

УДК 621.311.031

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-102-113

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

О. Г. ШИРОКОВ, Т. В. АЛФЕРОВА, В. В. БАХМУТСКАЯ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Для трех районов электрических сетей разных энергосистем представлена классификация провалов напряжения по источникам возникновения, характеру появления, остаточному напряжению и длительности в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Приведено распределение вероятностей рассмотренных провалов напряжения по диапазонам остаточного напряжения и длительности в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических сетях, позволяющее дать предварительную оценку параметров этих кратковременных нарушений электроснабжения в электрических сетях высокого напряжения и определить требования к системам электроснабжения предприятий, содержащих помехочувствительные электроприемники.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрические сети, провал напряжения, длительность провала напряжения, остаточное напряжение провала напряжения, опорное напряжение, скользящее опорное напряжение сравнения.

Для цитирования. Широков, О. Г. Классификация провалов напряжения / О. Г. Широков, Т. В. Алферова, В. В. Бахмутская // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 1 (104). – С. 102–113. – DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-102-113

CLASSIFICATION OF VOLTAGE BROWNOUTS

O. G. SHIROKOV, T. V. ALFEROVA, V. V. BAKHMUTSKAYA

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A classification of voltage brownouts based on their sources, nature of occurrence, residual voltage, and duration in accordance with GOST 32144-2013 is presented for three regions of electrical networks in different power systems. The probability distribution of the considered voltage brownouts across residual voltage and duration ranges in the Bobruisk, Orsha, and Gomel electrical networks is presented, allowing for a preliminary assessment of the parameters of these short-term power supply interruptions in high-voltage electrical networks and the determination of requirements for the power supply systems of enterprises containing interference-sensitive electrical receivers.

Keywords: power quality, electrical networks, voltage brownout, voltage brownout duration, residual voltage of voltage brownout, reference voltage, sliding reference voltage.

For citation. Shirokov O. G., Alferova T. V., Bakhmutskaya V. V. Classification of voltage brownouts. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 1 (104), pp. 102–113 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-102-113

Введение

Одним из типов кондуктивных электромагнитных помех, определяющих качество электрической энергии в электрических сетях, является провал напряжения. По ранее действовавшему ГОСТ 13109-97 [1] провал напряжения характеризовался таким показателем качества электроэнергии, как *длительность провала напряжения* $\Delta t_{\text{п}}$, а также вспомогательными параметрами – *глубиной провала напряжения* $\delta U_{\text{п}}$ и *частотностью появления провалов напряжения* $F_{\text{п}}$. Для длительности провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$ по [1] была установлена следующая норма: предельно допустимое

значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики [1].

Введенный в действие ГОСТ 32144-2013 [2] изменения характеристик напряжения, связанные с такими явлениями, как провалы напряжения, уже не нормирует, соответственно и термин *длительность провала напряжения* Δt_n стал одним из параметров, а не показателем качества электроэнергии. Вместе с тем в соответствии с действующим ГОСТ 32144-2013 при заключении договоров на поставку или передачу электрической энергии следует учитывать статистические данные, относящиеся к характеристикам напряжения, связанным с такими явлениями, как провалы напряжения. Однако статистических данных о характеристиках провалов напряжения в электрических сетях конкретных районов электроснабжения практически нет. ГОСТ 33073-2014 [3] устанавливает основные положения по организации и проведению контроля качества электрической энергии (ЭЭ) в точках передачи (поставки) ЭЭ пользователям электрических сетей систем электроснабжения общего назначения однофазного и трехфазного переменного тока частотой 50 Гц в целях определения соответствия качества ЭЭ нормам, установленным в ГОСТ 32144-2013 [2], условиям договоров на поставку ЭЭ и (или) на оказание услуг по передаче ЭЭ, но ответственных за сбор статистических данных о характеристиках провалов напряжения четко не конкретизирует.

В такой ситуации актуальными являются работы, направленные на оценку характеристик провалов напряжения.

Целью данной работы является классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в соответствии с ГОСТ 32144-2013, а также по источникам возникновения и характеру появления.

Основная часть

Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети, т. е. причиной провалов напряжения являются коммутационные процессы в системах электроснабжения различных иерархических уровней, связанные с короткими замыканиями и запуском мощных нагрузок относительно мощности электрической сети в точке электропитания [9]. Исходя из этого можно классифицировать провалы напряжения по источникам возникновения и закономерности появления. Одна из возможных классификаций по таким признакам представлена на рис. 1.

