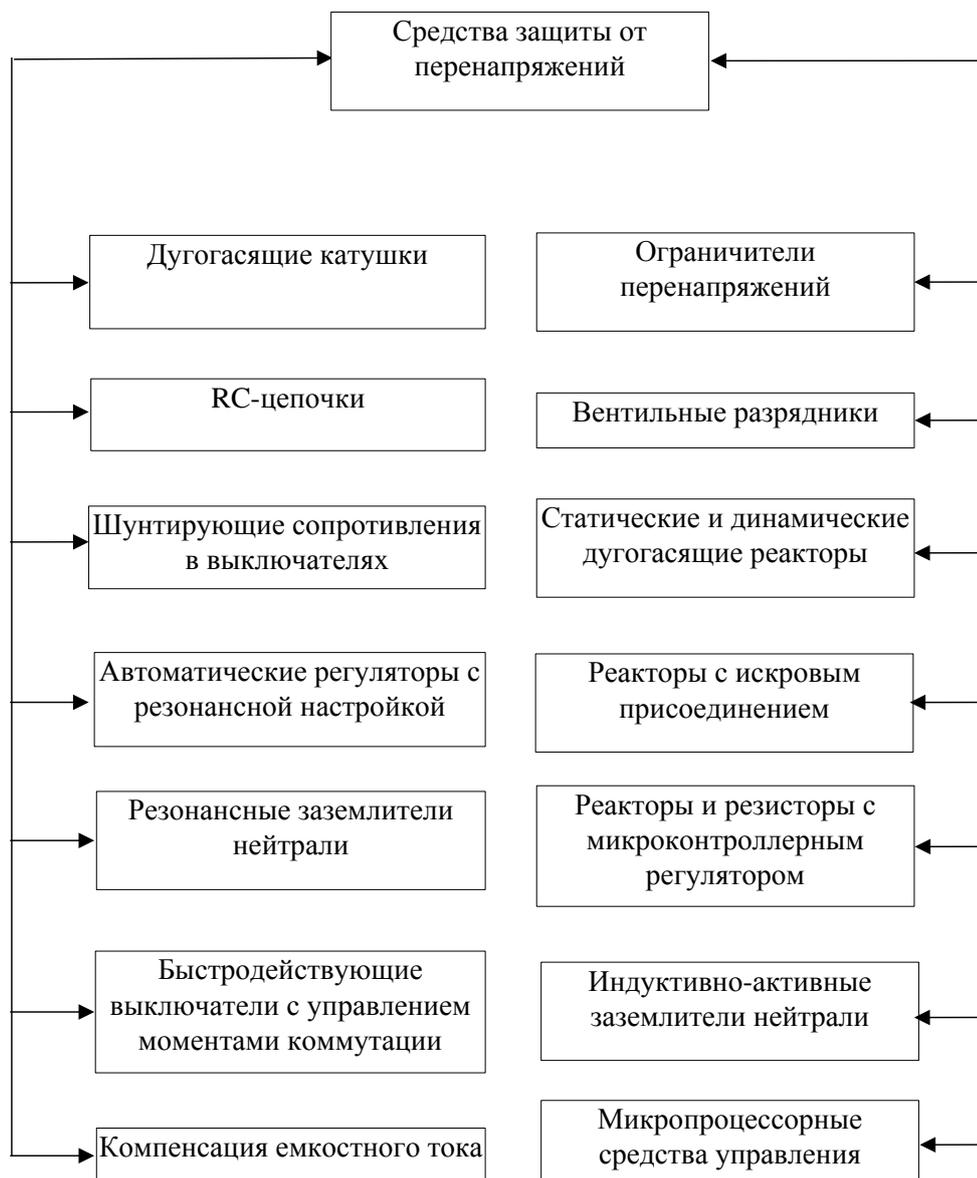


Рис. 3. Основные средства защиты от перенапряжениями

В системах с изолированной нейтралью, чтобы осуществить защиту от однофазных замыканий на землю, применяются дугогасящие реакторы, включаемые в нейтраль через трансформаторы. От общего числа повреждений 90 % в таких сетях составляют повреждения от однофазных замыканий. Величина тока замыкания на землю зависит от точности настройки реактора на режим компенсации. Настройка может быть ступенчатая, плавная с системой управления. Это зависит от типа применяемого реактора. При ступенчатом регулировании реакторы оснащаются отпайками. Отпайки переключаются достаточно редко, только согласно расчетным или измеренным значениям ожидаемого тока замыкания.

Плунжерные реакторы, осуществляющие плавную настройку, обычно настраиваются по максимуму напряжения смещения нейтрали. Измерение значений емкостного тока и емкости сети не производится. Надежность реакторов низкая из-за механических приводов и систем управления [6, 11]. Реакторы с автоматической настройкой компенсации обеспечивают измерение емкостного тока в номинальном режиме работы сети и в момент возникновения замыкания на землю. Системы управления таких реакторов построены на аналоговой элементной базе. Из-за аппаратных погрешностей это затрудняет наладку и снижает точность измерения емкости сети [63]. Для универсального прибора следует установить оп-



тимальные режимы и оценить алгоритмы его работы, обеспечить его реализацию необходимо на современной элементной базе, которой являются микроконтроллеры. Принцип действия такого измерителя и его реализация обычно выполнены на основе восьмиразрядного микроконтроллера Motorola MC68HC908MR32. Микроконтроллер осуществляет запуск и управление путем задания синусоидального тока в форме ШИМ-сигнала. Моменты перехода генерируемого тока через «0» задаются отдельным сигналом. Управляются частота и амплитуда выходного сигнала. Величина выходного сигнала определяется амплитудой помех. Использование автоматического масштабирования упрощает процедуру настройки. Энергонезависимая память служит для сохранения задаваемых и некоторых настроечных параметров в целях исключения их повторного ввода при каждом новом включении. Обмен данными между энергонезависимой памятью и контроллером производится по последовательному интерфейсу. В случае возникновения перенапряжений, вызывающих замыкания на землю, измеритель подает сигнал посредством светового индикатора, прекращает измерения, пребывает несколько секунд в режиме ожидания перед началом нового цикла измерений.

До сих пор в распределительных сетях 6–35 кВ в эксплуатации находится большое количество статических дугогасящих реакторов типов ЗРОМ, РЗДСОМ, изменение параметров которых на новое значение тока компенсации осуществляется вручную [10]. Как средство защиты сетей от неполнофазных режимов служат рекомендации о расстройках в сторону перекомпенсации. Связано это с недооценкой резонансного заземления нейтрали, при котором собственная частота контура нулевой последовательности должна быть равной промышленной частоте [5,11]. Правильно организованное резонансное заземление нейтрали в распределительных сетях служит высокоэффективным средством борьбы с перенапряжениями. Плунжерные реакторы являются более предпочтительными. В то

же время они обладают существенными недостатками. Это низкое быстродействие и значительный уход за электромеханическим приводом плунжера. Широкоимпульсное моделирование, реализуемое тиристорными ключами, включенными последовательно с дугогасящими устройствами, исключает такие недостатки. Они позволяют вводить регулируемую индуктивность, соответствующую рабочей частоте [10].

Короткие замыкания как правило вызывают провалы напряжения. Их появление обусловлено объективными и субъективными причинами, а именно ударами молний, загрязнением изоляции, механическими повреждениями, касанием токоведущих частей посторонними предметами, ошибочными действиями оперативного и ремонтного персонала и т.д. кроме этого провалы питающего напряжения могут возникнуть из-за запуска мощных приемников на предприятии или на соседнем производстве в той же распределительной сети, работы устройства повторного включения, изменения нагрузки переключением. Признаны на сегодняшний день две основные причины провалов напряжения. Это подключение значительных нагрузок потребителем или неисправности на смежных электрически связанных участках системы электропитания. Схематически причины провалов напряжения представлены на рис. 4. Наблюдаются также групповые провалы от повторного включения нагрузки.

В результате их появления осуществляется накопительный эффект [64]. Он более опасен, чем отдельные провалы. Провалы длительностью менее 3 с имеют место в электрических сетях, где устройства автоматического включения резерва на трансформаторной подстанции выполнены на стороне 0,4 кВ со временем срабатывания 0,2 с [65]. Регистрация глубины и длительности провалов напряжения выполняется путем использования измерительной аппаратуры. Достоверность прогноза тем выше, чем шире масштаб охваченной измерениями системы. Необходимо учитывать реальную струк-

туру и конфигурацию системы электро-снабжения вплоть до подключенных шин 0,4 кВ, а также режимы работы электро-оборудования. Результаты измерений должны отражать не только значения на-

пряжения, тока, мощности в интересую-щих узлах, но и отклонения этих пара-метров от номинальных значений.

