

Методика обработки статистической информации о провалах и кратковременных прерываниях напряжения в электрических сетях

СОЛОДОВНИКОВ В.Е., ТУЛЬСКИЙ В.Н., ШАМОНОВ Р.Г.

Предложена методика обработки статистической информации по провалам и кратковременным прерываниям напряжения. Методика основана на разделении исходной совокупности зафиксированных в точке электрической сети провалов и кратковременных прерываний напряжения на критические и некритические, исходя из требований действующих нормативных документов к помехоустойчивости технических средств. На основании характеристик каждого критического провала и кратковременного прерывания напряжения для точки электрической сети осуществляется расчет ряда показателей, позволяющих сформировать предварительный перечень проектных решений по ограничению воздействия рассматриваемых явлений. Предложенные показатели имеют ясную физическую трактовку, позволяют в дальнейшем в укрупненном виде оценить требуемые характеристики оборудования и дают возможность провести предварительное технико-экономическое сопоставление разработанных предварительных вариантов проектных решений. Приведены результаты апробации предложенной методики на примере отдельных точек контроля качества электроэнергии в сетях 6–220 кВ четырёх региональных энергосистем России.

Ключевые слова: системы электроснабжения, проектирование, качество электроэнергии, провалы напряжения, прерывания напряжения, статистические данные

Обеспечение качества электрической энергии (КЭ) является одной из важнейших задач в условиях существующей рыночной модели экономических отношений в электроэнергетике России. Представленный в [1] анализ результатов измерений показателей КЭ, проведенных в последние годы в электрических сетях 0,4–220 кВ, показывает, что как для распределительного, так и для магистрального электросетевого комплекса ЕЭС России в целом характерно систематическое и массовое невыполнение требований действующего ГОСТ [2]. В таких условиях становится очевидной необходимость учета текущей ситуации в области КЭ и анализа соответствующих ретроспективных данных при разработке проектных решений, связанных как с технологическим присоединением потребителей к электрическим сетям, так и с перспективным развитием систем внешнего и внутреннего электроснабжения уже существующих потребителей.

Особые трудности при анализе показателей КЭ вызывают стохастические события, практически не поддающиеся прогнозированию и не нормируемые в настоящее время, но прямо влияющие на количество и перечень необходимого к установке оборудования и, соответственно, применяемые схемные решения. К подобным событиям в первую очередь следует отнести провалы и прерывания напряжения. В связи с этим целесообразно разработать ме-

тодику обработки статистической информации по провалам и прерываниям напряжения, позволяющую облегчить процесс формирования предварительных проектных решений по ограничению их воздействия на технические средства (ТС) потребителя.

Учитывая тот факт, что опубликованной на текущий момент фактической информации о частоте возникновения и характеристиках провалов и прерываний напряжения недостаточно для оценки масштаба их проявления в электросетевом хозяйстве России, необходимо также частично восполнить данный недостаток, для чего в статье представлены результаты апробации предлагаемой методики по данным наблюдений за двухлетний ретроспективный период по отдельным точкам контроля КЭ 6–220 кВ четырёх региональных энергосистем.

Актуальность учета провалов и прерываний напряжения при проектировании систем электроснабжения. Физическая сущность провалов и прерываний напряжения состоит во внезапном снижении среднеквадратичного значения напряжения ниже определенного порогового уровня, за которым следует его восстановление до первоначального или порогового уровня через определенный промежуток времени [3]. Таким образом, рассматриваемые явления характеризуются двумя основными пара-

метрами: значением остаточного напряжения и длительностью.

Согласно [2] под «провалом напряжения» следует понимать временное уменьшение напряжения хотя бы в одной фазе в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения, которое принимается равным 90% опорного напряжения; предельная длительность провала – 1 мин. Термином «прерывание напряжения», в свою очередь, характеризуется ситуация, при которой напряжение во всех фазах снижается до значения меньше 5% опорного напряжения. В качестве опорного напряжения чаще всего принимается соответствующее номинальное напряжение. Прерывания напряжения по причине возникновения разделяются на преднамеренные и случайные, а по продолжительности – на кратковременные (длительностью не более 3 мин) и длительные (свыше 3 мин). В статье рассмотрены только случайные прерывания напряжения.

Следует особо отметить, что провалы и прерывания напряжения неизбежно сопровождают эксплуатацию любой электрической сети, так как их возникновение вызвано общими причинами, среди которых [2–4]:

погодные явления (в первую очередь – грозовая деятельность);

возникновение коротких замыканий в электрической сети;

отказы электросетевого оборудования;

ошибки оперативного персонала;

ложные срабатывания устройств РЗА;

броски тока, связанные с подключением мощной нагрузки (например, пуск мощных электродвигателей).

Возникновение провалов и прерываний напряжения на вводах электроприёмников, чувствительных к кратковременным изменениям уровня питающего напряжения (полупроводниковая преобразовательная техника бытового и промышленного назначения, приводные электродвигатели ряда механизмов, телекоммуникационные устройства и т.д. [4]), может приводить к нарушению их нормального функционирования и, следовательно, к убыткам у потребителя. При этом могут возникать как прямые убытки, вызванные необходимостью замены поврежденного оборудования и/или восстановления сложного производственного процесса, так и упущенная выгода за счет недоотпущенных объемов продукции и/или неоказанных услуг. Результаты зарубежных исследований [5, 6] показывают, что значения суммарного экономического ущерба только от провалов напряжения составляли:

для Норвегии – от 120 до 440 млн норвежских крон (2002 г.);

для Швеции – около 157 млн евро (2003 г.);

для Италии¹ – от 465 до 780 млн евро (2006 г.);

в целом по 25 странам Европейского союза – более 150 млрд евро ежегодно (в 2005–2007 гг.).

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости разработки мероприятий по ограничению воздействия провалов и прерываний напряжения на этапе проектирования, причем как при планировании развития систем внешнего и внутреннего электроснабжения потребителей, так и при составлении технических условий на технологическое присоединение к электрическим сетям.

Среди основных проектных решений, направленных на ограничение воздействия провалов напряжения и обеспечение бесперебойности питания, следует выделить [3]:

резервирование питания;

повышение быстродействия средств автоматики;

применение автономных источников питания (например, дизель-генераторных установок);

создание систем бесперебойного питания.

Дополнительно в системах электроснабжения промышленных предприятий для ограничения провалов напряжения используются следующие устройства [4]:

быстродействующие регулируемые устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), например СТАТКОМ;

маховики, приводные двигатели которых подключены параллельно нагрузке;

динамические компенсаторы искажений напряжения;

повышающие преобразователи;

активные фильтры;

бестрансформаторные устройства с последовательной добавкой напряжения.

Учитывая случайный характер возникновения провалов и прерываний напряжения и многообразие возможных методов ограничения их воздействия, становится очевидным, что для технико-экономического обоснования проектных решений необходима обработка ретроспективных данных по провалам и прерываниям напряжения в точках сети, от которых электроприёмники потребителя получают питание.

Учет требований действующих нормативных документов при обработке статистической информации по провалам и прерываниям напряжения. При формировании подхода к обработке статистических дан-

¹ Ущерб, обусловленный провалами и прерываниями напряжения длительностью менее 1 с.

ных по провалам и прерываниям напряжения необходимо учитывать, что в настоящее время в России действуют ГОСТ [7, 8], устанавливающие требования к устойчивости ТС к провалам и прерываниям питающего напряжения. Область применения стандарта [7] – ТС, присоединяемые к электрическим сетям до 1000 В, с потребляемым током не более 16 А на фазу; положения [8] распространяются на ТС с потребляемым током свыше 16 А на фазу.