По источникам возникновения относительно потребителя электроэнергии провалы напряжения можно разделить на внешние и внутренние.

Источником внешних провалов напряжения в этом случае будет энергоснабжающая организация (энергосистема), а причиной, как правило, аварийные ситуации в электрических сетях энергосистемы. Предсказуемость появления таких событий затруднительна, поэтому внешние провалы напряжения будут иметь случайный характер [10].

Источником внутренних провалов напряжения будет являться система электроснабжения самого потребителя (СЭСП). Одной причиной внутренних провалов напряжения могут быть аварийные ситуации (короткие замыкания) в электрических сетях системы электроснабжения самого потребителя и при этом внутренние провалы напряжения, так же как и внешние, будут иметь случайный характер. Второй причиной внутренних провалов напряжения может быть пуск относительно мощных

нагрузок либо работа относительно мощных электроприемников в режиме «старт-стоп», при этом пусковые и нагрузочные режимы будут обусловлены технологическим процессом, а следовательно, прогнозируемы, и будут иметь какой-то периодический характер [6–8].



Рис. 1. Классификация провалов напряжения по источникам возникновения и закономерности появления

На рис. 2 показана регистрограмма внешнего провала напряжения, из анализа которой следует, что провал напряжения произошел одновременно на двух секциях шин 6 кВ, получающих питание от разных трансформаторов 110/6 кВ. После локализации внешнего короткого замыкания на линии, от которой получает питание секция шин 1 (сш 1), на секции шин 2 (сш 2) напряжение поднялось до рабочего уровня, при этом огибающая амплитудных значений напряжения в момент провала имеет прямоугольную форму.

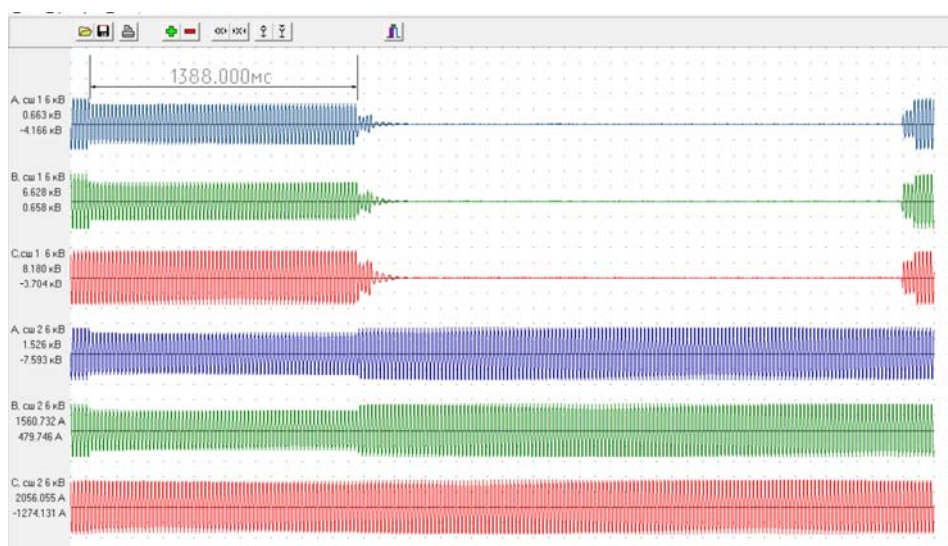


Рис. 2. Внешний провал напряжения на двух секциях шин, вызванный коротким замыканием в энергосистеме

На рис. 3 отображена регистрограмма внутреннего провала напряжения, вызванного асинхронным пуском синхронного двигателя СТД-5000-2, из анализа которой следует, что глубина провала напряжения обусловлена значением пускового тока и наибольшее значение имеет в первоначальный момент пуска. В последующем со снижением потребляемого тока она уменьшается и после втягивания двигателя в синхронизм напряжение поднимается до рабочего уровня. При этом огибающая амплитудных значений напряжения в момент пускового провала напряжения имеет треугольную форму.