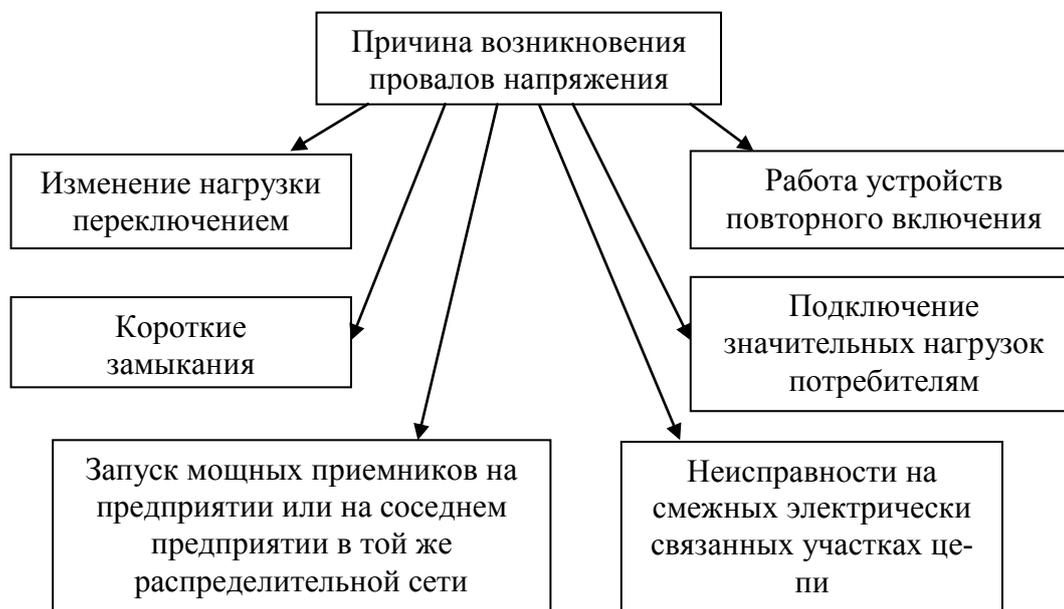


Рис. 4. Причины возникновения провалов напряжения

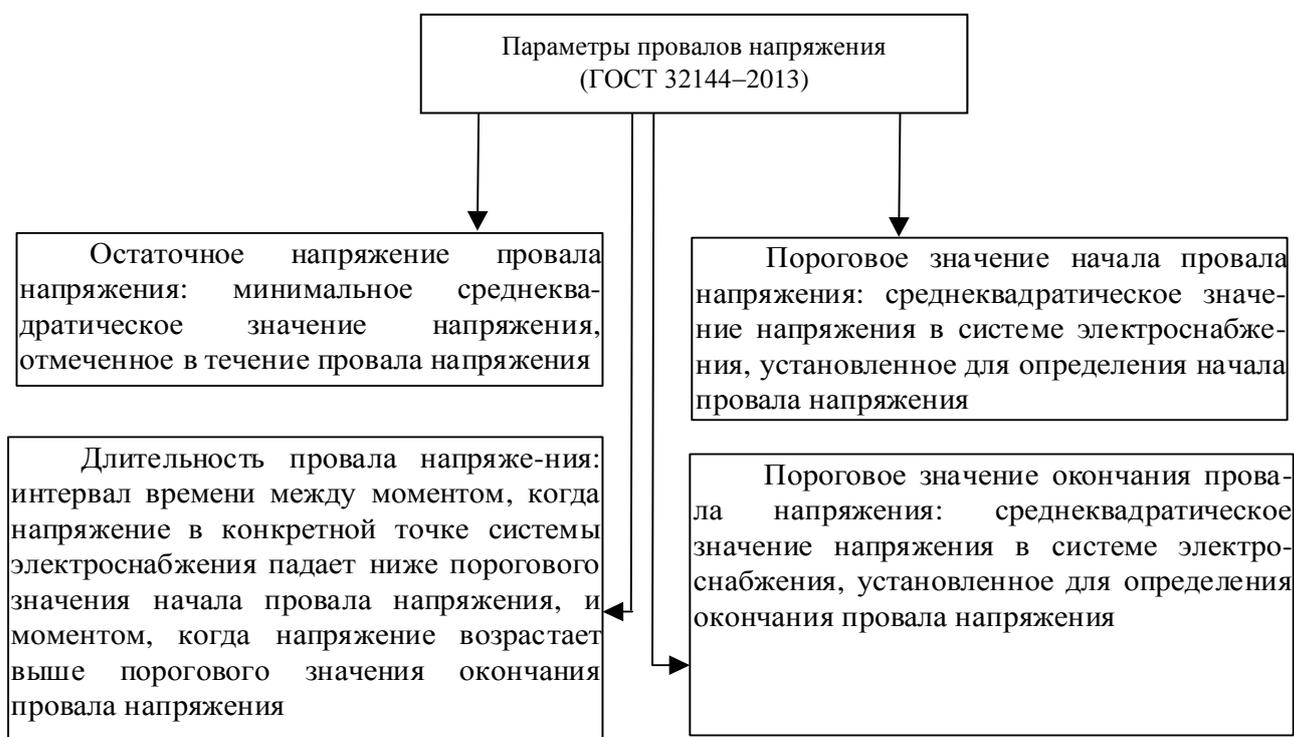


Рис. 5. Параметры провалов напряжения



Анализ данных литературных источников и результатов выполненных измерений свидетельствует, что в кабельных и воздушных распределительных сетях преобладают провалы напряжения глубиной 35–99 % продолжительностью 1,5–3,0 с. Каждое производство, которое получает электроэнергию от распределительной кабельно-воздушной сети, испытывает до 30 провалов в год, а от кабельной сети – до 10 провалов. Согласно статистике около 70 % повреждений воздушных сетей 110 кВ приходится на однофазные короткие замыкания, 20 % – на двухфазные или двухфазные на землю, 10 % – на трехфазные короткие замыкания. В кабельных сетях 6–10 кВ преобладают однофазные короткие замыкания на землю. При оперативном отключении по-

врежденного электрооборудования они не переходят в многофазные короткие замыкания и не вызывают провалов. Соотношение параметров для кабельных линий представлено в табл. 1, а на рис. 5 отображены параметры провалов напряжения. Продолжительность провалов напряжения при близких однофазных коротких замыканиях определяется временем действия первой ступени защиты. Обычно это 0,25–0,35 с. С удалением места повреждения от источника питания остаточное напряжение прямой последовательности увеличивается, а обратной – уменьшается. Уменьшается число провалов линейных и фазных напряжений, но увеличивается длительность провала, так как увеличивается время действия защиты [66].

Таблица 1

Характеристики провалов напряжения для кабельных линий

Глубина провала, %	Доля интервалов, %, при длительности провала, с						Всего, %
	0,01–0,1	0,1–0,5	0,5–1,0	1,0–3,0	3–20	20–60	
10–30	33	20	4	0,5	0,5	-	58
30–60	4	15	2	-	-	-	21
60–95	3	9	0,5	1,5	-	-	14
100	0,5	0,5	1	-	-	5	7
Итого	40,5	44,5	7,5	2,0	0,5	5	100

Каждый провал напряжения приводит к кратковременному сбою в работе технологического оборудования. Разные нагрузки реагируют по-разному на это явление. Особенно ощутимое влияние провалы напряжения оказывают на так называемые «непрерывные технологические процессы» в металлургической, химической, нефтепереработке и других подобных отраслях. Возникающий ущерб, в лучшем случае, выражается в браке части продукции, а в худшем – требует полной остановки технологического процесса. В отдельных случаях необходимо учитывать и стоимость невыпущенной продукции. Оценить степень влияния провалов напряжения на потребителей можно, зная глубину и длительность, а также степень чувствительности его приемников. При большом числе и мощности электрических двигателей на предприятии их одновременное включение после провала напряжения

может оказаться недопустимым. Вызвано это тем, что в момент самозапуска возникает новый провал напряжения. Переходный процесс сильно затягивается, а часть электродвигателей может отключиться из-за перегрузки по току. Необходимо в таких случаях использовать специальные схемы, предусматривающие повторное включение электродвигателей последовательными очередями. В процессе построения характеристик провалов напряжения зачастую возникает задача выбора точек вероятных коротких замыканий и контрольных точек, для которых следует рассчитать величины посадок напряжения, изменения активной, реактивной мощностей. Это необходимо, исходя из требований минимума средств измерений, для получения наиболее достоверной картины распределения провалов напряжения. Наиболее энергоемким оборудованием промышленных предприятий являются технологические установ-



ки, оснащенные асинхронными или синхронными электродвигателями. Пуск таких приемников прямым включением в сеть сопровождается большими ударными токами и знакопеременными электромагнитными моментами. Броски тока также вызывают значительные провалы (до 30 %) напряжения в основном на шинах распределительных устройств, что негативно сказывается на работе соседних приемников. Безопасным считается уровень провала, не превышающий 10 %. Поэтому, чтобы предел провала не превышал 10 %, требуется выбирать мощность трансформаторов подстанций, в данном случае, на ступень выше или ограничивать пусковые токи с помощью устройств плавного пуска, а также использовать преобразователи частоты. Чтобы сократить число провалов напряжения, следует применять микропроцессорные устройства релейных защит и средств автоматики, осуществлять секционирование шин подстанций и распределительных пунктов, снижать сопротивление заземления, использовать грозозащитные устройства, проводить профилактические мероприятия по чистке изоляции и замене дефектных изоляторов. Самым экономичным способом противостоять провалам является выбор оборудования, устойчивого к провалам в силу своей конструкции. Важную роль играют взаимодействие и согласованная работа средств технологической автоматики с автоматикой системы электроснабжения.

В настоящее время используются быстродействующие вакуумные выключатели типа ВВЭМ, ВБЧЭ с электродинамическим устройством управления. Время срабатывания их может достигать нескольких секунд, что приводит к величине напряжения на пусковых органах 0,75–0,80 % от номинального. В результате не защищается чувствительное к таким помехам оборудование.

Универсальным средством защиты как от провалов напряжения, так и от его превышения, служат источники беспере-

бойного питания. Они способны сохранять электроснабжение отдельных электроприемников или локальных сетей. Если для этой цели используются аккумуляторные батареи, то с их использованием можно поддерживать необходимый уровень напряжения в течение 5–20 мин. Этого времени более чем достаточно для ввода резервного питания. К устройствам, защищающим электрооборудование от провалов напряжения можно отнести: маховик, статический источник бесперебойного питания, статический компенсатор, динамический компенсатор искажений напряжения, параллельно работающий синхронный двигатель, активный фильтр, безтрансформаторный усилитель и др.

Схематически виды средств защиты от провалов напряжения приведены на рис. 6. Двигатель-генератор вместе с маховиком защищает технологические процессы практически от всех провалов напряжений. Когда наступает падение напряжения, то подключение маховика, соединенного с двигателем-генератором, замедлит снижение напряжения на нагрузке. Во время провала напряжения динамический компенсатор искажений напряжения остается подсоединенным к электрической сети. Он добавляет отсутствующую часть напряжения через трансформатор, включенный последовательно с нагрузкой. Статический компенсатор снижает провалы напряжения за счет добавления реактивной мощности в сеть. Способность снижать провалы напряжения может быть усилена использованием дополнительного источника энергии, например сверхпроводящего магнитного источника энергии. Параллельно подсоединенный синхронный двигатель с нагрузкой аналогичен по своему действию статическому компенсатору, но он не содержит силовой электроники. Способность синхронного двигателя обеспечивать большую реактивную нагрузку позволяет ограничивать провалы глубиной до 60 % на протяжении 6 с [67].