Требования к помехоустойчивости, сформулированные в указанных документах, определены для трёх различных классов электромагнитной обстановки, в условиях которой эксплуатируется ТС, а именно:

Класс 1: защищенные системы электроснабжения и применение в них ТС, восприимчивых к помехам в питающей сети и требующих защиты от них с помощью систем бесперебойного питания, фильтров и устройств подавления сетевых помех;

Класс 2: точки общего и внутреннего присоединения для промышленных условий эксплуатации ТС, при этом уровни электромагнитной совместимости (ЭМС) для данного класса идентичны уровням ЭМС в системах электроснабжения общего назначения;

Класс 3: только точки внутреннего присоединения в условиях промышленной эксплуатации ТС в случаях, если выполняется хотя бы одно из условий:

питание большей части нагрузки осуществляется через преобразователи;

используется электросварочное оборудование;

имеют место частые пуски электродвигателей большой мощности;

имеют место резкие изменения нагрузок в электрических сетях.

При определении класса электромагнитной обстановки необходимо учитывать характеристики применяемых ТС и технологических процессов [7, 8].

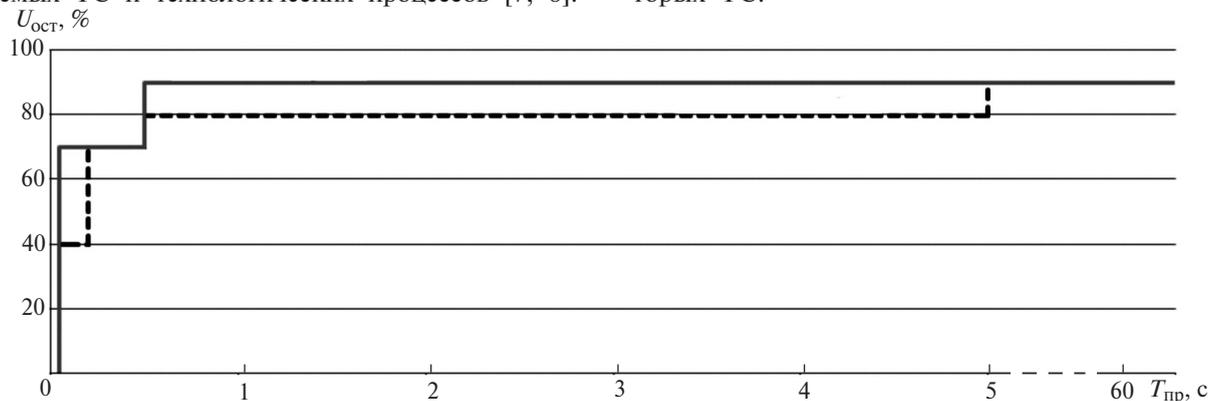


Рис. 1. Границы областей устойчивости ТС к провалам напряжения согласно ГОСТ [7, 8]: — — класс 2; --- — класс 3 ($U_{ост}$ в процентах номинального напряжения ТС; $T_{пр}$ – для частоты 50 Гц)

Границы областей устойчивости ТС к провалам напряжения для 2-го и 3-го классов электромагнитной обстановки представлены на рис. 1. Устойчивость обеспечивается, если соответствующая конкретному провалу напряжения точка в координатах «остаточное напряжение – длительность» лежит выше границы помехоустойчивости. При эксплуатации ТС в условиях класса 1 электромагнитной обстановки границы помехоустойчивости устанавливаются индивидуально в каждом конкретном случае.

При воздействии провалов и прерываний напряжения, характеристики которых лежат выше границы помехоустойчивости, предпосылки для нарушения нормальной работы ТС отсутствуют. Такие провалы и прерывания являются *некритическими* и могут не учитываться при анализе статистических данных. Отсюда следует, что при разработке проектных решений следует анализировать статистику по *критическим* провалам и прерываниям (лежащим ниже границы помехоустойчивости). Это позволяет уменьшить объемы необходимой для обработки информации и, вместе с тем, уточнить состав требуемых мероприятий при проектировании. Подобная классификация провалов напряжения нашла отражение в ряде зарубежных публикаций [9, 10].

Необходимо отметить, что электросетевая компания, с которой взаимодействует потребитель, не всегда располагает статистическими данными по провалам напряжения в точках передачи электроэнергии (ТПЭ), тем более за длительный ретроспективный период. В таком случае в качестве отправной точки следует использовать данные по электрически ближайшим точкам контроля КЭ. Однако полученные в результате анализа значения показателей подлежат дальнейшему уточнению, так как из-за электрической удаленности ТС потребителя от таких объектов отдельные некритические провалы напряжения, зафиксированные на них, могут перейти в категорию критических для некоторых ТС.

В ряде стран Европейского союза органами государственного регулирования в сфере энергетики в последние годы было инициировано проведение работ по нормированию провалов напряжения и определению ответственности субъектов электроэнергетики и потребителей за реализацию соответствующих мероприятий по их ограничению [9, 10]. Так, согласно [10, 11] положениями национальных нормативно-правовых актов Швеции предусмотрено разделение ответственности между потребителями и электросетевой компанией в зависимости от класса напряжения питающей сети в соответствии с рис. 2, где выделяются три области:

область I соответствует некритическим провалам напряжения, помехоустойчивость ТС обеспечивается за счет надлежащего их выбора потребителем;

область II соответствует критическим провалам напряжения, которые электросетевая компания должна ограничивать исходя из соображений технико-экономической целесообразности;

область III соответствует недопустимым критическим провалам напряжения.

Следовательно, при проектировании становится возможным анализировать только статистику по критическим провалам напряжения, принадлежащим области II. В этом случае возможно снижение требований к выбираемому оборудованию для ограничения провалов (снижение номинальной мощности УКРМ, ёмкости аккумуляторных батарей систем бесперебойного питания и т.д.). При этом также уменьшается объем требуемых для анализа

исходных данных. Вместе с тем, в отечественной нормативной документации подобные нормы в настоящий момент отсутствуют.

Помехоустойчивость ТС к прерываниям напряжения для 2-го и 3-го классов электромагнитной обстановки в соответствии с требованиями [7, 8] должна обеспечиваться при нулевом остаточном напряжении и длительности не более 5 с. Следовательно, по аналогии с провалами прерывания напряжения также следует разделять на критические и некритические.

При обработке ретроспективных данных важную роль также играет период наблюдения. Согласно [12] минимальный интервал времени измерений для оценки провалов и прерываний напряжения составляет 1 год. Проектные решения, сформированные по результатам анализа статистической информации за периоды меньшей продолжительности, нельзя считать обоснованными.

Таким образом, технико-экономическое обоснование проектных решений по ограничению воздействия провалов и прерываний напряжения на ТС потребителя следует проводить на основании ретроспективного анализа данных за период не менее одного года для критических провалов и прерываний в соответствии с границами помехоустойчивости по [7, 8].