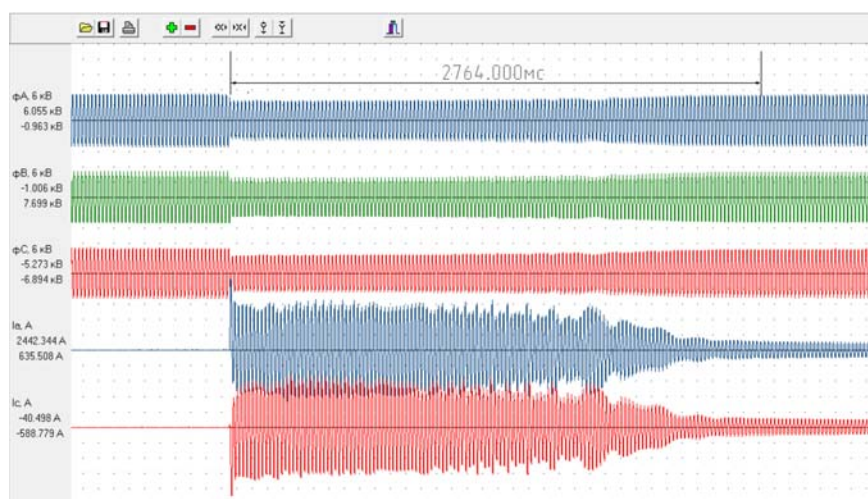


Рис. 3. Внутренний провал напряжения при асинхронном пуске синхронного двигателя СТД-5000-2

На рис. 4 представлена регистрограмма напряжений на шинах 6 и 110 кВ при асинхронном пуске синхронного двигателя СТД-5000-2. Из ее анализа следует, что пуск двигателя СТД-5000-2 вызывает пусковой провал напряжения не только непосредственно на шинах 6 кВ, от которых он получает питание, но и приводит в этот момент к снижению напряжения на шинах 110 кВ трансформатора подстанции глубокого ввода. Следует отметить, что хоть и перепад напряжения при пуске 6 кВ двигателя СТД-5000-2 на шинах 110 кВ присутствует, идентифицировать это событие как провал напряжения в соответствии с [2] в этом конкретном случае нельзя, поскольку понижение напряжения не подходит к пороговому значению начала провала напряжения, принимаемого равным 90 % опорного напряжения.

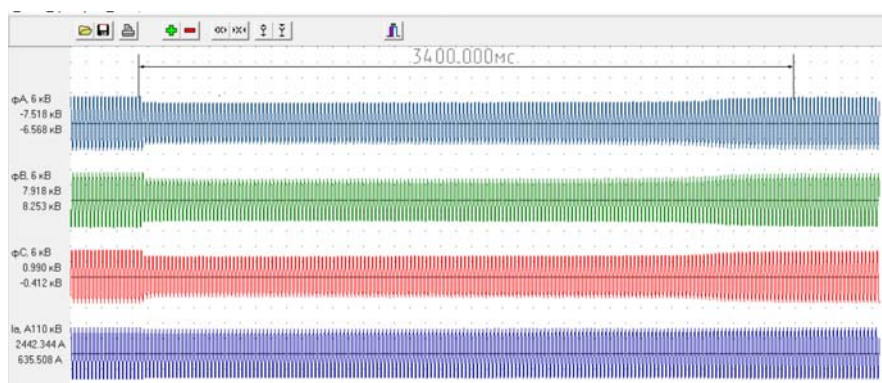


Рис. 4. Напряжения на шинах 6 и 110 кВ при асинхронном пуске синхронного двигателя СТД-5000-2

На рис. 5 приведена регистрограмма напряжений на секции шин 1 (сш 1) 6 кВ и на секции шин 2 (сш 2) 6 кВ, получающих питание от разных трансформаторов 110/6 кВ, при асинхронном пуске синхронного двигателя СТД-5000-2. Из анализа данной регистрограммы следует, что пуск двигателя СТД-5000-2 вызывает пусковой провал напряжения только непосредственно на шинах 6 кВ той секции, от которой он получает питание. А на секции шин 2 (сш 2) 6 кВ пуск двигателя СТД-5000-2 практически не приводит к изменению напряжения. Этот пример свидетельствует о том, что энергосистема в такой конфигурации ограничивает распространение внутренних провалов напряжения через свои сети. Поэтому вряд ли стоит считать, что энергосистема является источником периодических провалов напряжения, связанных с пуском или работой в режиме «старт–стоп» мощных электроприемников, питающихся на низком или среднем напряжении.