Рис. 6. Средства защиты от провалов напряжения

Для защиты электрооборудования постоянного тока от провалов напряжения используют преобразователи, повышающие напряжение шин постоянного тока до номинального уровня. Величина провала, которая может быть компенсирована преобразователем, зависит от его номинального тока. Повышающий преобразователь начинает работать сразу, как только провал напряжения будет зафиксирован на шинах. Со способностью обеспечить компенсацию симметричного провала напряжения до 50 %, повышаю-

щий преобразователь имеет возможность компенсировать глубокие несимметричные провалы, такие как отказ одной из фаз системы. Для защиты от полного отключения электроэнергии преобразователь снабжается батареями. Активный фильтр должен постоянно поддерживать напряжение в течение всего периода его провала. Максимальное значение компенсации провала напряжения определяется током фильтра [68]. Динамический компенсатор должен: осуществлять непрерывное регулирование трехфазного



понижения напряжения и его провалов вплоть до 90 % от номинального; восстанавливать провалы не менее чем за 30 с; ослаблять дозы фликера в напряжении; симметризовать трехфазные падения напряжения до 50 % и однофазные провалы до 30 %; компенсировать линейные падения напряжения.

Особый интерес ученых и специалистов вызывают проблемы влияния элементов релейной защиты и автоматики на надежность системы электроснабжения. Количественный рост числа защитных средств приводят к увеличению случаев нарушений в работе электрических систем, вызванных неправильными действиями защиты. По материалам докладов сессии СИГРЭ в Швеции за 15 лет число таких нарушений выросло в 2 раза. Постоянный рост нагрузки, резкие колебания режимов работы электрооборудования приводит к большому диапазону изменений электрических величин, в пределах которого должна быть обеспечена работоспособность релейной защиты и автоматики. Без релейной защиты и автоматики невозможно безотказно обеспечивать электрической энергией приемники промышленных предприятий. Наряду с такими характеристиками, как селективность, чувствительность и быстрдействие, надежность является одним из основных параметров систем релейной защиты и автоматики. Обеспечение надежности сложных технических систем с методологических позиций можно обеспечивать на принципах управления с позиции диагностирования, контроля, прогнозирования, экспертных систем и т.д., а также базируясь на классической (математической) теории надежности. Несмотря на некоторую общность, каждая из позиций решает свою специфическую задачу обеспечения надежности. Основной путь повышения безотказности систем состоит в совершенствовании элементной базы и применяемых схмотехнических решений. Теоретические исследования носят вспомогательный характер. Их основная цель состоит в определении достижения необходимой безотказности при современном уровне знаний, обоснова-

нии выбора соответствующих решений, выявлении целесообразности использования резервирования, получения данных для формирования системы эксплуатационного обеспечения. Особенностью проблемы безотказности является ее тесная связь со всеми этапами объекта, заключающимися в проектировании, изготовлении, эксплуатации.

В нашей стране и за рубежом основные усилия направлены на выработку единой методологии и концепции при оценке надежности. Техническим комитетом по стандартизации ТК 119 Росстандарта РФ, нормативными документами [67–69], совместно с МЭК/ТК 56 определены перспективные направления исследований в области надежности [70].

В общем случае эффективность функционирования технической системы можно оценивать по трем состояниям или уровням эффективности: работоспособному, дефектному и неработоспособному. Существует большое количество различных методов расчета надежности, но при всем разнообразии они подразделяются на три основные группы: аналитические, статистического моделирования и статистические. Разновидности аналитических методов первых двух групп в основном применяются для невозстанавливаемых объектов, используются с количественными показателями надежности при любых законах распределения наработки на отказ элементов системы. Третья группа методов определяется видом законов распределения наработки на отказ и восстановления отказов. На рис. 7. приведена схема классификации математических методов исследования надежности.

Расчет воздушных линий состоит в том, что они представляются в виде отдельных элементов, анализ которых осуществляется независимо. Требуемая прочность элементов обеспечивается превышением их прочностных характеристик над воздействующими нагрузками. Надежность каждого рассматриваемого элемента в зависимости от поставленных целей может оцениваться по одному «критическому» событию или од-

новременно по нескольким параметрам. Параметрический отказ элемента можно представить в виде произвольного числа видов отказов. Для электрических систем можно использовать метод с отказами, сведенными к двум типам: коротким за-

мыканиям и перерывам в электроснабжении. При оценке сложных электротехнических систем с восстановлением используется теория марковских однородных процессов с конечным числом состояний.



Рис. 7. Классификация математических методов исследования надежности

В частности, марковский процесс можно использовать тогда, когда время безотказной работы и время ремонта отдельного элемента не зависят от состояния других элементов и имеют экспоненциальное распределение наработки на отказ и времени восстановления, если требование экспоненциальных распределений можно обойти, применив метод интегральных уравнений. В зависимости от назначения системы и поставленных целей критериями отказов и предельных состояний могут служить экономические, технические, параметрические характеристики эффективности функционирова-

ния системы как в отдельности, так и в сочетании, или их адекватные замены.

Системы релейной защиты и средств автоматики электроснабжения не используются как самостоятельные устройства в отрыве от защищаемого объекта. Поэтому критерии надежности релейной защиты и средств автоматики напрямую связаны с параметрами системы электроснабжения. Классический анализ надежности систем релейной защиты и автоматики принято проводить по трем основным потокам отказов: отказ срабатывания при требовании срабатывания, излишние срабатывания при поврежде-



ниях с требованием несрабатывания и ложные срабатывания при отсутствии повреждений как в системе электроснабжения, так и системах релейной защиты и автоматики. Каждый поток можно рассматривать как суперпозицию потоков отказов отдельных элементов защитного устройства. Из трех потоков в технике релейной защиты и автоматики принято различать отказ функционирования и отказ работоспособности. Возможно, что отказ работоспособности может не приводить к немедленному отказу функционирования. Когда при отказе работоспособности систем защиты и управления нет запроса на их функционирование, то нет и отказа функционирования. При эксплуатации системы потребителя интересуют не показатели надежности, а безотказность контролируемого объекта. В данном случае используют методы анализа детерминированных процессов, в которых для получения исходной информации применяют непрерывный автоматизированный контроль. Безотказность средств релейной защиты и автоматики электрических систем в значительной степени определяется своевременностью технического обслуживания и устранения неисправностей. Для обеспечения соответствующего уровня технического обслуживания при приемлемых затратах труда и времени эксплуатационного персонала средства релейной защиты и автоматики следует оснащать системами тестового и функционального контроля. Обычно в этих целях используются микропроцессорные устройства. По мере выполнения проверок исключаются технические состояния, не совместимые с исходом очередной проверки. Постоянная диагностика состояния системы в процессе ее эксплуатации позволяет предотвратить развитие несостоятельности системы до той стадии, на которой наступает угроза полного отказа функционирования. При тестовом контроле можно искусственно создать ситуации, в результате которых устройство защиты должно сработать. К таким устройствам относятся серийные комплекты релейной защиты, выполненные на интегральных мик-

росхемах: ЯРЭ2201, ПДЭ2001- ПДЭ203, ШДЭ2801, ШДЭ2802, Ш2101-Ш2103 и др. В соответствии с расчетами использование функционального контроля способствует уменьшению значений параметров, характеризующих отказы срабатывания и ложные срабатывания отдельных устройств защиты в 1,5–5,0 раз. Результаты исследований показывают, что неправильные действия защиты с помощью органов контроля предотвращаются более чем в 70 % случаях, а эффективность в обнаружении всех видов повреждений достигает 80–90 %. Затраты на встроенную аппаратуру контроля составляют от 15 до 25 % стоимости контролируемой системы защиты. Наиболее интенсивно внедряются централизованные системы противоаварийной автоматики и релейной защиты. Основной принцип осуществления централизованной защиты состоит в замене большого количества измерительных операций логическими решениями.

Усовершенствование систем релейной защиты и автоматики предусматривает изменение их структуры, наращивания вычислительных модулей и функций, в то же время модификацию программного обеспечения. Комплексы рабочих программ выполняются таким образом, чтобы в случае необходимости их можно было менять, причем не только отдельные программы, но и критерии, по которым ведется управление. Современная релейная защита и автоматика может решать дополнительные задачи, которые специфичны только для вычислительной техники.

Информационно-вычислительные системы в силу своих особенностей позволяют повысить безотказность систем в целом. В то же время, являясь компонентом системы релейной защиты и автоматики, программная защита сама должна удовлетворять всем требованиям надежности, предъявляемым к устройствам подобного типа. В данном случае кроме устойчивых отказов возможны кратковременные сбои, приводящие к получению неверного результата, то есть к ложным срабатываниям защиты. Причиной такого сбоя может стать



ошибка в программе или несогласованность времени в отдельных микропроцессорных контроллерах защиты. По данным японских специалистов, около 70 % неправильных действий программных защит вызваны «временными нарушениями» (сбоями). Если безотказность нельзя обеспечить путем повышения надежности отдельных элементов, то используется резервирование, то есть создание структурной избыточности. Наличие нескольких вычислительных элементов обеспечивает возможность обмена информацией между ними. Для блокирования ложных сигналов требуется как минимум наличие двух вычислительных элементов, а при мажорировании – трех. Выявление отказавшего элемента производится путем программного сопоставления результата мажорирования с исходными величинами. Такое сопоставление возможно с любой требуемой периодичностью. Для оценки безотказности сложных систем необходим универсальный математический аппарат, который позволяет осуществлять анализ с любым количеством упрощений. Основой такого аппарата, на наш взгляд, является теория случайных импульсных потоков. Вопросы, связанные с ликвидацией повреждений в электрических системах без отключения приемников, рассмотрены в работах [1, 32]. Для этих целей используются специальные комплексы [71].

Системы релейных защит и автоматики, построенные на механической базе, представляют сложный многофункциональный комплекс. Электромеханическая аппаратура морально и физически устарела. Использование электромеханических устройств задерживает дальнейшее развитие техники релейной защиты и средств автоматики как в качественном, так и в количественном отношении. Актуальным является развитие устройств защиты и средств автоматики на полупроводниковых элементах. Создание интегральных микросхем стало основой для нового поколения релейной защиты и средств автоматики. Интегральные микросхемы относятся к категории электронных устройств средней степени ин-

теграции. Они позволяют осуществлять реализацию одной или нескольких однопольных функций. Основные характеристики микропроцессорных устройств значительно выше, чем у микроэлектронных, а тем более, электромеханических. Их мощность потребления от измерительных трансформаторов тока и напряжения, находится на уровне 0,1–0,5 ВА, измерительная погрешность лежит в пределах 2–5 %, коэффициент возврата измерительных органов составляет 0,97.