Предложения по перечню показателей, определяемых по результатам обработки статистической информации по провалам и прерываниям напряжения для решения проектных задач. Основной целью обработки статистики по провалам и прерываниям

$U_{ост}, \%$	$T_{пр}, с$				
	$0,01 \leq T_{пр} \leq 0,2$	$0,2 < T_{пр} \leq 0,5$	$0,5 \leq T_{пр} < 1,0$	$1,0 \leq T_{пр} \leq 5,0$	$5,0 \leq T_{пр} \leq 60,0$
$90 > U_{ост} \geq 80$					
$80 > U_{ост} \geq 70$	I				
$70 > U_{ост} \geq 40$			II		
$40 > U_{ост} \geq 5$					III
$U_{ост} < 5$					

a)

$U_{ост}, \%$	$T_{пр}, с$				
	$0,01 \leq T_{пр} \leq 0,2$	$0,2 < T_{пр} \leq 0,5$	$0,5 \leq T_{пр} \leq 1,0$	$1,0 \leq T_{пр} \leq 5,0$	$5,0 \leq T_{пр} \leq 60,0$
$90 > U_{ост} \geq 80$					
$80 > U_{ост} \geq 70$					
$70 > U_{ост} \geq 40$	I		II		
$40 > U_{ост} \geq 5$					III
$U_{ост} < 5$					

b)

Рис. 2. Классификация провалов напряжения в электрических сетях Швеции по признаку разделения ответственности между электросетевыми компаниями и потребителями: а – для сетей напряжением до 45 кВ включительно; б – свыше 45 кВ

напряжения при решении проектных задач является определение для ТПЭ показателей, описывающих характеристики наблюдаемых явлений и одновременно позволяющих в укрупненном виде прямо или косвенно оценить параметры устройств по ограничению их воздействия и, следовательно, величину капиталовложений. Предлагаемый перечень таких показателей с обоснованием их применения представлен далее.

1. *95-перцентиль энергии провалов напряжения.* Согласно положениям стандарта IEEE Std 1564–2014 [13] под энергией провала напряжения (*voltage sag energy, E_{vs}*) следует понимать суммарное по фазам значение недоотпущенной потребителю электроэнергии вследствие его возникновения при представлении нагрузки постоянными сопротивлениями и выражении активной мощности нагрузки в отн. ед. мощности при номинальном напряжении. Если в качестве исходных характеристик для i -го провала напряжения заданы только среднеквадратичное значение остаточного напряжения и его длительность, то

$$E_{vsi} = \sum_{A,B,C} \left[1 - \left(\frac{U_{\text{ост.}\phi i}}{U_{\text{ном.}\phi}} \right)^2 \right] T_{\text{пр}i}, \text{ (отн. ед.)}^2 \cdot \text{с}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ост.}\phi i}$ – остаточное фазное напряжение i -го провала; $U_{\text{ном.}\phi}$ – номинальное фазное напряжение нагрузки; $T_{\text{пр}i}$ – длительность i -го провала напряжения.

При анализе трёхфазных симметричных провалов напряжения формула (1) с учетом перехода от фазных к линейным напряжениям и от мощности на одну фазу к мощности на три фазы при симметричной нагрузке примет вид:

$$E_{vsi} = \left[1 - \left(\frac{U_{\text{ост}i}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] T_{\text{пр}i}, \text{ (отн. ед.)}^2 \cdot \text{с}, \quad (2)$$

Недоотпуск электроэнергии потребителю, активная мощность нагрузки которого при номинальном напряжении равна P_0 , в именованных единицах с учетом [13] равен

$$\Delta W_{\text{пров}i} = \frac{P_0 E_{vsi}}{3600}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (3)$$

Рассматриваемое значение с точки зрения разработки проектных решений пропорционально количеству энергии, которая должна быть скомпенсирована за счет мероприятий по ограничению провалов напряжения. Следовательно, это значение может использоваться для оценки параметров устройств, генерирующих активную мощность при

возникновении провалов, в первую очередь – для предварительного определения требуемой ёмкости аккумуляторных батарей статических устройств бесперебойного питания.

Принимая во внимание случайную природу возникновения провалов напряжения и, следовательно, вероятностный характер E_{vs} , в качестве расчетного показателя для имеющейся выборки данных предлагается применять 95-перцентиль $E_{vs95\%}$. Такой подход позволяет исключить из рассмотрения редкие явления, характеризующиеся большим значением E_{vs} . Следует отметить, что для обеспечения соответствия разрабатываемых решений индивидуальным требованиям потребителя для каждого конкретного случая могут выбираться иные перцентили (большие или меньшие).

2. *Остаточное напряжение, соответствующее 95-перцентилю глубины провала.* Для характеристики глубины провалов напряжения в заданной точке сети предлагается по аналогии с $E_{vs95\%}$ использовать значение остаточного напряжения, соответствующее 95-перцентилю глубины провала – $U_{\text{ост}95\%}$. Показатель позволяет оценить характеристики оборудования, требуемые для ограничения провалов напряжения (номинальная мощность УКРМ, значение разрядного тока и, следовательно, мощность аккумуляторных батарей статических источников бесперебойного питания и т.д.).

3. *Число зафиксированных провалов и прерываний напряжения.* Для уменьшения влияния провалов и прерываний напряжения на ТС потребителя возможны применение схемного резервирования и установка устройств автоматики (например, АВР). Для обоснования реализации таких решений, а также анализа возможного их влияния, например на коммутационный ресурс эксплуатируемых выключателей, в качестве показателей можно использовать число зафиксированных провалов (N_{ms}) и прерываний напряжения ($N_{\text{мин}i}$) за период наблюдения. Эти значения могут учитываться также при определении конкретных точек присоединения потребителя к электрическим сетям в процессе разработки технических условий на технологическое присоединение.

Необходимо учитывать, что сопоставительный анализ N_{ms} для нескольких ТПЭ возможен только после приведения значений показателя к сопоставимому виду, так как длительности периода наблюдения провалов напряжения в разных точках могут не совпадать [13]. Это обуславливается неодновременностью моментов начала наблюдения, разной частотой и длительностью работ по техническому обслуживанию средств измерения и т.д. Если в качестве допущения принять, что для анализируемых точек частота возникновения провалов постоянна

за интересующий период времени, то скорректированные значения показателя будут определяться по формуле:

$$N'_{ms} = N_{ms} T / T_a, \quad (4)$$

где N'_{ms} — приведенное число критических провалов напряжения за период времени T ; N_{ms} — зафиксированное число критических провалов за период наблюдения T_a^* .

Расчетное соотношение в полной мере справедливо и для показателя N_{mint} .

4. 95-перцентиль длительности прерываний напряжения. Кратковременные критические прерывания напряжения могут быть охарактеризованы 95-перцентилем длительности прерывания $T_{int95\%}$. Данный показатель позволяет охарактеризовать требуемую продолжительность работы резервных источников питания (дизель-генераторные установки, системы бесперебойного питания).

Таким образом, по результатам обработки статистической информации по провалам и прерываниям напряжения для формирования проектных решений по ограничению их воздействия на ТС потребителя для ТПЭ необходимо определить следующие показатели:

для провалов напряжения:

число провалов напряжения за период наблюдения N_{ms} ;

95-перцентиль энергии провалов напряжения $E_{vs95\%}$;

значение остаточного напряжения, соответствующее 95-перцентилю глубины провалов напряжения $U_{ост95\%}$;

для прерываний напряжения:

число прерываний напряжения за период наблюдения N_{mint} ;

95-перцентиль продолжительности прерываний $T_{int95\%}$.

Если в рамках разработки мероприятий по ограничению провалов и прерываний напряжения анализируется целесообразность схемного резервирования питания, то для точек сети, рассматриваемых в качестве резервных источников питания, дополнительно требуется приведение соответствующих значений N_{ms} и N_{mint} в сопоставимый вид, исходя из длительности периодов наблюдения.

Методика обработки статистической информации по провалам и прерываниям напряжения для формирования предварительных проектных решений по ограничению их воздействия на ТС потребителя. Предлагаемая методика обработки статистической информации заключается в разделении всех провалов и прерываний напряжения, зафиксированных в

рассматриваемых ТПЭ (или электрически ближайших точках контроля КЭ), на критические и некритические с учетом требований [7, 8] и в последующем расчете для критических провалов напряжения показателей N_{ms} , $E_{vs95\%}$ и $U_{ост95\%}$, а для критических прерываний — N_{mint} и $T_{int95\%}$. Для выполнения требований [12] обработка данных осуществляется только по точкам, для которых минимальный интервал времени измерений составляет не менее 1 года. Блок-схема алгоритма обработки данных представлена на рис. 3.