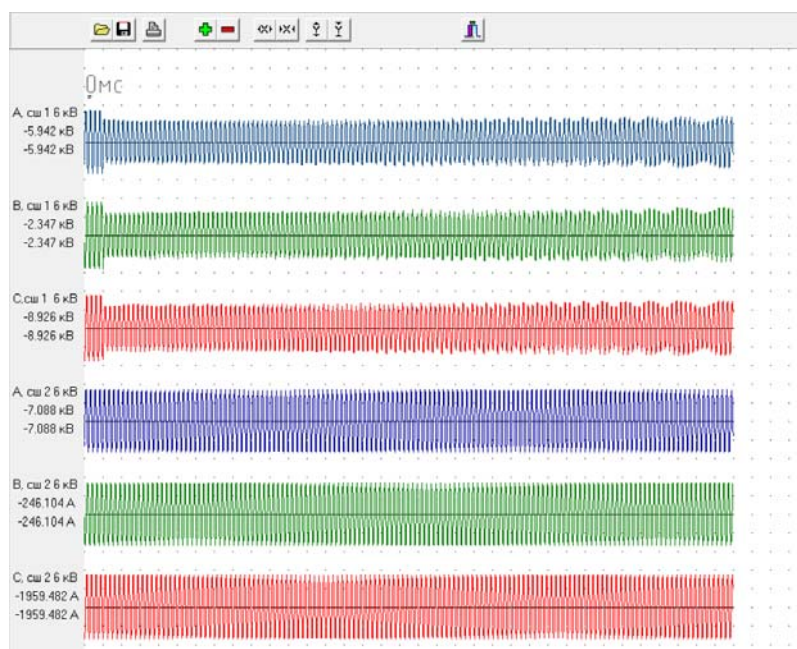


Рис. 5. Напряжения на секции шин 1 (сш 1) и 2 (сш 2) 6 кВ, получающих питание от разных трансформаторов 110/6 кВ, при асинхронном пуске синхронного двигателя СТД-5000-2

Провал напряжения по [2] рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин. В соответствии с [2] провалы напряжения классифицируются по остаточному напряжению и длительности.

Длительность провала напряжения – это интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения падает ниже порогового значения начала провала напряжения, и моментом, когда напряжение возрастет выше порогового значения окончания провала напряжения.

Остаточное напряжение провала напряжения – это минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения. Остаточное напряжение провала напряжения выражают в процентах опорного напряжения. Опорное напряжение при оценке провалов напряжения считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания [2]. Однако использование номинального или согласованного напряжения при оценке остаточного напряжения

при провале напряжения U в процентах опорного напряжения или глубины провала напряжения $\delta U_{\text{п}}$ в общем случае не будет отражать действительное значение изменения напряжения в процессе его провала, что проиллюстрировано на рис. 6. При этом остаточное напряжение U , выраженное в именованных единицах измерения, отразит фактическое напряжение в процессе провала, а выраженное в процентах от опорного напряжения $U_{\text{о.п}}$ будет иметь погрешность, обусловленную разностью между значением опорного напряжения и значением напряжения нормального режима, предшествующего появлению провала напряжения. Такая же ситуация будет происходить при определении глубины провала напряжения $\delta U_{\text{п}}$ относительно опорного напряжения $U_{\text{о.п}}$, равного номинальному или согласованному напряжению электропитания.

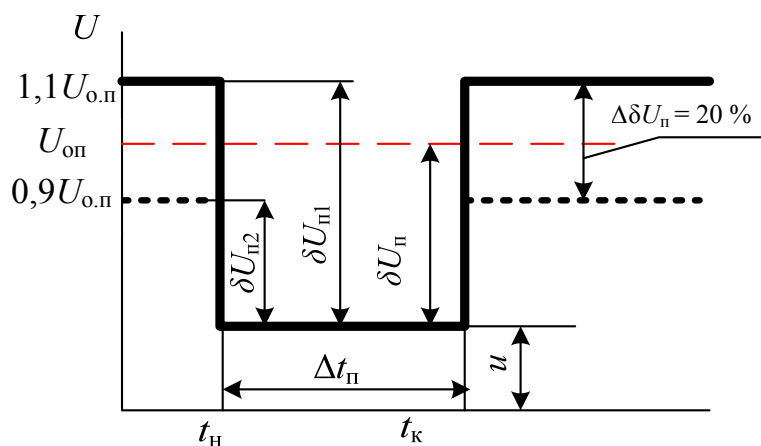


Рис. 6. Параметры провала напряжения

Более точно остаточное напряжение провала напряжения в процентах при провале будет выражено при использовании скользящего опорного напряжения сравнения. Скользящее опорное напряжение сравнения (*sliding reference voltage*) U_{sr} — значение напряжения, усредненное за определенный интервал времени, предшествующий появлению провала напряжения, перенапряжения или быстрого изменения напряжения (ГОСТ 30804.4.30) [4].