Среди научно-технической общест-венности нет единого мнения в вопросах, связанных с переходом от электромеханических к микропроцессорным средствам релейной защиты и автоматики. Вызвано это тем, что любое сложное устройство, а тем более микропроцессорные защиты, обладают не только очевидными преимуществами, но и недостатками [72]. С этих позиций данное направление является актуальным и целесообразным для исследований.

Микропроцессоры в релейной защите и средствах автоматики систем электроснабжения используются не так давно. Первые такие устройства начали производиться в начале 1980-х г. Siemens и АВВ. Процессоры того времени уже могли принимать соответствующее число сигналов о состоянии сети и преобразовывать их. В основном преобразователи воспринимают два параметра. Это ток и напряжение сети. Микропроцессорные устройства кроме этих двух параметров запоминают и выдают еще целый ряд дополнительных данных, как, например: причина отключения, длительность аварийной ситуации, время и дата отключения, векторная диаграмма токов и напряжений и пр. В то же время работа системы электроснабжения не изменилась. Не стало больше число операций, выполняемых энергосистемами, а именно производство, передача и распределение электроэнергии между потребителями, не увеличилось количество функций, которые выполняют релейная защита и средства автоматики.

Достоинства микропроцессорных устройств определяются уменьшенными



массогабаритами, сокращением числа обслуживающего персонала и затрат на эксплуатацию, а также возможностью перепрограммирования их функций для обеспечения соответствующей настройки. Возможно считывать информацию, изменять параметры устройств, сохранять и распечатывать данные на компьютере, осуществлять удаленный доступ для изменения уставок реле. Применение микропроцессорных устройств совместно с SCADA-системами позволяет передавать сотни сигналов срабатывания защиты от одного терминала. Это делает возможным детально анализировать события с помощью сигналов, приходящих на терминалы и генерируемых внутри них при авариях с дискретностью до 1 мс.

С использованием микропроцессорной техники значительно расширяются функции и возможности рассредоточенных по системе электроснабжения автоматических устройств, производящих управление процессом производства, передачи и потребления электроэнергии в нормальных и аварийных режимах. Необходимо помнить, что релейная защита и средства автоматики с микропроцессорами могут обладать системной ошибкой, так как существует риск проникновения в систему вируса. При настройке и ремонтах микропроцессорных устройств возникает необходимость выявления источников наводки и причин появления паразитных связей. Микропроцессоры не способны выдерживать перегрузки, они высокочувствительны, что приводит к ложным срабатываниям. Существенным недостатком является постоянное обновление программного продукта, который устаревает быстрее, чем используемое электрооборудование. Препятствием для внедрения цифровых устройств служат относительно большая их собственная цена, а также стоимость обучения обслуживающего персонала. Это и является причиной того, что на сегодняшний день микропроцессорная защита в системах электроснабжения составляет в пределах 1 % от устройств релейной защиты и автоматики. Из-за физического и морального износа 50 % установленной аппарату-

ры релейной защиты и автоматики на механической базе требует немедленной замены. Системы электроснабжения в основном оснащаются миниатюрными электромеханическими реле. Их параметры не соответствуют реальным условиям эксплуатации. Контакты реле не предназначены для коммутации индуктивных нагрузок при напряжении 220 В постоянного тока. Вызванные процессы протекают в обмотках выключателей и промежуточных реле. Поэтому необходим анализ мероприятий для решения данной проблемы.

Реле должны обеспечивать многообразные последовательные разрывы в коммутируемой цепи выключателей. Предлагается применять герконовые реле. Обычно они оснащены двойными контактами: основным и дугогасительным. Можно включать и отключать высокоиндуктивную нагрузку ($L / R = 100$ мс) с токами 0,2 А при напряжении 220 В постоянного тока. С увеличением мощности выходного сигнала до значений 12 В и 100 мА их можно использовать в виде внешних реле. Промежуточные полупроводниковые элементы в данном случае не нужны [73]. Находящиеся в эксплуатации устройства при модернизации систем можно использовать только за счет внешних модулей. При этом не требуется изменение их внутренних цепей.

Переход на защиту, базирующуюся на микропроцессорах, вызывает проблему, связанную с электромагнитными излучениями, что в значительной степени снижает эффективность защиты. Электромагнитная совместимость оборудования существующих систем электроснабжения не является однозначной. Она оценивается от удовлетворительной до катастрофически негативной. Электромагнитное состояние на большинстве промышленных предприятий является неудовлетворительным. Вызвано это тем, что проектировались системы электроснабжения этих предприятий без учета соответствующих требований. Неудовлетворительное состояние электромагнитной совместимости можно исключить,



если будут приняты правильные решения при проектировании, монтаже и эксплуатации системы электроснабжения.

На электрических станциях, подстанциях, электрических линиях воздействие возмущающих факторов на работу оборудования отличается от аналогичных действий на промышленных предприятиях не только разных отраслей, но и одной отрасли. Оно неодинаково в разных организациях, учреждениях, жилых комплексах и т.д. Электромагнитное воздействие по величине и времени не является величиной постоянной и зависит от многих факторов как естественного, так и искусственного происхождения. Возможны случаи, когда напряженности электромагнитных полей естественного происхождения больше электромагнитных полей искусственного происхождения. Наблюдаются и обратные явления, представляющие поля искусственного происхождения больше естественных полей. Электромагнитные поля быстро изменяются в процессе функционирования системы электроснабжения в довольно широких пределах. Зависит это от многих факторов: примером может служить электросварочная установка переменного тока. Она вызывает резко переменную несинусоидальную нагрузку, приводящую к созданию в системах высших гармонических составляющих, а соответственно к электромагнитным возмущениям.

Применение микропроцессорных устройств в системах автоматики и релейной защиты оказалось весьма чувствительным по отношению к их элементам со стороны электромагнитных воздействий. Наблюдались случаи ложного срабатывания защит даже от звонков мобильного телефона. Другим примером служит ввод в действие одной из подстанций города Липецка. Руководство подстанции потратило более полутора миллионов долларов на приобретение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, но проблемы с их применением полгода не позволяли запустить подстанцию. В итоге подстанцию запустили после использования комплекта традиционных защит.

Неустойчивая работа релейной защиты по причине недостаточной электромагнитной совместимости согласно данным «Мосэнерго» составляет до 10 % от всех случаев ложных срабатываний. Происходит это в основном из-за микроэлектронной и микропроцессорной элементной базы реле. Если для нарушения работы электромеханического реле требуется энергия 10^{-3} Дж, то нарушения работы интегральных микросхем вызывает всего 10^{-7} Дж. Разница может составлять 4 порядка. Неповторяющиеся сбои в работе релейной защиты с последующим восстановлением нарушенной функции превалируют в большинстве случаев. Нарушения функционирования такого рода составляют до 70 % от общего числа нарушений, причем 80 % этих сбоев происходит в интегральных микросхемах.

Самые мощные негативные воздействия на электрооборудование станций и подстанций, а также их аппаратуру оказывают грозовые разряды. Напряжение молнии может составлять до ста миллионов вольт. Даже остаточные импульсные потенциалы, наведенные в заземляющей системе и проникающие по кабелям на выходы электронной аппаратуры, представляют для нее серьезную опасность. Попав в аппаратуру по проводам или посредством электромагнитного поля, помеха претерпевает многочисленные превращения. Высокочастотная составляющая помехи обходит установленные фильтры и защитные элементы оборудования [74]. Помехи от разряда молнии могут проникнуть по металлическому заземлению и заземленным кабелям. Устройства заземления являются одним из самых распространенных элементов передачи электрических помех систем электроснабжения. Анализ результатов выполненных исследований показывает, что расчет уровня возможных электромагнитных помех необходимо определять с учетом заземляющих свойств строительных и технологических коммуникаций, трубопроводов и эстакад.

Оказывают влияние на элементы систем релейной защиты и автоматики,

выполненных на базе микропроцессоров, также коммутационные процессы и электромагнитные поля электрооборудования. В первую очередь к нему относятся: высоковольтные выключатели, разъединители, низковольтные резисторы, пускатели, контакторы, управляемые батареи конденсаторов, преобразователи частоты электроприводов. Пути воздействия помех могут быть разными. Это прямые индуцированные наводки низковольтных проводов и кабелей, а также импульсные и высокочастотные перенапряжения, возникающие в обмотках измери-

тельных трансформаторов [75]. Основные причинно-следственные возмущения электромагнитной совместимости микропроцессорных устройств представлены на рис. 8.

Наибольшие перенапряжения вызывают вакуумные выключатели, затем элегазовые, масляные и замыкают этот ряд воздушные выключатели. Происходит это потому, что чем меньше время горения дуги при размыкании высоковольтной цепи аппаратом, тем большую амплитуду будут иметь наведенные перенапряжения.



Рис. 8. Основные возмущения электромагнитной совместимости микропроцессорных устройств



Основным подходом борьбы с наведенными перенапряжениями служит использование элементов с нелинейными характеристиками. К таким элементам относятся: газовые разрядники, варисторы, полупроводниковые элементы аппаратов, полученные на основе стабилизаторов. Они включаются параллельно защищаемому объекту и «земле». Для этих целей используются также и резисторы с нелинейными характеристиками. Экранирование является основным средством защиты контрольных кабелей. Используют и правильный способ их прокладки в специальных кабельных лотках, с учетом возможного удаления от молниеотводов и силовых кабелей. Лотки используют: пластмассовые со вставками из алюминия, пластмассовые с напылением металла, алюминиевые. Экраны обладают двумя свойствами: поглощением энергии электромагнитных волн и отражением волны на границе раздела двух сред. Эти свойства зависят от частоты электромагнитной волны и материала экрана. Лучшее поглощение электромагнитной энергии осуществляют ферромагнитные материалы и их сплавы, а лучшее отражение электромагнитной волны выполняется диамагнитными материалами.

Наибольшее распространение получили экраны в виде медной сетки и различного вида профилей из алюминия. Улучшающее свойства экранирования кабелей — это прокладка параллельно трассе кабелей медной шины, заземленной с двух сторон, для выравнивания потенциалов. Можно использовать и заземление экрана кабеля с двух его сторон [76]. Из условий безотказности измерительные цепи относительно силовых цепей необходимо разделять экранированием и применять кабели с металлическим экраном.