Получаемые результаты являются исходными данными для последующих этапов проектирования. На их основе с учетом описанного в предыдущем разделе в дальнейшем возможно проведение укрупненного технико-экономического сопоставления сформированных вариантов предварительных проектных решений. При углубленной проработке расчетные значения показателей должны уточняться, поскольку из-за электрической удаленности ТС потребителя от ТПЭ (точек контроля КЭ) отдельные некритические провалы напряжения могут перейти в категорию критических.

Для апробации предложенной методики были проанализированы данные по провалам и прерываниям напряжения, зафиксированным системой непрерывного мониторинга КЭ в точках контроля 6–220 кВ четырех региональных энергосистем России ЭС1 – ЭС4. Предельная длительность периода наблюдения была принята равной 2 годам (с 21.05.2016 0:00 по 22.05.2018 0:00 по московскому времени). С учетом положений [12] и предварительной оценки адекватности результатов проведенных измерений расчет численных значений показателей, характеризующих провалы и прерывания напряжения, проводился для 357 точек контроля КЭ из 373 (см. таблицу).

Энергосистема	Число точек контроля КЭ						Всего
	6 кВ	10 кВ	27,5 кВ	35 кВ	110 кВ	220 кВ	
ЭС1	3	31	2	39	13	36	124
ЭС2	9	14	–	21	10	25	79
ЭС3	4	16	–	8	14	18	60
ЭС4	12	29	–	6	22	25	94
Всего	28	90	2	74	59	104	357

Особенностями рассматриваемых энергосистем является значительная мощность искажающих нагрузок (нагрузок, в составе которых доля электроприёмников с нелинейной вольт-амперной характеристикой превышает 60%): в ЭС1–ЭС3 возникновение и распространение искажений обусловлено главным образом работой объектов электрифицированной тяги, в ЭС4 – предприятий цветной

* Обозначения приняты в соответствии с [13].



Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки статистической информации по провалам и прерываниям напряжения

металлургии. Исходя из этого, в соответствии с [7, 8] было условно принято, что электромагнитная обстановка для оценки воздействия провалов и прерываний напряжения во всех рассматриваемых точках электрической сети соответствует классу 3 (см. рис. 1). Расчет показателей проводился для трёхфазных провалов и прерываний напряжения. Так как для обработки были доступны только значения глубины и длительности провалов и прерываний, то было принято допущение об их симметрии.

Результаты анализа статистической информации показывают, что во всех принятых к рассмотрению точках контроля КЭ 6–220 кВ возникали критические провалы напряжения. Агрегированные данные по показателю N_{ms} для энергосистем ЭС1–ЭС4 приведены на рис. 4. В большинстве точек контроля КЭ 6–220 кВ число зафиксированных критических провалов напряжения составило менее 50 (значение N_{ms} не превышает 50 ед.). В качестве одного из вариантов проектных решений по ограничению воздействия провалов напряжения на

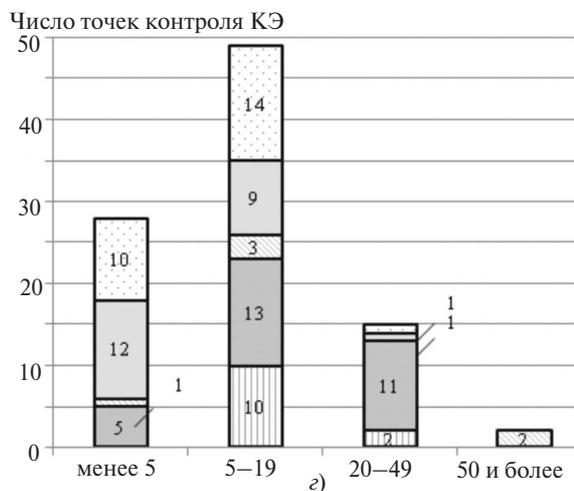
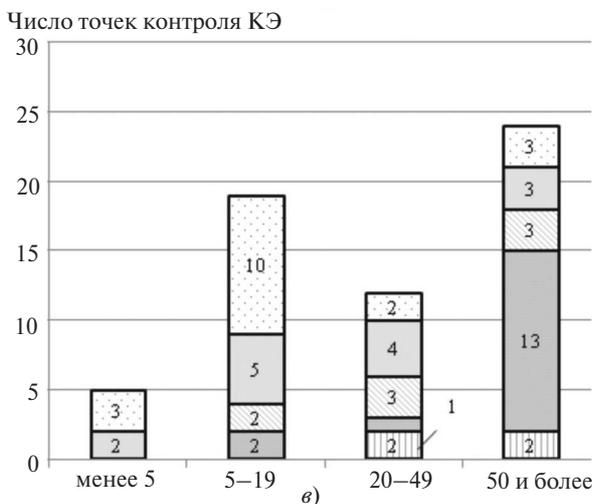
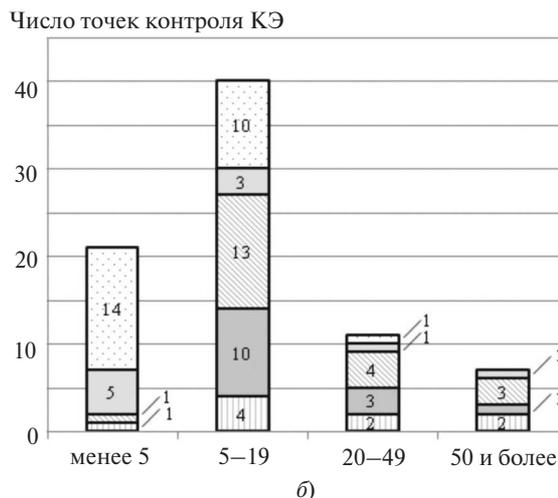
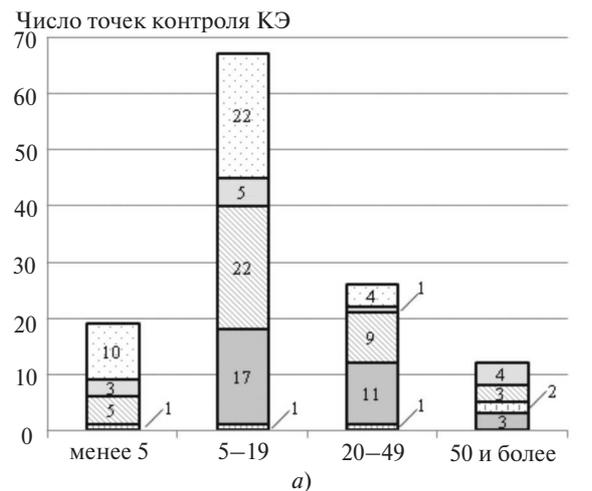


Рис. 4. Агрегированные данные по показателю N_{ms} , ед., для точек контроля 6–220 кВ: а – для ЭС1; б – ЭС2; в – ЭС3; г – ЭС4; □ – 6 кВ; ■ – 10 кВ; ▨ – 35 кВ; ▩ – 110 кВ; ▪ – 220 кВ

ТС, получающие питание от таких точек, следует рассматривать организацию схемного резервирования и/или установку устройств автоматики.