В [4] описано, что значение остаточного напряжения часто является полезным для потребителей электрической энергии и может быть более предпочтительным, чем глубина провала, так как позволяет оценить близость напряжения к нулю. В то же время глубина провала напряжения часто является полезной для поставщиков электрической энергии, особенно применительно к высоковольтным системам электроснабжения или в случаях, когда используется скользящее опорное напряжение сравнения. В [2] приведена таблица классификации провалов напряжения по остаточному напряжению U , % опорного напряжения и длительности.

В настоящее время на подстанциях электрических сетей установлены цифровые средства регистрации аварийных событий, с помощью которых возможно определять параметры провалов напряжения.

Например, на линиях подстанций Гомельских электрических сетей установлены регистраторы электрических процессов цифровые «REGINA», на линиях подстанций Оршанских электрических сетей установлены цифровые регистраторы электрических процессов «ПАРМА РП4.06М» [5], укомплектованные соответственно программа-

ми «REGINA» и Transcor. Программа Transcor предназначена для просмотра и печати файлов осциллограмм, полученных цифровыми регистраторами аварийных процессов. Пример провала напряжения, зарегистрированный регистратором электрических процессов «ПАРМА РП4.06М» и визуализированный программой Transcor, показан на рис. 7.

Для классификации провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности необходимо учитывать следующее: в трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения – момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

Провалы напряжения измеряют в соответствии с ГОСТ 30804.4.30 [4] на основе измерений среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода.

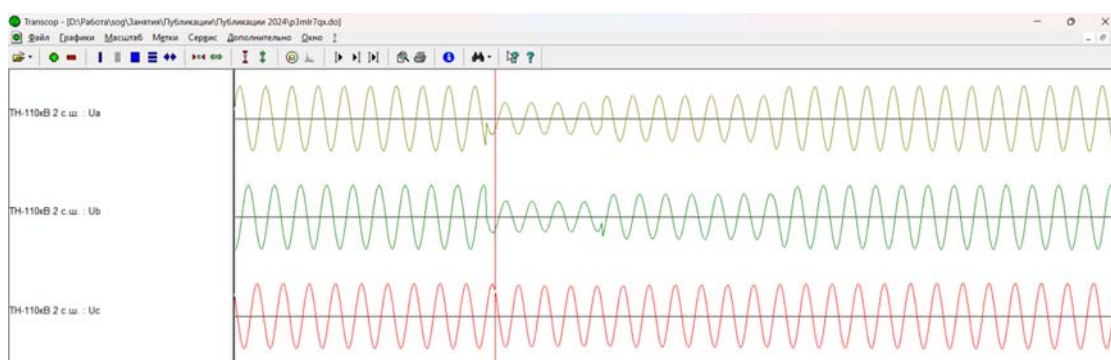


Рис. 7. Пример провала напряжения, зарегистрированный регистратором электрических процессов «ПАРМА РП4.06М» и визуализированный программой Transcor

В электрических сетях низкого напряжения, четырехпроводных трехфазных системах учитывают фазные напряжения; в трехпроводных трехфазных системах учитывают линейные напряжения; в случае однофазного подключения учитывают питающее напряжение (фазное или линейное – в соответствии с подключением потребителя).

Пороговое значение начала провала напряжения принимают равным 90 % опорного напряжения.

При измерениях в многофазных системах рекомендуется определять и записывать число фаз, затрагиваемых каждым событием.

Для электрических сетей трехфазных систем следует использовать многофазное сведение данных, которое заключается в определении эквивалентного события, характеризующегося одной длительностью и одним остаточным напряжением.

Пример необходимой информации [5] для классификации провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в соответствии с требованиями [2] на примере Оршанских электрических сетей с учетом вышеизложенного представлен в табл. 1. При этом в качестве опорного напряжения $U_{o.n}$, кВ применялось скользящее опорное напряжение сравнения U_{sr} и остаточное напряжение u , % определялось от скользящего опорного напряжения сравнения.