Качество напряжения в питающей сети также в некоторых случаях сказывается на работе микропроцессорных устройств. В то же время микропроцессорные реле и средства автоматики достаточно долго сохраняют работоспособность при полных провалах напряжения питания вплоть до 40–20 % от номиналь-

ного напряжения. Происходит это потому, что в микропроцессорных реле и средствах автоматики используются импульсные источники питания. Источники оснащаются стабилизаторами, обеспечивающими глубокое фазоимпульсное регулирование, а также электролитическими конденсаторами с относительно большой емкостью. Их потребление электроэнергии по сравнению с электро-механическими устройствами очень мало. Наряду с положительными факторами внедрение в системы электроснабжения микропроцессорных средств релейной защиты и автоматики привело к появлению новых проблем. К ним относятся: требования к конструкции, параметрам и программному обеспечению; технико-экономический эффект замены электро-механических устройств на микропроцессорные; оптимальное количество функций в одном устройстве; необходимость резервирования; условия эксплуатации; критерии электромагнитной совместимости; надежность; влияние человеческого фактора.

Эти проблемы не имеют пока однозначных и четких решений, которые, на наш взгляд, должны осуществляться на теоретической базе. Так, на практике встречаются случаи, когда по параметрам хронометражных наблюдений определяются зависимости, характеризующие совместную работу оборудования, элементов узлов, электрических нагрузок и т.д. Однако установить параметры единиц оборудования, отдельных элементов, нагрузки приемников в производственных условиях оказывается невозможным. Их можно определить только аналитически, используя деление суммарного потока на потоки, отображающие единичные устройства. В этом случае немаловажной является стабилизация напряжения питания, использование устройств защиты от провалов напряжения и уровней перенапряжений, экранирование аппаратуры, применение заземляющего устройства, прокладка цепей управления и защиты с учетом минимального воздействия на них негативных факторов [77].



Результаты выполненного анализа свидетельствуют, что не все задачи, а тем более проблемы, связанные с воздействием негативных возмущающих факторов на функционирование систем электроснабжения, автоматики, релейной защиты и их оборудование, изучены в достаточной мере. Фундаментальных исследований в этой области вообще не проводилось. Поэтому методы, применяемые для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения, нуждаются в совершенствовании.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и управления образования и науки Липецкой области в рамках научного проекта 17-48-480083 р_а Оптимизация динамики и энергосбережение в электротехнических комплексах территориально-промышленных кластеров Липецкой области.

Библиографический список

1. Шпиганович, А.Н. Оценка оборудования по уровню надежности на примере систем электроснабжения сталеплавильных производств [Текст] / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 1. – С. 38-46.
2. Грачева, Е.И. Оптимизация проектирования систем электроснабжения с учетом возможных ситуаций и вероятностных параметров надежности [Текст] / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – №2. – С. 22-26.
3. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6–35 кВ [Текст] / Б.Н. Абрамович, С.А. Кабанов, А.В. Сергеев // Новости электротехники. – 2002. – №5 (17).
4. Синьчугов, Ф.И. Надежность электрических сетей энергосистем [Текст] / Ф.И. Синьчугов, – Москва: ЭНАС, 1998. – 328 с.
5. Миронов, И.М. Режим заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Нужно ли отказываться от компенсации емкостного тока на землю [Текст] / И.М. Миронов // Новости электротехники. – 2003. – №6 (24).
6. Коновалов, Е.Ф. Компенсация емкостного тока в сетях 6-35 кВ в России, Германии [Текст] / Е.Ф. Коновалов, Т.В. Захарова, Т. Фоман // Энергетик. – 2004. – №4. – С. 23-28.
7. Рихтер, И. Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях высокого напряжения [Текст] / И. Рихтер // Электричество. – 1961. – №11. – С 13-16.
8. Валеев, Г.С. Четырехстержневой дугогасящий реактор с подмагничиванием [Текст] / Г.С. Валеев, О.А. Петров, Е.Д. Панова // Электрические станции. – 1983. – №3. – С. 21-25.
9. Осипов, Э.Р. Сравнительный анализ способов заземления нейтрали в задаче подавления дуговых замыканий на землю [Текст] / Э.Р. Осипов, В.К. Обабков // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1988. – №3. – С 37-41.
10. Владимирский, Л.Л. Работа сетей напряжением 6-35 кВ с различными способами заземления нейтрали [Текст] / Л.Л. Владимирский, В.А. Кухтинов // Энергетик. – 2005. – № 4. – С. 23-27.
11. Малафеев, С.И. Защита электрической сети с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю [Текст] / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.В. Анчугин // Промышленная энергетика. – 2003. – №5. – С. 19-23.
12. Дубинчик, Е.А. Дугогасящие реакторы с плавной настройкой [Текст] / Е.А. Дубинчик, А.И. Тарасов // Энергетик. – 1970. – №2. – С. 23-27.
13. Сапунков, М.Л. Характеристики дугогасящего реактора с фазно-импульсным регулированием [Текст] / М.Л. Сапунков, В.С. Бондарчук, П.А. Долганов // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1983. – №5. – С.37-39.
14. ГОСТ 721-77–1978. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальное напряжение свыше 1000 В.
15. Ryan, H.M. High voltage engineering and testing [Text] / H.M. Ryan –London: The Institution of Electrical Engineers, 2001. – 759 p.
16. Шпиганович, А.Н. Внутризаводское электроснабжение и режимы [Текст] / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров. – Липецк: ЛГТУ, 2007. –759 с.
17. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защиты от них [Текст] / К.П. Кадомская, А.А. Лавров, А.А. Рейхердт. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 368 с.
18. Naidu, M.S. High voltage engineering [Text] / M.S. Naidu, V. Kamaraju. – New York: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1996. – 378 p.
19. Abdel-Salam, M. High-voltage engineering: theory and practice [Text] / M. Abdel-Salam [and other]. – New York: Marcel Dekker,



2000. – 725 p.

20. Лобастов, С.В. Исследование высоко-частотных переходных процессов в кабельных сетях 6-35 кВ при дуговых замыканиях на землю [Текст] / С.В. Лобастов // Электрик. – 2009. – №3. – С. 13-16.

21. Иванов, А.В. Анализ коммутационной способности элегазовых и вакуумных выключателей, установленных в сетях генераторного напряжения и собственных нужд блоков электрических станций [Текст] / А.В. Иванов, К.П. Кадомская // – Труды Третьей Всероссийской науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2004. – С. 81-90.

22. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения в сетях 6(10) кВ создаваемыми при коммутациях как вакуумными, так и элегазовыми выключателями [Электронный ресурс] / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков // Новости электротехники: информационно справочное издание. Режим доступа URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002.17.06.php> (дата обращения: 10.2.10). – 2002. – №5(17).

23. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6-35 кВ [Электронный ресурс] / Абрамович Б.Н. [и др.] // Новости электротехники: информационно справочное издание. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/17/05.php> (дата обращения: 10.02.10). – 2002. – №5(17).

24. Кадомская, К.П. Ограничение перенапряжений в электрических сетях, содержащих автономные источники питания и сетях генераторного напряжения [Текст] / К.П. Кадомская, Н.Ф. Петрова // – Труды Четвертой Всероссийской науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2006. – С. 84-90.

25. Stewart, S. Distribution switchgear [Text] / S. Stewart, – United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, – 2008. – 510 p.

26. Slade, P.G. The vacuum interrupter: theory, design, and application [Text] / P.G. Slade. – Slade New York: CRC press Taylors Francis Group, 2008. – 510 p.

27. Henry, J.C. The behavior of SF puffer circuit-breakers under exceptionally severe condition [Text] / J.C. Henry, G. Perrissin, C. Rollier // Cahier Technique Schneider Electric. – 2002. – №101. – 15 p.

28. Picot, P. Vacuum switching [Text] / P. Picot // Cahier Technique Schneider Electric. – 2000. – №198. – 32 p.

29. Качесов, В.Е. Перенапряжения и их ограничения заторможенных электродвигателей вакуумными выключателями [Текст] /

В.Е. Качесов // Электричество. – 2008. – №3. – С. 15-26.

30. Garzon, R.D. High voltage circuit breakers: design and application [Text] / R.D. Garzon. – New York: Marcel Dekker, 1996. – 365 p.

31. Крайчик, Ю.С. Гармоники неканонических порядков в схемах с управляемыми выпрямителями [Текст] / Ю.С. Крайчик // Энергетика и транспорт. – 1966. – №5. – С. 84-90.

32. Бош, В.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения с резонансными явлениями гармонических составляющих в сталеплавильных и прокатных производствах: монография / В.И. Бош. – Липецк: ЛГТУ, 2005. – 156 с.

33. Шпиганович, А.Н. Случайные импульсные потоки [Текст] / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, В.И. Бош, – Елец-Липецк, 2004. – 292 с.

34. Шпиганович, А.Н. Оценка надежности неразветвленных систем [Текст] / А.Н. Шпиганович // Горный журнал. Известия вузов. – 1983. – №5. – С. 52-64.

35. Шпиганович, А.Н. Случайные потоки в решении вероятностных задач [Текст] / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, В.И. Бош. – Липецк, 2003. – 224 с.

36. Rioual, P. Impact of the distribution and transmission systems of harmonic current injection due to capacitive load rectifiers in commercial, residential and industrial installations [Text] / P. Rioual, T. Deflandre // EPE Sevilla. – 1995. – №3. – P. 503-508.

37. Daniel, S.D. Quality enhances reliability [Text] / S.D. Daniel, S. Ashok // Spectrum IEEE. – 1996. – №2. – P. 38-44.

38. Maksimovic, D. Fundamentals of power electronics [Text] / D. Maksimovic, R.W. Erickson. – New York: Kluwer Academic, 2004. – 900 p.

39. Peng, F.Z. A new approach to harmonic compensation power system [Text] / F.Z. Peng, H. Akagi, S. Koga. – IEEE IAS 23-th Annu. Meet.,Pittsburg, 1998. – 215 p.

40. Rivas, D. Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques [Text] / D. Rivas, L. Moran // ITTT transactions on industrial electronics. – 2003. – №1. – P 161-170.