Доля точек контроля КЭ с N_{ms} , равным 50 и более, в целом по всем классам напряжения для энергосистем ЭС1, ЭС2 и ЭС4 составила соответственно 9,7%, 8,9% и 2,1%, в то время как для ЭС3 – 40,0%, что в первую очередь обусловлено возникновением значительного числа провалов напряжения в точках контроля КЭ 10 кВ.

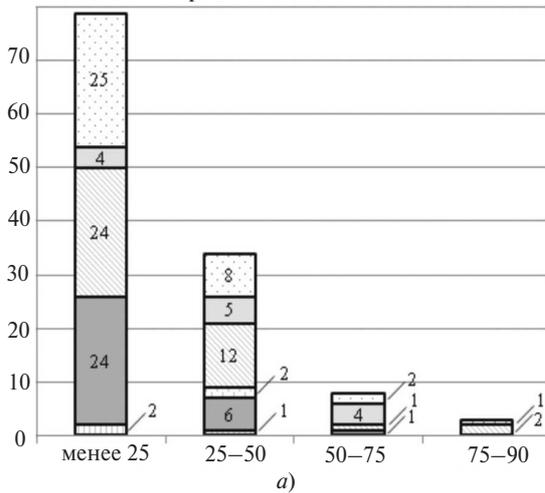
Максимальные значения N_{ms} составили:

- для ЭС1 – 351, 246 и 243 (для точек 27,5 кВ 1ПС10_3 и 110 кВ 1ПС17_4, 1ПС17_5);
- для ЭС2 – 694, 208 и 183 (для точек 35 кВ 2ПС15_4, 2ПС15_5 и 6 кВ 2ПС13_3);
- для ЭС3 – 9525, 9362 и 9153 (для точек 110 кВ 3ПС8_3 и 6 кВ 3ПС8_1, 3ПС8_2);
- для ЭС4 – 474, 322 и 47 (для точек 35 кВ 4ПС10_2, 4ПС10_3 и 10 кВ 4ПС8_1).

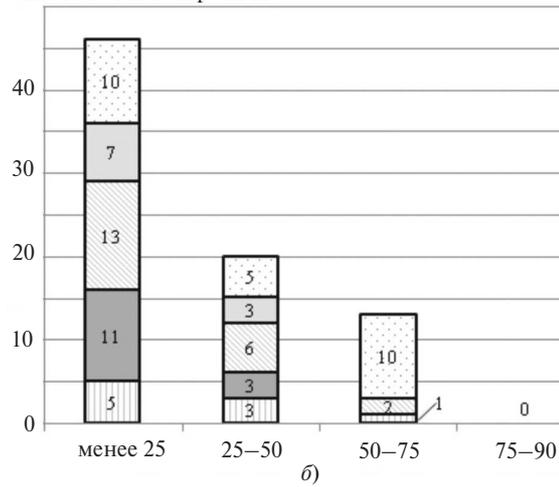
Возможность применения схемного резервирования и/или установки устройств автоматики для ограничения воздействия провалов напряжения на уже функционирующие ТС, получающие питание от таких точек, должна оцениваться с учетом текущего состояния установленной коммутационной аппаратуры. При разработке технических условий на технологическое присоединение потребителя к электрическим сетям необходим дополнительный анализ целесообразности установки выключателей с повышенным коммутационным ресурсом.

Следует отметить, что для каждой энергосистемы как минимум две точки из трех, характеризующихся наибольшими значениями N_{ms} , соответствуют системам (секциям) шин одного питающего центра. Схемное резервирование в таком случае следует осуществлять либо от шин соседних центров питания (на напряжении 6–110 кВ), либо от

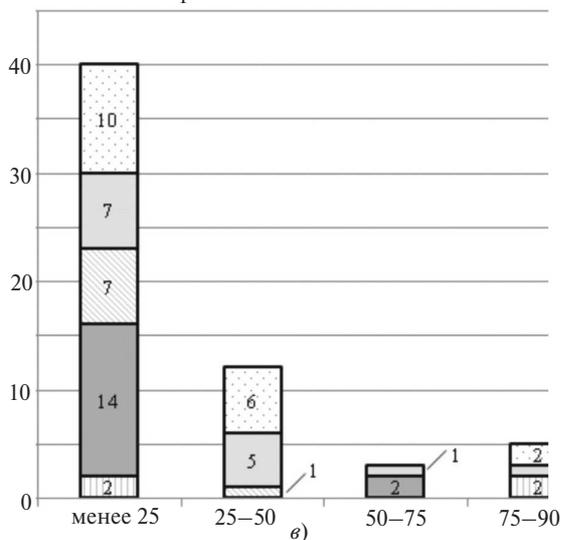
Число точек контроля КЭ



Число точек контроля КЭ



Число точек контроля КЭ



Число точек контроля КЭ

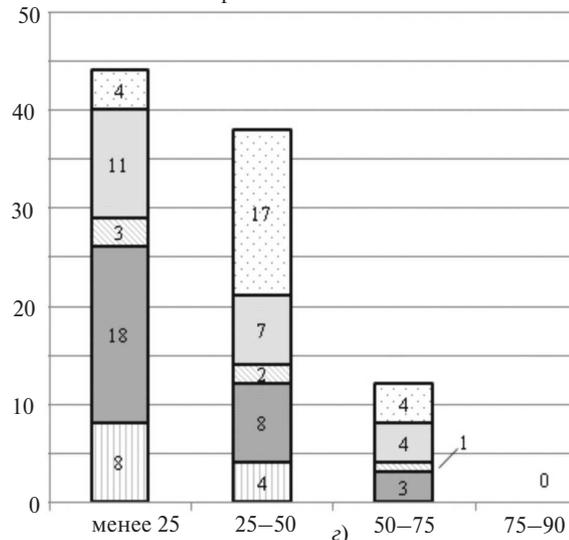


Рис. 5. Агрегированные данные по показателю $U_{ост95\%} (\%U_{ном})$ для точек контроля 6–220 кВ: а – з – см. рис. 4; □ – 6 кВ; ■ – 10 кВ; ▨ – 35 кВ; ■ – 110 кВ; ▨ – 220 кВ

электрически связанных с ними объектов (например, от РП 6–10 кВ).

Для ограничения воздействия провалов напряжения на ТС, получающие питание от точек контроля КЭ ЗПС8_1, ЗПС8_2 и ЗПС8_3 энергосистемы ЭС3, применение схемного резервирования не видится эффективным, так как значение N_{ms} для данных точек сопоставимо с механическим ресурсом выключателей соответствующих классов напряжения. Указанное обстоятельство должно учитываться и при технологическом присоединении потребителей.

Результаты расчета показателя $U_{ост95\%}$ для точек контроля КЭ энергосистем ЭС1–ЭС4 в агрегированном виде представлены на рис. 5.

Приведенные данные показывают, что для более чем 80% точек контроля КЭ 6–220 кВ каждой из энергосистем ЭС1–ЭС4 зафиксированные критические провалы напряжения характеризуются значительной глубиной: значение показателя $U_{ост95\%}$ для них составляет менее 50% соответствующего номинального напряжения. Минимальные значения $U_{ост95\%}$ в целом для точек контроля КЭ энергосистем составили:

для ЭС1 – 5,081% или 1,78 кВ (точка контроля 35 кВ 1ПС2_3);

для ЭС2 – 5,497% или 0,55 кВ (точка контроля 10 кВ 2ПС7_1);

для ЭС3 – 5,130% или 0,51 кВ (точка контроля 10 кВ 3ПС6_2);

для ЭС4 – 5,545% или 0,55 кВ (точка контроля 10 кВ 4ПС8_2).