Таблица 1

Параметры провалов напряжения в Оршанских электрических сетях

Но- мер п/п	Дата	Время	Подстанция	ВЛ	U _{ном} , кВ	Файл события	Количество фаз провала	Количество провалов за событие	Фаза А				Фаза В				Фаза С			
									$\Delta t_{п},$ с	U _{ост} , кВ	U _{ост} , кВ	и, %	$\Delta t_{п},$ с	U _{ост} , кВ	U _{ост} , кВ	и, %	$\Delta t_{п},$ с	U _{ост} , кВ	U _{ост} , кВ	и, %
120	24.04. 2013	13:59	Орша- Сев.	№ 2 Орша- 330	110	p3mlr7qx.do	2	2	0,219	68,53	33,44	49	0,219	68,97	33,35	48	0,219	68,83	65,94	96
156	12.05. 2014	18:40	Орша- Сев.	№ 1 Орша- 330	110	p3n5gwvp.do	2	2	0,216	69,45	36,71	53	0,216	69,9	31,92	46	0,216	69,59	67,88	98
371	12.08. 2019	15:34	Орша- КС	КС-2	110	p3pw4iwy.do	3	–	0,917	67,72	60,79	90	0,787	69,3	61,52	89	0,787	69,32	61,64	89
372	14.08. 2019	23:09	Орша- Сев.	Заднеп- ровье	110	p3pw8tb9.do	1	–	0,135	67,36	65,6	97	0,135	68,3	38,3	56	0,135	68,05	66,77	98

В процессе обработки осциллограмм 300 аварийных событий, зафиксированных за период с 14.02.2008 по 02.11.2019 г., в Оршанских электрических сетях с помощью цифровых регистраторов «ПАРМА РП4.06М» были определены необходимые параметры провалов напряжения, что позволило классифицировать их по остаточному напряжению и длительности в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 [2] (табл. 2).

Таблица 2

**Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению
и длительности, зарегистрированных в Оршанских электрических сетях
с 14.02.2008 по 02.11.2019 г.**

Остаточное напряже- ние u , % опорного напряжения	Длительность провала (прерывания) напряжения $\Delta t_{п}$, с в Оршанских электрических сетях с 14.02.2008 по 02.11.2019 г.						Всего провалов напряже- ния
	$0,01 < \Delta t_{п} < 0,2$	$0,2 < \Delta t_{п} < 0,5$	$0,5 < \Delta t_{п} < 1$	$1 < \Delta t_{п} < 5$	$5 < \Delta t_{п} < 20$	$20 < \Delta t_{п} < 60$	
$90 > u \geq 85$	48	5	2	9	–	–	64
$85 > u \geq 70$	43	17	3	10	–	–	73
$70 > u \geq 40$	110	16	1	–	–	–	127
$40 > u \geq 10$	17	9	3	1	–	–	30
$10 > u \geq 0$	3	–	–	2	1	–	6
<i>Итого</i>	221	47	9	22	1	0	300

В табл. 3 приведена классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-013 [2], полученная в процессе обработки осциллограмм 354 аварийных событий, зафиксированных за период с 01.01.2009 по 31.12.2018 г. в Гомельских электрических сетях с помощью регистраторов электрических процессов цифровых «REGINA».

Таблица 3

Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности, зарегистрированных в Гомельских электрических сетях с 01.01.2009 по 31.12.2018 г.

Остаточное напряжение u , % опорного напряжения	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_n , с в Гомельских электрических сетях с 01.01.2009 по 31.12.2018 г.						Всего провалов напряжения
	$0,01 < \Delta t_n < 0,2$	$0,2 < \Delta t_n < 0,5$	$0,5 < \Delta t_n < 1$	$1 < \Delta t_n < 5$	$5 < \Delta t_n < 20$	$20 < \Delta t_n < 60$	
$90 > u \geq 85$	35	11	2	–	–	–	48
$85 > u \geq 70$	64	20	1	3	–	–	88
$70 > u \geq 40$	92	18	–	–	–	–	110
$40 > u \geq 10$	48	23	5	1	–	–	77
$10 > u \geq 0$	19	6	1	4	1	–	31
<i>Итого</i>	258	78	9	8	1	0	354

В табл. 4 дана классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 [2], полученная в процессе обработки осциллограмм 64 аварийных событий, зафиксированных за период с 14.02.2014 по 01.10.2019 г. в Бобруйских электрических сетях.

Таблица 4

Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности, зарегистрированных в Бобруйских электрических сетях с 14.02.2014 по 01.10.2019 г.