41. Gyugyi, L. Power filters [Text] / L. Gyugyi, E.C. Stricula // IEEE IAS, Annu. Meet., Ind. – 1976. – P. 529-535.

42. Akagi, H. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components [Text] / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans.



on IA, IA-20, – 1984. – №3. – P.625-630.

43. Akagi, H. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits [Text] / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // Proc. IPEC-Tokyo83 Int. Conf. Power Electronics. – P. 1375-1386.

44. Akagi, H. Generalized theory of instantaneous reactive power and its application [Text] / H. Akagi, Y. Kanazawa, K. Fujita // Electrical Engineering in Japan. – 1983. – №103. – P.58-66.

45. Benghanem, M. A new harmonics elimination method applied to a static VAR compensator using a three level inverter [Text] / M. Benghanem, A. Draou // Leonardo Journal of Sciences. – 2005. – №6. – P.1-16.

46. Benghanem, M. Technique of Harmonics Elimination Method Applied to an N.P.C. Topology Three Level Inverter [Text] / M. Benghanem, A. Draou, A. Tahri // International Conference on Communication, Computer & Power (ICCCP), Muscat Sultanate of Oman, – 2001.

47. Mazari, B. Fuzzy Hysteresis Control and Parameter Optimization of a Shunt Active Power Filter [Text] / B. Mazari, F. Mekri // Journal of information science and engineering. – 2005. – №21. – P.1139-1156.

48. Bose, B.K. An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage fed PWM inverter for machine drive system [Text] / B.K. Bose // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1990. – №37. – P.402-408.

49. Abdeslam, D.O. Neural Approach for the Control of an Active Power Filter [Text] / D.O. Abdeslam, P. Wira, J. A. Mercle // 5th international Power Electronics Conference (IPEC2005). – 2005.

50. Bansal, R.C. Artificial Intelligence Techniques for Reactive Power/ Voltage Control in Power Systems: A Review [Text] / R.C. Bansal, T.S. Bhatti, D.P. Kothari // International Journal of Power and Energy Systems. – 2003. – №23. – P.81-89.

51. Stacey, E.J. Hybrid power filters [Text] / E.J. Stacey // IEEE IAS, Annu meet. – 1977. – P.1133-1140.

52. Akagi, H. New Trends in Active filters for Power Conditioning / H. Akagi // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. – 1996. – №6. – P.1312-1322.

53. Yu-Long, C. Simulation and reliability analysis of shunt active power theory [Text] / C. Yu-Long, L. Hong, W. Jing-Gin // Journal of Zhejiang University Science. – 2007. – №3. – P.416-421.

54. Ajami, A. Hosseini S.H. Implementation of

a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter. / A. Ajami, S.H. Hosseini // Ecti transactions on electrical eng.,electronics and communications. – 2006. – №1. – P.40-46.

55. Erickson, R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers [Text] / R.W. Erickson // First International Conference on Energy, Power, and Motion Control. – 1997. – P.1-6.

56. Graovac, D. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner / D. Graovac, V. Katic, A. Rufer // 9th international conference on power electronics and motion control. – 2000. – №4. – P.32-38.

57. Gaiceanu, M. Active power compensator of the current harmonics based on the instantaneous power theory [Text] / M. Gaiceanu // The annals of dunarea de jos university of galati fascicle III. – 2005. – P.23-28.

58. Vleeschauwer, V. Current waveform control of a three-phase AC-DC converter with resistive shunt harmonic impedance behavior [Text] / V. Vleeschauwer, K.D. Gusseme, W.R. Ryckaert // 3rd Benelux young researchers Symposium in electrical power engineering. Ghent, – 2006. – №41. – P.1-5.

59. Singh, B. Active power filter with sliding mode control [Text] / B. Singh, K. Al-haddad, A. Chandra // IEEE Proc.-Gener. – 1997. – №6 – P. 564-568.

60. Fujita, H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power system [Text] / H. Fujita, T. Yamasaki // IEEE transactions on power IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 15, No. 2, pp. 215-222, 2000.

61. Тонг, Й.К. Конструкция высоковольтных ограничителей перенапряжения в полимерном корпусе [Текст] / Й.К. Тонг, И.А. Маркелов // Энергетик. – 2004. – №5. – С. 38-39.

62. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6-35 [Текст] / Б.Н. Абрамович, С.И. Кабанов, А.Н. Сергеев // Новости электротехники. – 2002. – №5.

63. Лычковский, Г.И. Микропроцессорная токовая защита шин 6-10 кВ [Текст] / Г.И. Лычковский // Электрик – 2003. – №10 – С. 34-37.

64. Фишман, В.С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий [Текст] / В.С. Фишман // Новости электротехники. – 2004. – №5(29).

65. Черных, И.А. Провалы напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / И.А. Черных, И.Г. Шилов // Вести высших учебных заведений



Черноземья. – 2005. – №1. – С. 27-29.

66. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях [Текст] / А.Н. Шпиганович, И.А. Черных, И.Г. Шилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2006. – №1.

67. Пупин В.М. Устройства защиты от провалов напряжения // Приложение к журналу Энергетик. – 2011. – №5(149).

68. Бородин, Б.Н. Системный подход к повышению надежности электроснабжения потребителей Оскольского электрометаллургического комбината [Текст] / Б.Н. Бородин, В.М. Пупин, М.С. Егорова // Промышленная энергетика. – 2008. – №11. – С. 32-36.

67. ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения».

68. ГОСТ 27.003–89 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности».

69. РД 50.656–88 «Расчеты безотказности восстанавливаемых систем».

70. РД 50.690–89 «Оценка показателей надежности по экспериментальным данным».

71. Андреев, Р.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст] / Р.А. Андреев. – М: Высшая школа, 2006. – 639 с.

72. Иванов, Е.И. Проблемы диагностирования изоляции электроустановок напряжением 6 кВ и выше [Текст] / Е.И. Иванов // Новости электротехники. – 2001. – №3(9).

73. Гуревич, В. Проблемы выходных реле, используемые в микропроцессорных устройствах релейной защиты [Текст] / В. Гуревич // Электрические сети и системы. – 2007. – №1. – С. 66-74.

74. Шилов, И.Г. Имитационная модель Устройства динамической компенсации перенапряжений [Текст] / И.Г. Шилов, В.И. Зацепина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 379-389.

75. Шпиганович, А.Н. О восстановлении электроснабжения при кратковременных провалах напряжения [Текст] / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, И.Г. Шилов // Промышленная энергетика. – 2008. – №10. – С. 15-17.

76. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях [Текст] / А.Н. Шпиганович, И.А. Черных, И.Г. Шилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2006. – №1. – С. 16-19.

77. Шпиганович, А.Н. Случайные потоки в решении вероятностных задач [Текст] / Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бош В.И. – Липецк: ЛГТУ, 2003. – 224 с.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 3, pp. 47-73

Title:	STATE OF THE ISSUE OF THE POWER SUPPLY SYSTEM'S RELIABILITY
Author 1:	<i>Name & Surname: Aleksandr N. Shpiganovich</i> <i>Company: Lipetsk State Technical University (LSTU)</i> <i>Address: 30, Moskovskaya st., Lipetsk, Russia, 398600</i> <i>Scientific Degree: Dr. Sci. (Tech.)</i> <i>Work Position: Head of the Electrical Equipment Department, Professor</i> <i>Contacts: kaf-eo@stu.lipetsk.ru</i>
Author 2:	<i>Name & Surname: Alla A. Shpiganovich</i> <i>Company: Lipetsk State Technical University (LSTU)</i> <i>Address: 30, Moskovskaya st., Lipetsk, Russia, 398600</i> <i>Scientific Degree: Dr. Sci. (Tech.)</i> <i>Work Position: Professor</i>
Author 3:	<i>Name & Surname: Violetta I. Zatsepina</i> <i>Company: Lipetsk State Technical University (LSTU)</i> <i>Address: 30, Moskovskaya st., Lipetsk, Russia, 398600</i> <i>Scientific Degree: Dr. Sci. (Tech.)</i> <i>Work Position: Professor</i>
Author 4:	<i>Name & Surname: E.P. Zatsepin</i> <i>Company: Lipetsk State Technical University (LSTU)</i> <i>Address: 30, Moskovskaya st., Lipetsk, Russia, 398600</i> <i>Scientific Degree: Cand. Sci. (Tech.)</i> <i>Work Position: Associate Professor</i>
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-3-47-73

**Abstract:**

The electric power system of the Russian Federation was most developed in the 80-90s of the last century, after which there was an almost twofold decline in the generation and transmission of electrical energy in the system with subsequent growth. The main problem of fuel and energy complexes is the progressive aging of fixed production assets in conditions of increasing energy consumption requirements, which is a source of increased risk of major accidents. In this case, negative disturbances can arise both in the system itself and be external to it and can lead not only to a low quality of electrical energy but also to interruptions in power supply. The studies carried out to date are devoted to a quantitative assessment of the reliability of power supply systems and their equipment and do not take into account the effects of electrical equipment failures on the characteristics of production processes and the operation of technological machines. To consider the reliability of power supply systems in isolation from the operation of other systems (technological, relay protection, automation, ventilation, dewatering, etc.) means not to use the whole range of measures aimed at improving the reliability of electricity supply, as a result it is impossible to ensure the optimum level of reliability of electricity supply. Reliability of the power supply system must be evaluated taking into account the interaction of electrical equipment with the equipment of all production systems. The problem of increasing the efficiency of the functioning of industrial enterprises by optimizing the parameters of the reliability of power supply systems is topical and of great economic importance.