Особо следует обратить внимание на то, что низкое $U_{ост95\%}$ характерно и для большинства точек контроля 110–220 кВ; минимальные значения $U_{ост95\%}$ для них равны:

для ЭС1 – 6,088% или 13,39 кВ (точка контроля 220 кВ 1ПС20_3);

для ЭС2 – 6,051% или 6,66 кВ (точка контроля 110 кВ 2ПС3_2);

для ЭС3 – 7,129% или 7,84 кВ (точка контроля 110 кВ 3ПС3_1);

для ЭС4 – 5,557% или 12,22 кВ (точка контроля 220 кВ 4ПС1_4).

Указанные ранее обстоятельства свидетельствуют о необходимости реализации как локальных решений по ограничению провалов для потребителей, так и проработки общесистемных мер в рам-

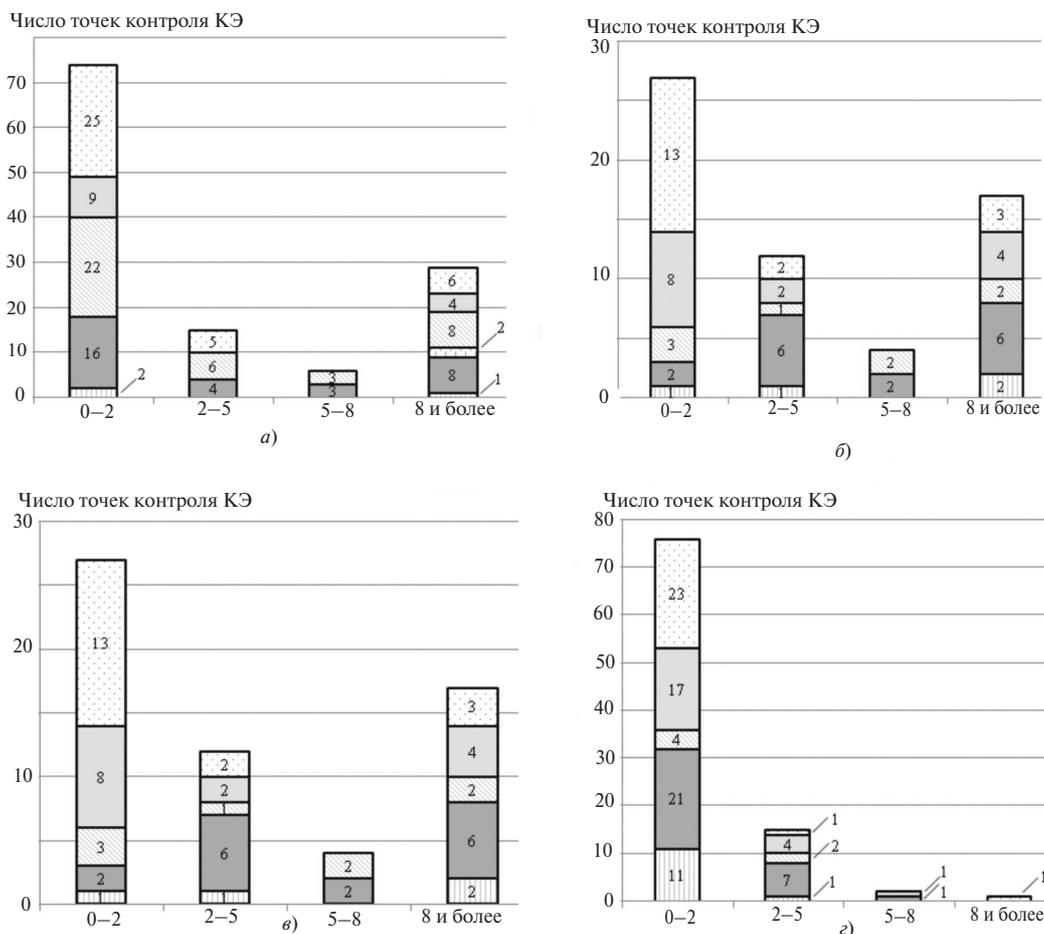


Рис. 6. Агрегированные данные по показателю $E_{вс95\%}$, (отн. ед.)² для точек контроля 6–220 кВ: а–г – см. рис. 4; □ – 6 кВ; ■ – 10 кВ; ▤ – 35 кВ; ▥ – 110 кВ; ▧ – 220 кВ

ках планирования развития электросетевого хозяйства. Мероприятия по ограничению провалов напряжения в данном случае должны прорабатываться при разработке схем внешнего электроснабжения крупных потребителей, а также предусматриваться на этапе составления технических условий на технологическое присоединение к электрическим сетям.

Результаты расчета показателя $E_{vs95\%}$ для точек контроля КЭ энергосистем ЭС1–ЭС4 в агрегированном виде представлены на рис. 6. Значение $E_{vs95\%}$ для 74 точек контроля ЭС1 из 124 (59,7%), 45 точек из 79 ЭС2 (57,0%), 27 точек из 60 ЭС3 (45,0%) и 76 точек из 94 ЭС4 (80,9%) не превышает 2 (отн. ед.)²·с. Вместе с тем, для 71 точки контроля КЭ из 74 указанных для ЭС1, 37 из 45 для ЭС2, 27 из 27 для ЭС3 и 64 из 76 для ЭС4 величина $U_{ост95\%}$ не превышает 50% соответствующего номинального напряжения. Из этого можно заключить, что для подобных точек контроля КЭ провалы напряжения характеризуются значительной глубиной, но малой длительностью.

Одновременно с этим для 29 точек контроля КЭ 6–220 кВ ЭС1 (23,4% общего числа), 7 точек ЭС2 (11,7%), 17 точек ЭС3 (28,3%) и одной точки ЭС4 (1,1%) расчетное значение $E_{vs95\%}$ превысило 8 (отн. ед.)²·с. Для таких точек характерна значительная длительность провалов и значение остаточного напряжения $U_{ост95\%}$ не более 75%.

Воздействие провалов напряжения на ТС потребителей, получающих питание от таких точек, в первом случае может быть ограничено либо с по-

мощью устройств, позволяющих кратковременно выдавать значительную активную мощность (маховиков, аккумуляторных батарей малой ёмкости с достаточным значением разрядного тока и др.), либо применением быстродействующих УКРМ (во втором случае – за счет создания систем бесперебойного питания).

Следует отметить, что при значениях $E_{vs95\%}$, лежащих в диапазоне от 2 до 8 (отн. ед.)²·с, необходимо проводить технико-экономическое сравнение мероприятий по созданию систем бесперебойного питания и, например, схемного резервирования с учетом соответствующих значений N_{ms} .

Данные по показателям N_{mint} и $T_{int95\%}$ по точкам контроля КЭ в агрегированном виде приведены на рис. 7 и 8. Прерывания напряжения за рассматриваемый период были зафиксированы в 46 точках контроля КЭ 6–220 кВ ЭС1 (37,1% общего числа по энергосистеме), 36 точках ЭС2 (45,6%), 44 точках ЭС3 (73,3%) и 47 точках ЭС4 (50,0%), при этом основная часть этих точек сосредоточена в распределительных сетях 6–35 кВ.

Максимальное значение N_{mint} в целом по точкам контроля КЭ энергосистем ЭС1–ЭС4, в которых были зафиксированы критические прерывания, составило 36 ед. (точка 10 кВ ЗПС2_1 в энергосистеме ЭС3), что позволяет рассматривать в качестве одного из вариантов проектных решений по ограничению их воздействия организацию схемного резервирования и/или установку устройств автоматики.