Остаточное напряжение u , % опорного напряжения	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_n , с в Бобруйских электрических сетях с 14.02.2014 по 01.10.2019 г.						Всего провалов напряжения
	$0,01 < \Delta t_n < 0,2$	$0,2 < \Delta t_n < 0,5$	$0,5 < \Delta t_n < 1$	$1 < \Delta t_n < 5$	$5 < \Delta t_n < 20$	$20 < \Delta t_n < 60$	
$90 > u \geq 85$	3		2		–	–	5
$85 > u \geq 70$	6	2	3	1	–	–	12
$70 > u \geq 40$	14	2		2	–	–	18
$40 > u \geq 10$	1			1	–	–	2
$10 > u \geq 0$	7			16	4	–	27
<i>Итого</i>	31	4	5	20	4	0	64

На рис. 8 представлено распределение вероятностей рассмотренных провалов напряжения по диапазонам остаточного напряжения, рекомендуемым в [2], $P_{при}$, % в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических сетях.

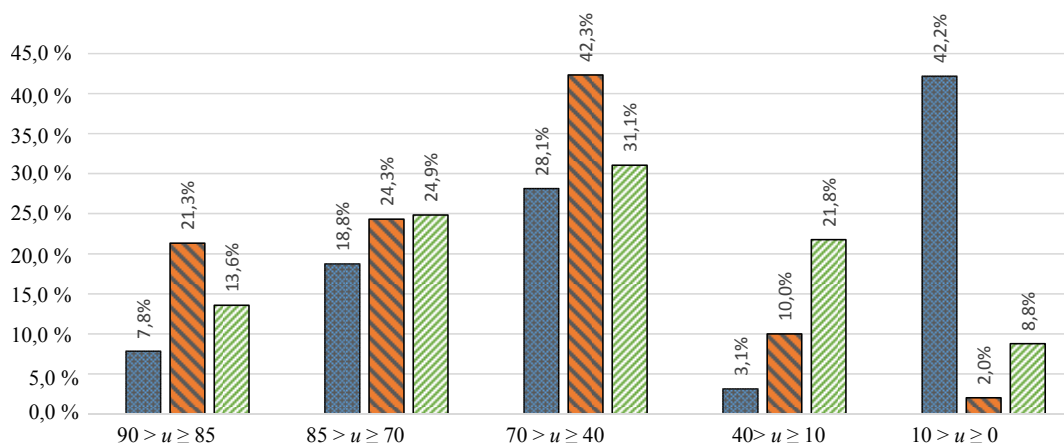


Рис. 8. Распределение вероятностей рассмотренных провалов напряжения по остаточному напряжению, $P_{при}$, % в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических сетях:
 ■ – $P_{при}$, % – Бобруйские ЭС; ■ – $P_{при}$, % – Оршанские ЭС;
 ■ – $P_{при}$, % – Гомельские ЭС

На рис. 9 показано распределение вероятностей рассмотренных провалов напряжения по диапазонам длительности, рекомендуемым в [2], $P_{пр}\Delta t_n$, % в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических сетях.

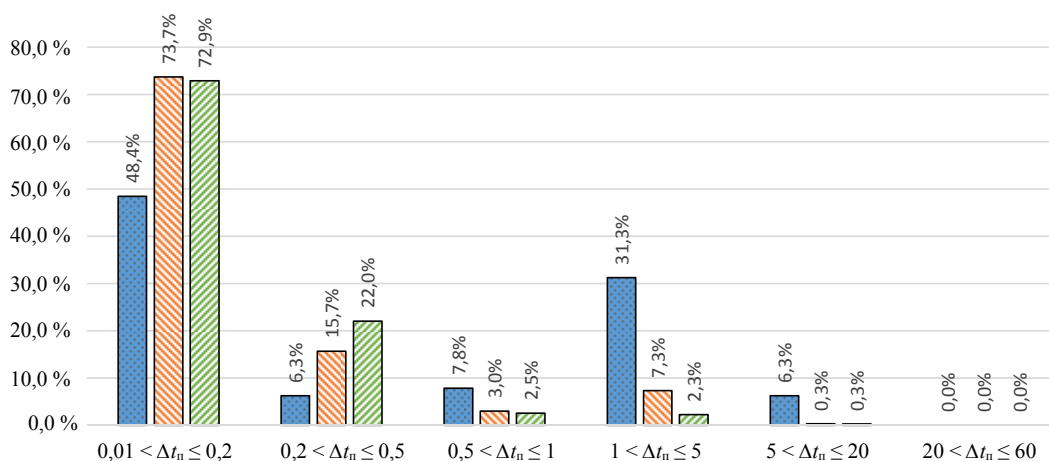


Рис. 9. Распределение вероятностей рассмотренных провалов напряжения по длительности, $P_{пр}\Delta t_n$, % в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических сетях:
 ■ – $P_{пр}\Delta t_n$, % – Бобруйские ЭС; ■ – $P_{пр}\Delta t_n$, % – Оршанские ЭС;
 ■ – $P_{пр}\Delta t_n$, % – Гомельские ЭС

На рис. 8 и 9 наблюдается некоторое совпадение вероятностей рассмотренных провалов напряжения в отдельных диапазонах по остаточному напряжению, $P_{при}$, % и по длительности, $P_{пр}\Delta t_n$, %, но на таком статистическом материале устанавливать какие-то закономерности нецелесообразно.