Keywords:

power supply system, reliability, negative indignations

References:

1. Shpiganovich A.N. Ocenka oborudovaniya po urovnju nadezhnosti na primere sistem jelektrosnabzheniya staleplavil'nyh proizvodstv [*Evaluation of the product at the level of reliability on the example of power steelmaking*]. A.N. Shpiganovich, A.A. Shpiganovich, E.P. Zatsepin. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region, 2017, no. 1, pp. 38-46.
2. Gracheva E.I. Optimizacija proektirovaniya sistem jelektrosnabzheniya s uchetom vozmozhnyh situacij i verojatnostnyh parametrov nadezhnosti [*Optimization of the design of power supply systems taking into account possible situations and probabilistic reliability parameters*]. Gracheva E.I., Sadykov R.R. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region, 2017, no. 2, pp. 22-26.
3. Abramovich B.N. Perenaprjazheniya i jelektromagnitnaja sovместimost' oborudovaniya jelektricheskikh setej 6–35 kV [*Overvoltage and electromagnetic compatibility of equipment of electric networks 6–35 kV*]. B.N. Abramovich, S.A. Kabanov, A.V. Sergeev. Novosti jelektrotehniki, 2002, no. 5(17).
4. Sin'chugov F.I. Nadezhnost' jelektricheskikh setej jenergosistem [*Reliability of power grids*]. F.I. Sin'chugov. Moscow, JeNAS, 1998, 328 p.
5. Mironov I.M. Rezhim zazemleniya nejtrali v setjah 6 35 kV. Nuzhno li otkazyvat'sja ot kompensacii emkostnogo toka na zemlju [*Ground neutral mode in networks of 6–35 kV. Is it necessary to refuse compensation of the capacitive current to ground*]. I.M. Mironov. Novosti jelektrotehniki, 2003, no. 6(24).
6. Konovalov E.F. Kompensacija emkostnogo toka v setjah 6–35 kV v Rossii, Germanii [*Compensation of the capacitive current in 6-35 kV networks in Russia, Germany*]. E.F. Konovalov, T.V. Zaharova, T. Foman. Jenergetik, 2004, no. 4, pp. 23-28.
7. Rihte I. Kompensacija emkostnyh tokov zamykanija na zemlju v stjah vysokogo naprjazhenija [*Compensation of capacitive earth fault currents in high voltage networks*]. I. Rihter. Jelektrichestvo, 1961, no. 11, pp. 13-16.
8. Valeev G.S. Chetyrehsterzhnevoj dugogasjashhij reaktor s podmagnichivaniem [*Four-rod arc-suppression reactor with bias*]. G.S. Valeev, O.A. Petrov, E.D. Panova. Jelektricheskie stancii, 1983, no. 3, pp. 21-25.
9. Osipov Je.R. Sravnitel'nyj analiz sposobov zazemleniya nejtrali v zadache podavlenija dugovyh zamykanij na zemlju [*Comparative analysis of neutral grounding methods in the problem of suppressing arc faults on the ground*]. Je.R. Osipov, V.K. Obabkov. News of the Higher Institutions. Mining Journal,



- 1988, no. 3, pp. 37-41.
10. Vladimirskij L.L. Rabota setej naprjazheniem 6–35 kV s razlichnymi sposobami zazemlenija nejtrali [*Operation of 6-35 kV networks with various neutral grounding methods*]. L.L. Vladimirskij, V.A. Kuhtinov. Jenergetik, 2005, no. 4, pp. 23-27.
11. Malafeev S.I. Zashhita jelektricheskoy seti s izolirovannoj nejtral'ju pri odnofaznyh zamykanijah na zemlju [*Protection of an electrical network with an isolated neutral with single-phase earth faults*]. S.I. Malafeev, V.S. Mamaj, A.V. Anchugin. Promyshlennaja jenergetika, 2003, no. 5, pp. 19-23.
12. Dubinchik E.A. Dugogashashhie reaktory s plavnoj nastrojkoj [*Arc-suppression reactors with smooth tuning*]. E.A. Dubinchik, A.I. Tarasov. Jenergetik, 1970, no. 2, pp. 23-27.
13. Sapunkov, M.L. Harakteristiki dugogashashhego reaktora s fazno-impul'snym regulirovaniem [*Characteristics of an arc extinguishing reactor with phase-pulse control*]. M.L. Sapunkov, V.S. Bondarchuk, P.A. Dolganov. News of the Higher Institutions. Mining Journal, 1983, no. 5, pp. 37-39.
14. GOST 721-77–1978. Sistemy jelektrosnabzhenija, seti, istochniki, preobrazovateli i priemniki jelektricheskoy jenerгии. Nominal'noe naprjazhenie svyshe 1000 V. [*State Standard 721-77–1978. Power supply systems, networks, sources, converters and receivers of electric energy. Rated voltage over 1000 V.*] Moscow, Publ. IPK Izdatel'stvo Standartov, 1978, 3 p.
15. Ryan H.M. *High voltage engineering and testing*. H.M. Ryan. London, The Institution of Electrical Engineers, 2001, 759 p.
16. Shpiganovich A.N. Vnutrizavodskoe jelektrosnabzhenie i rezhimy [*Intra-plant power supply and modes*]. A.N. Shpiganovich, K.D. Zaharov. Lipetsk, LSTU, 2007, 759 p.
17. Kadomskaja K.P. Perenaprjazhenija v jelektricheskikh setjah razlichnogo naznachenija i zashhity ot nih [*Overvoltages in electrical networks of various purposes and protection from them*]. K.P. Kadomskaja, A.A. Lavrov, A.A. Rejherdt. Novosibirsk, NSTU, 2004, 368 p.
18. Naidu M.S. *High voltage engineering*. M.S. Naidu, V. Kamarju. New York, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1996, 378 p.
19. Abdel-Salam M. *High-voltage engineering: theory and practice*. M. Abdel-Salam [and other]. New York, Marcel Dekker, 2000, 725 p.
20. Lobastov S.V. Issledovanie vysokochastotnyh perehodnyh processov v kabel'nyh setjah 6–35 kV pri dugovyh zamykanijah na zemlju [*Investigation of high-frequency transients in cable networks 6-35 kV with arc faults on the ground*]. S.V. Lobastov. Jelektrik, 2009, no. 3, pp. 13-16.
21. Ivanov A.V. Analiz kommutacionnoj sposobnosti jelegazovyh i vakuumnyh vykljuchatelej, ustanovlennyh v setjah generatornogo naprjazhenija i sobstvennyh nuzhd blokov jelektricheskikh stancij [*Analysis of the switching capacity of gas-insulated and vacuum circuit breakers installed in generator voltage networks and auxiliary needs of power station units*]. A.V. Ivanov, K.P. Kadomskaja. Trudy Tretej Vserossijskoj nauch.-tehn. konf. [*Proc. 3rd All-Russian Sci. and Tech. conf.*]. Novosibirsk, 2004, pp. 81-90.
22. Evdokunin G.A. Perenaprjazhenija v setjah 6(10) kV sozdavaemymi pri kommutacijah kak vakuumnymi, tak i jelegazovymi vykljuchateljami [*Overvoltages in 6 (10) kV networks created by switching both vacuum and SF6 circuit-breakers*]. Electronic resource. G.A. Evdokunin, S.S. Titenkov. Novosti jelektrotehniki: informacionno spravochnoe izdanie, 2002, no. 5(17). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002.17.06.php>.
23. Abramovich B.N. Perenaprjazhenija i jelektromagnitnaja sovmestimost' oborudovanija jelektricheskikh setej 6-35 kV [*Overvoltage and electromagnetic compatibility of electrical equipment 6-35 kV*]. Abramovich B.N., et. al. Novosti jelektrotehniki: informacionno spravochnoe izdanie, 2002, no. 5(17). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/17/05.php>.
24. Kadomskaja K.P. Ogranichenie perenaprjazhenij v jelektricheskikh setjah,



- soderzhashhih avtonomnye istochniki pitaniya i setjah generatornogo naprjazhenija [*Limitation of overvoltages in electrical networks containing autonomous power supplies and generator voltage networks*]. K.P. Kadomskaja, N.F. Petrova. Trudy Chetvertoj Vserossijskoj nauch.-tehn. konf. [*Proc. 4th All-Russian Sci. and Tech. conf.*]. Novosibirsk, 2006, pp. 84-90.
25. Stewart S. *Distribution switchgear*. S. Stewart. United Kingdom, The Institution of Engineering and Technology, 2008, 510 p.
26. Slade P.G. *The vacuum interrupter: theory, design, and application*. P.G. Slade. New York, CRC press Taylors Francis Group, 2008, 510 p.
27. Henry J.C. *The behavior of SF puffer circuit-breakers under exceptionally severe condition*. J.C. Henry, G. Perrissin, C. Rollier. Cahier Technique Schneider Electric, 2002, no. 101, 15 p.
28. Picot P. *Vacuum switching*. P. Picot. Cahier Technique Schneider Electric, 2000, no. 198, 32 p.
29. Kachesov V.E. Perenaprjazhenija i ih ogranichenija zatormozhennyh jelektroprivigatelej vakuumnymi vykljuchateljami [*Overvoltages and their limitations on braked electric motors by vacuum switches*]. V.E. Kachesov. Jelektrichestvo, 2008, no. 3. pp. 15-26.
30. Garzon R.D. *High voltage circuit breakers: design and application*. R.D. Garzon. New York, Marcel Dekker, 1996, 365 p.
31. Krajchik, Ju.S. Garmoniki nekanonicheskikh porjadkov v shemah s upravljaemyimi vyprjamiteljami [*Harmonics of non-canonical orders in circuits with controlled rectifiers*]. Ju.S. Krajchik. Jenergetika i transport, 1966, no. 5, pp. 84-90.
32. Bosh V.I. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija sistem jelektrosnabzhenija s rezonansnymi javlenijami garmonicheskikh sostavljajushhih staleplavil'nyh i prokatnyh proizvodstvah. [*Increase of efficiency of functioning of systems of electron supply with resonant phenomena of harmonic components in steelmaking and rolling manufactures*]. V.I. Bosh. Lipetsk, LSTU, 2005, 156 p.
33. Shpiganovich A.N. Sluchajnye impul'snye potoki [*Random pulse streams*]. A.N. Shpiganovich, A.A. Shpiganovich, V.I. Bosh. Yelets-Lipetsk, 2004, 292 p.
34. Shpiganovich A.N. Ocenka nadezhnosti nerazvetvlennyh sistem [*Evaluation of the reliability of unbranched systems*]. A.N. Shpiganovich. News of the Higher Institutions. Mining Journal, 1983, no. 5, pp. 52-64.
35. Shpiganovich A.N. Sluchajnye potoki v reshenii verojatnostnyh zadach [*Random flows in the solution of probabilistic problems*]. A.N. Shpiganovich, A.A. Shpiganovich, V.I. Bosh. Lipetsk, 2003. – 224 p.
36. Rioual P. *Impact of the distribution and transmission systems of harmonic current injection due to capacitive load rectifiers in commercial, residential and industrial installations*. P. Rioual, T. Deflandre. EPE Sevilla, 1995, no. 3, pp. 503-508.
37. Daniel S.D. *Quality enhances reliability*. S.D. Daniel, S. Ashok. Spectrum IEEE, 1996, no. 2, pp. 38-44.
38. Maksimovic D. *Fundamentals of power electronics*. D. Maksimovic, R.W. Erickson. New York, Kluwer Academic, 2004, 900 p.
39. Peng F.Z. *A new approach to harmonic compensation power system*. F.Z. Peng, H. Akagi, S. Koga. IEEE IAS 23-th Annu. Meet., Pittsburg, 1998, 215 p.
40. Rivas D. *Improving Passive Filter Compensation Performamce With Active Techniques*. D. Rivas, L. Moran. ITTT transactions on industrial electronics, 2003, no. 1, pp. 161-170.
41. Gyugyi, L. *Power filters*. L. Gyugyi, E.C. Stricula. IEEE IAS, Annu. Meet., Ind, 1976, pp. 529-535.
42. Akagi H. *Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components*. H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. IEEE Trans. on IA, IA-20, 1984, no. 3, pp. 625-630.