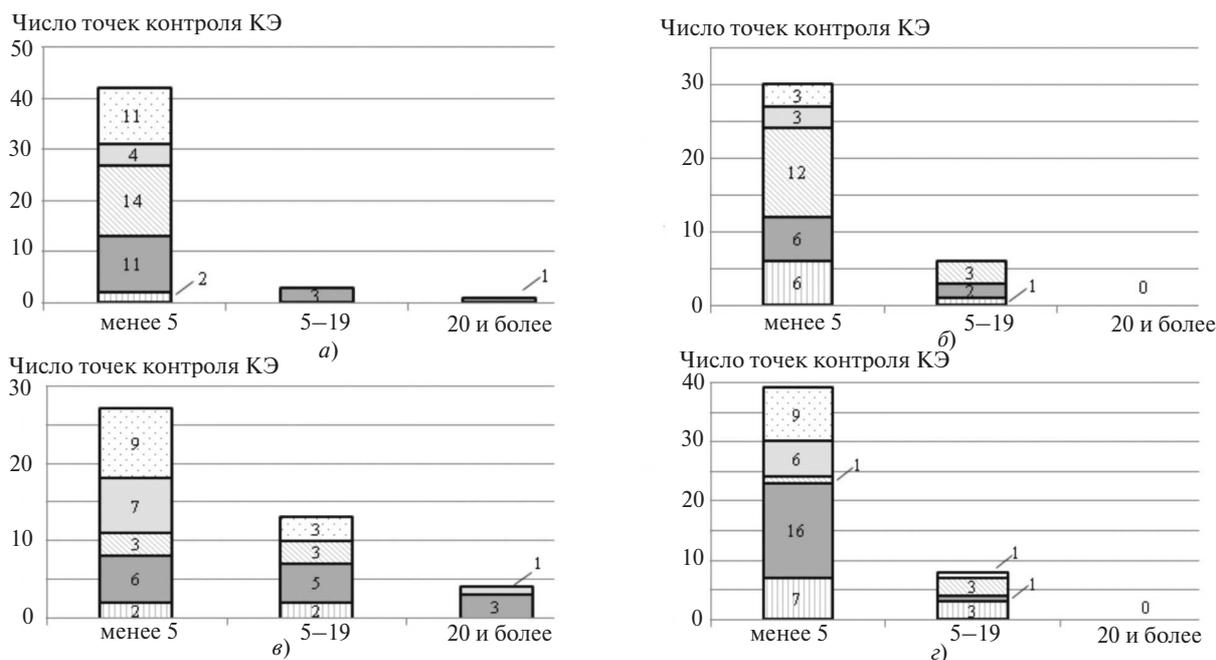


Рис. 7. Агрегированные данные по показателю N_{mint} , е., для точек контроля 6–220 кВ: а–г – см. рис. 4; □ – 6 кВ; ■ – 10 кВ; □ – 35 кВ; ■ – 110 кВ; ▨ – 220 кВ

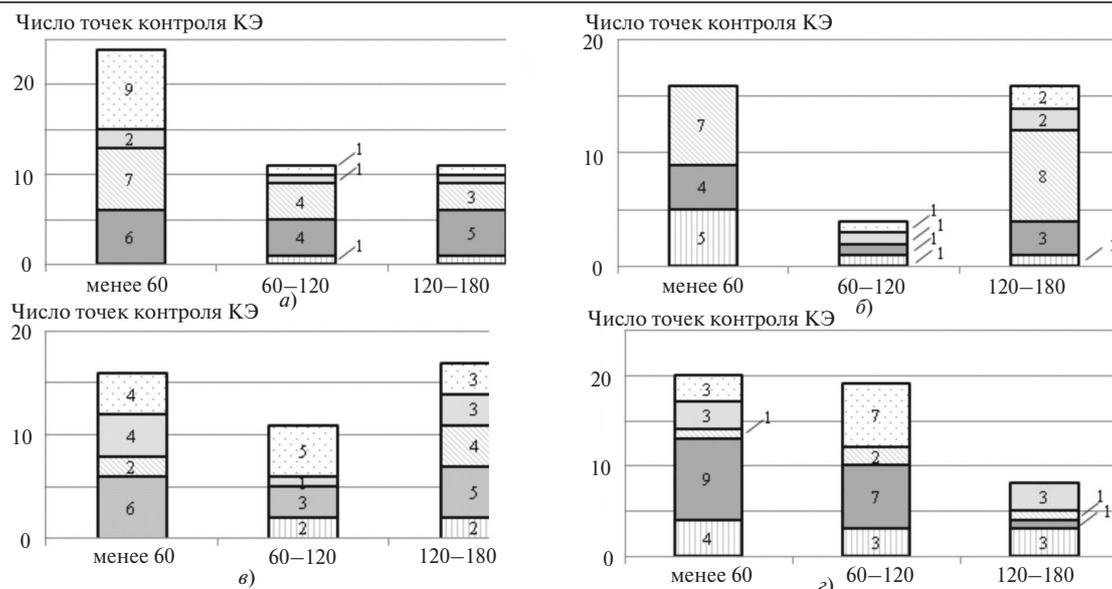


Рис. 8. Агрегированные данные по показателю $T_{int95\%}$, с, для точек контроля 6–220 кВ: а–г – см. рис. 4; □ – 6 кВ; ■ – 10 кВ; ▨ – 35 кВ; ▩ – 110 кВ; ▮ – 220 кВ

Следует отметить, что для 22 точек контроля КЭ ЭС1 из 46, в которых были зафиксированы критические прерывания напряжения, значение $T_{int95\%}$ превышает 1 мин. Данное условие также выполняется для 20 точек из 36 в энергосистеме ЭС2, 28 из 44 в ЭС3 и 27 из 47 в ЭС4. Для потребителей, получающих питание от данных точек или прорабатывающих вопрос о технологическом присоединении, целесообразно рекомендовать установку резервных источников питания (например, дизель-генераторных установок).

Выводы. 1. Случайный характер возникновения провалов и прерываний напряжения, а также ущерб, возникающий из-за их влияния на помеховосприимчивые ТС потребителя, обуславливает необходимость обработки статистической информации для формирования комплекса мероприятий по защите от провалов и прерываний и дальнейшего их технико-экономического обоснования.

2. Для уменьшения объемов обрабатываемой информации и, соответственно, повышения оперативности разработки проектных решений анализ следует проводить с учетом требований действующих нормативных документов к помехоустойчивости ТС за счет разделения провалов и прерываний напряжения на критические и некритические. Минимально допустимый интервал наблюдений составляет 1 год.

3. Основной целью предложенной методики по обработке статистики по провалам и прерываниям напряжения является определение для ТПЭ (или ближайших точек контроля КЭ) показателей, описывающих характеристики наблюдаемых явлений и одновременно позволяющих в укрупненном виде прямо или косвенно оценить параметры устройств

по ограничению их воздействия и, следовательно, размер капиталовложений. Для достижения указанной цели предлагается рассчитывать следующие показатели:

для критических провалов напряжения:

число провалов напряжения за период наблюдения N_{ms} ;

95-перцентиль энергии провалов напряжения $E_{vs95\%}$;

значение остаточного напряжения, соответствующее 95-перцентилю глубины провалов напряжения $U_{ост95\%}$;

для критических прерываний напряжения:

число прерываний напряжения за период наблюдения N_{mini} ;

95-перцентиль продолжительности прерываний $T_{int95\%}$.