43. Akagi H. *Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits*. H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Proc. IPEC-Tokyo83 Int. Conf. Power Electronics, pp. 1375-1386.
44. Akagi H. *Generalized theory of instantaneous reactive power and its application*. H. Akagi, Y. Kanazawa, K. Fujita. Electrical Engineering in Japan, 1983, no. 103, pp. 58-66.
45. Benghanem M. *A new harmonics elimination method applied to a static VAR compensator using a three level inverter*. M. Benghanem, A. Draou. Leonardo Journal of Sciences, 2005, no. 6, pp. 1-16.
46. Benghanem M. *Technique of Harmonics Elimination Method Applied to an N.P.C. Topology Three Level Inverter*. M. Benghanem, A. Draou, A. Tahri. International Conference on Communication, Computer & Power (ICCCP), Muscat Sultanate of Oman, 2001.
47. Mazari B. *Fuzzy Hysteresis Control and Parameter Optimization of a Shunt Active Power Filter*. B. Mazari, F. Mekri. Journal of information science and engineering, 2005, no. 21, pp. 1139-1156.
48. Bose B.K. *An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage fed PWM inverter for machine drive system*. B.K. Bose. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1990, no. 37, pp. 402-408.
49. Abdeslam D.O. *Neural Approach for the Control of an Active Power Filter*. D.O. Abdeslam, P. Wira, J.A. Merclé. 5th international Power Electronics Conference (IPEC2005), 2005.
50. Bansal R.C. *Artificial Intelligence Techniques for Reactive Power. Voltage Control in Power Systems: A Review*. R.C. Bansal, T.S. Bhatti, D.P. Kothari. International Journal of Power and Energy Systems, 2003, no. 23, pp. 81-89.
51. Stacey E.J. *Hybrid power filters*. E.J. Stacey. IEEE IAS, Annu meet, 1977, pp. 1133-1140.
52. Akagi H. *New Trends in Active filters for Power Conditioning*. H. Akagi. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 1996, no. 6, pp. 1312-1322.
53. Yu-Long C. *Simulation and reliability analysis of shunt active power theory*. C. Yu-Long, L. Hong, W. Jing-Gin. Journal of Zhejiang University Science, 2007, no. 3, pp. 416-421.
54. Ajami A. Hosseini S.H. *Implementation of a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter*. A. Ajami, S.H. Hosseini. Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications, 2006, no. 1, pp. 40-46.
55. Erickson R.W. *Some Topologies of High Quality Rectifiers*. R.W. Erickson. First International Conference on Energy, Power, and Motion Control, 1997, pp. 1-6.
56. Graovac D. *Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner*. D. Graovac, V. Katic, A. Rufer. 9th international conference on power electronics and motion control, 2000, no. 4, pp. 32-38.
57. Gaiceanu M. *Active power compensator of the current harmonics based on the instantaneous power theory*. M. Gaiceanu. The annals of dunarea de jos university of galati fascicle III, 2005, pp. 23-28.
58. Vleeschauwer V. *Current waveform control of a three-phase AC-DC converter with resistive shunt harmonic impedance behavior*. V. Vleeschauwer, K.D. Gusseme, W.R. Ryckaert. 3rd Benelux young researchers Symposium in electrical power engineering. Ghent, 2006, no. 41, pp. 1-5.
59. Singh B. *Active power filter with sliding mode control*. B. Singh, K. Alhaddad, A. Chandra. IEEE Proc.-Gener, 1997, no. 6, pp. 564-568.
60. Fujita H. *A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power system*. H. Fujita, T. Yamasaki. IEEE transactions on power IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 215-222.
61. Tong J.K. *Konstrukcija vysokovol'nyh ogranichitelej perenaprjazhenija v polimernom korpuse [Design of high-voltage surge arresters in a polymer enclosure]*. J.K. Tong, I.A. Markelov. Jenergetik, 2004, no. 5, pp. 38-39.



62. Abramovich B.N. Perenaprjazhenija i jelektromagnitnaja sovместimost' oborudovanija jelektricheskikh setej 6–35 [*Overvoltage and electromagnetic compatibility of electrical network equipment 6–35*]. B.N. Abramovich, S.I. Kabanov, A.N. Sergeev. *Novosti jelektrotehniki*, 2002, no. 5.
63. Lychkovskij G.I. Mikroprocessornaja tokovaja zashhita shin 6–10 kV [*Microprocessor current protection of 6-10 kV buses*]. G.I. Lychkovskij. *Jelektrik*, 2003, no. 10, pp. 34-37.
64. Fishman V.S. Provaly naprjazhenija v setjah promyshlennyh predpriyatij [*Voltage dips in the networks of industrial enterprises*]. V.S. Fishman. *Novosti jelektrotehniki*, 2004, no. 5(29).
65. Chernyh I.A. Provaly naprjazhenija v sistemah jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij [*Voltage dips in industrial power supply systems*]. I.A. Chernyh, I.G. Shilov. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja*, 2005, no. 1, pp. 27-29.
66. Shpiganovich A.N. Provaly naprjazhenija v vysokovol'tnyh jelektricheskikh setjah [*Voltage dips in high-voltage electrical networks*]. A.N. Shpiganovich, I.A. Chernyh, I.G. Shilov. *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2006, no. 1.
67. Pupin V.M. Ustrojstva zashhity ot provalov naprjazhenija. The app. to the journal *Jenergetik*, 2011, no. 5(149).
68. Borodin B.N. Sistemnyj podhod k povysheniju nadezhnosti jelektrosnabzhenija potrebitelej Oskol'skogo jelektrometallurgicheskogo kombinata [*A systematic approach to improving the reliability of power supply for consumers of the Oskol Electrometallurgical Combine*] / B.N. Borodin, V.M. Pupin, M.S. Egorova. *Promyshlennaja jenergetika*, 2008, no. 11, pp. 32-36.
69. GOST 27.002–89. Nadezhnost' v tehnikе. Osnovnye ponjatija, terminy i opredelenija». [*State Standard 27.002–89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions*]. Moscow, Publ. IPK Izdatel'stvo Standartov, 1990, 24 p.
70. GOST 27.003–89. Nadezhnost' v tehnikе. Sostav i obshhie pravila zadanija trebovanij po nadezhnosti. [*State Standard 27.003–89. Industrial product dependability. Dependability requirements: contents and general rules for specifying*]. Moscow, Publ. IPK Izdatel'stvo Standartov, 1992, 20 p.
71. RD 50.656-88. Raschety bezotkaznosti vosstanavlivaemyh sistem. [*Guidance document 50.656-88. Calculations of fail-safe recovery systems*]. Moscow, Publ. IPK Izdatel'stvo Standartov, 1988, 22 p.
72. RD 50.690-89. Ocenka pokazatelej nadezhnosti po jeksperimental'nym dannym. [*Guidance document 50.690-89. Evaluation of reliability indicators from experimental data*]. Moscow, Publ. IPK Izdatel'stvo Standartov, 1990, 132 p.
73. Andreev R.A. Relejnaja zashhita i avtomatika sistem jelektrosnabzhenija [*Relay protection and automation of power supply systems*]. R.A. Andreev. Moscow, Vysshaya Shkola Publishers, 2006, 639 p.
74. Ivanov E.I. Problemy diagnostirovanija izoljacii jelektrostanovok naprjazheniem 6 kV i vyshe [*Problems of diagnosing insulation of electrical installations with a voltage of 6 kV and higher*]. E.I. Ivanov. *Novosti jelektrotehniki*, 2001, no. 3(9).
75. Gurevich V. Problemy vyhodnyh rele, ispol'zuemye v mikroprocessornyh ustrojstvah relejnoj zashhity [*Problems of output relays used in microprocessor-based relay protection devices*]. V. Gurevich. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2007, no. 1, pp. 66-74.
76. Shilov I.G. Imitacionnaja model' Ustrojstva dinamicheskoy kompensacii perenaprjazhenij [*Simulation model Dynamic overvoltage compensation devices*]. I.G. Shilov, V.I. Zacepina. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nogo Vostoka*, 2009, no. 1, pp. 379-389.
77. Shpiganovich A.N. O vosstanovlenii jelektrosnabzhenija pri kratkovremennyh provalah naprjazhenija [*On the restoration of power supply*



- during short-term voltage failures]. A.N. Shpiganovich, V.I. Zatsepina, I.G. Shilov. *Promyshlennaja jenergetika*, 2008, no. 10, pp. 15-17.
78. Shpiganovich A.N. Provaly naprjazhenija v vysokovol'tnyh jelektricheskijh setjah [*Voltage dips in high-voltage electrical networks*]. A.N. Shpiganovich, I.A. Chernyh, I.G. Shilov. *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2006, no. 1, pp. 16-19.
79. Shpiganovich A.N. Sluchajnye potoki v reshenii verojatnostnyh zadach [*Random flows in the solution of probabilistic problems*]. A.N. Shpiganovich, A.A. Shpiganovich, V.I. Bosh. *Lipetsk, LSTU*, 2003, 224 p.