4. В рамках апробации методики были проанализированы ретроспективные данные по провалам и прерываниям напряжения за двухлетний период, имевшим место в точках контроля КЭ 6–220 кВ четырёх региональных энергосистем России. Результаты анализа показывают, что критические провалы напряжения были зафиксированы во всех рассматриваемых точках. Для большинства из них число провалов N_{ms} не превышает 50, однако характерно малое значение остаточного напряжения (значение $U_{ост95\%}$ не более 50%), причем данная тенденция сильно проявляется в том числе в сетях 110–220 кВ. Это свидетельствует о необходимости проработки как локальных, так и общесистемных мероприятий по ограничению провалов напряжения. Значительный разброс значений показателей N_{ms} , $U_{ост95\%}$ и $E_{vs95\%}$ обуславливает возможность

применения различных проектных решений для ограничения провалов.

5. Анализ показателей N_{mint} и $T_{int95\%}$, характеризующих критические прерывания напряжения, свидетельствует о том, что данное явление проявляется преимущественно в распределительных сетях 6–35 кВ. Вместе с тем, практически в 50% точек контроля КЭ ЭС1, в которых были зафиксированы прерывания, а также в большинстве точек контроля ЭС2–ЭС4 значение $T_{int95\%}$ превысило 1 мин. Для потребителей, получающих питание от данных точек или планирующих осуществить в них технологическое присоединение к электрическим сетям, имеет смысл проработать вопрос об организации схемного резервирования или установке резервных источников питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коверникова Л.И., Суднова В.В., Шамонов Р.Г. и др. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению/Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017, 219 с.
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014, 16 с.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии: учебное пос./Под ред. Ю.В. Шарова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издат. дом МЭИ, 2017, 347 с.
4. Пупин В.М. Устройства защиты от провалов напряжения. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011, 100 с.
5. Council of European Energy Regulators Guidelines of Good Practice on Estimation of Costs due to Electricity Interruptions and Voltage Disturbances [Электрон. ресурс] <https://www.ceer.eu/1279> (дата обращения 03.06.2018).
6. 5th Council of European Energy Regulators Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply (2011) [Электрон. ресурс] <https://www.ceer.eu/1277> (дата обращения 04.06.2018).
7. ГОСТ 30804.4.11–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014, 19 с.
8. ГОСТ IEC 61000–4–34–2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4–34. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания с потребляемым током более 16 А на фазу. М.: Стандартинформ, 2016, 26 с.
9. 6th Council of European Energy Regulators. Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply (2016) [Электрон. ресурс] <https://www.ceer.eu/1305> (дата обращения 12.06.2018).
10. Weldemariam L., Cuk V., Cobben S., van Waes J. Regulation and Classification of Voltage Dips. [Proc. of the 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 12–15 June, 2017, Paper 0734] [Электрон. ресурс] <https://cired.net/publications/cired2017> (дата обращения 06.06.2018).
11. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. [Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168: [Электрон. ресурс] <https://cired.net/publications/cired2011> (дата обращения 06.06.2018).
12. ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2014, 51 с.
13. IEEE Std 1564–2014. IEEE Guide for Voltage Sag Indices: [Электрон. ресурс] <https://standards.ieee.org> (дата обращения 04.06.2018).

[23.07.2018]

А в т о р ы: Солодовников Валерий Евгеньевич окончил Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт «НИУ «МЭИ» в 2016 г. Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Тульский Владимир Николаевич окончил Московский энергетический институт – ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ» («НИУ «МЭИ») в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Шамонов Роман Геннадьевич окончил в 2000 г. электроэнергетический факультет МЭИ. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях». Начальник отдела электрических режимов ПАО «ФСК ЕЭС».

Elektrichestvo, 2019, No. 1, pp. 4–16

DOI:10.24160/0013-5380-2019-1-4-16

A Technique for Processing Statistical Information for Elaborating Design Solutions for Protection from Sags and Short-Term Voltage Interruptions

SOLODOVNIKOV Valery Ye. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Ph.D. Student

TUL'SKY Vladimir N. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

SHAMONOV Roman G. (OJSC «System Operator of the Unified Energy System», Moscow, Russia) – Chief of Department, Cand. Sci. (Eng.)

A technique for processing statistical information on sags and short-term voltage interruptions is proposed. The technique is based on subdividing the initial totality of sags and short-term voltage interruptions recorded at an electric network node into critical and non-critical ones proceeding from the requirements of the valid regulatory documents for the noise immunity of equipment. The characteristics of each critical sag and short-term voltage interruption obtained for an electric network node are used as the initial data for calculating a number of indicators based on which a preliminary list of design solutions on limiting the influence of the considered phenomena can be drawn up. The proposed indicators have a clear physical meaning and can subsequently be used for estimating the required characteristics in generalized form, and open the possibility to carry out a preliminary technical-economic comparison of the developed preliminary versions of technical solutions. The results of approving the proposed technique taking as an example individual points for monitoring the electric power quality in 6–220 kV networks of four regional power systems of Russia are presented.

Key words: electric power supply systems, designing, electric power quality, voltage sags, voltage interruptions, statistical data

REFERENCES

1. **Kovernikova L.I., Sudnova V.V., Shamonov R.G.** *Kachestvo elektricheskoi energii: sovremennoye sostoyaniye problemy i predlozheniya po ikh resheniyu* (Power Quality: State of the Art Problems and Solution Proposals). Editor-in-Chief N.I. Voropai. Novosibirsk, Publ. «Nauka», 2017, 219 p.
2. **GOST 32144–2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* (Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems). Moscow, Standartinform, 2014, 16 p.
3. **Kartashov I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Nasyrov R.R.** *Upravleniye kachestvom elektroenergii: uchebnoye pos./Pod red. Yu.V. Sharov. 3-ye izd., pererab. i dopolnen.* (Power Quality Management. Train aid./Edit. by Yu.V. Sharov. 3-rd. edit. and comp.). Moscow, Publ. house of the Moscow Power Engineering Institute, 2017, 347 p.
4. **Pupin V.M.** *Ustroystva zashchity ot provalov napryazheniya* (Voltage Sag Protection). Moscow, NTF «Energoprogress», 2011, 100 p.
5. **Council of European Energy Regulators** Guide lines of Good Practice on Estimation of Costs due to Electricity Interruptions and Voltage Disturbances [Electron. Resurs] <https://www.ceer.eu/1279> (Data of appeal 03.06.2018).
6. **5th Council of European Energy Regulators** Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply (2011) [Electron. Resurs] <https://www.ceer.eu/1277> (Data of appeal 04.06.2018).
7. **GOST 30804.4.11–2013.** *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya... Trebovaniya i metody ispytaniy.* (Electromagnetic compatibility of technical equipment. Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity. Requirements and test methods). Moscow, Standartinform, 2014, 19 p.
8. **GOST IEC 61000–4–34–2016.** *Elektromagnitnaya sovmestimost'. Ch. 4–34. Metody ispytaniy i izmereniy.* (Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4–34. Testing and measurement techniques.). Moscow, Standartinform, 2016, 26 c.
9. **6th Council of European Energy Regulators CEER** Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply (2016) [Electron. Resurs] <https://www.ceer.eu/1305> (Data of appeal 12.06.2018).
10. **Weldemariam L., Cuk V., Cobben S., van Waes J.** Regulation and Classification of Voltage Dips. [Proc. of the 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 12–15 June, 2017, Paper 0734] [Electron. Resurs] <https://cired.net/publications/cired2017> (Data of appeal 06.06.2018).
11. **Strum L., Bollen M., Kolessar R.** Voltage Quality Regulation in Sweden. [Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168] [Electron. Resurs] <https://cired.net/publications/cired2011> (Data of appeal 06.06.2018).
12. **GOST 30804.4.30–2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya....* (Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods). Moscow, Standartinform, 2014, 51 p.
13. **IEEE Std 1564–2014.** IEEE Guide for Voltage Sag Indices [Electron. Resurs] <https://standards.ieee.org> (Data of appeal 04.06.2018).

[23.07.2018]