Заключение

Таким образом, представленная классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности, полученная в процессе обработки осциллограмм аварийных событий в Бобруйских, Оршанских и Гомельских электрических

сетях, позволяет дать предварительную оценку параметров этих кратковременных нарушений электроснабжения и определить требования к системам электроснабжения предприятий, содержащих помехочувствительные электроприемники.

Для учета статистических данных об остаточном напряжении и длительности провалов напряжения при заключении договоров на поставку или передачу электрической энергии, особенно для чувствительных к этим помехам потребителям, следует проводить длительный мониторинг с помощью специальных средств измерения. При этом пункты мониторинга необходимо иметь в точках передачи электроэнергии потребителям (на границе раздела балансовой принадлежности) и в точках общего потребления, т. е. на стороне среднего, а, возможно, и низкого напряжения.

Литература

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. – Взамен ГОСТ 13109-87 ; введ. 01.01.1991. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 31 с.
2. Электрическая энергия Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160 : 2010, NEQ) : ГОСТ 32144-2013. – Взамен ГОСТ 13109-97 ; введ. 01.07.2014. – Минск : Госстандарт, 2015. – 16 с.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 33073-2014. – Введ. 01.01.2015. – М. : Стандартиформ, 2015. – 42 с.
4. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии (IEC 61000-4-30 : 2008, MOD) : ГОСТ 30804.4.30-2013. – Введ. 01.01.2014. – М. : Стандартиформ, 2014. – 52 с.
5. Широков, О. Г. Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности / О. Г. Широков, Т. В. Алферова, А. В. Купава // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 195–198.
6. Широков, О. Г. Определение параметров провалов напряжения и границ устойчивости электроприемников и их узлов к провалам напряжения по цепи питания / О. Г. Широков // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VII Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2007. – С. 161–164.
7. Широков, О. Г. Исследование влияний провалов напряжения на работу тиристорного электропривода постоянного тока SSD / О. Г. Широков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2004. – № 3. – С. 43–48.
8. Попов, А. Н. Устранение провалов напряжения в электрических сетях промышленных предприятий // А. Н. Попов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 163–167.
9. Шклярский, А. Я. Причины возникновения провалов напряжения и средства их компенсации / А. Я. Шклярский // Современная техника и технологии. – 2014. – № 5. – URL: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3833> (дата обращения: 19.02.2026).
10. Шпиганович, А. Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях / А. Н. Шпиганович, И. А. Черных, И. Г. Шилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2006. – № 2. – С. 21–26.

References

1. GOST 13109-97. *Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electrical energy quality standards in general-purpose power supply systems*. Minsk, Mezhgosudarstvennyi soviet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 1999, 31 p. (in Russian).
2. GOST 32144-2013. *Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electrical energy quality standards in integrated general-purpose power supply systems*. Minsk, Gosstandart, 2015. 16 p. (in Russian).
3. GOST 33073-2014. *Electrical energy. electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electrical energy quality in general-purpose power supply systems*. Moscow, Standartinform, 2015. 42 p. (in Russian).
4. GOST 30804.4.30-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody Izmereniy Pokazateley Kachestva Elektricheskoy Energii. IEC 61000-4-30:2008, MOD*. Moscow, Standartinform, 2014. 52 p. (in Russian).
5. Shirokov O. G., Alferova T. V., Kupava A. V. Classification of voltage sags by residual voltage and duration. *Sovremennye problemy mashinovedeniya: materialy XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Gomel', 22 okt. 2020 g.* [Contemporary Problems in Mechanical Engineering: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conf. Gomel', October 22, 2020]. Gomel', Gomel'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni P. O. Sukhogo, 2020, pp. 195–198 (in Russian).
6. Shirokov O. G. Determination of voltage dip parameters and stability limits of electrical receivers and their components to voltage dips in the power supply circuit. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya: materialy VII Mezhdunar. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov i aspirantov, Gomel', 2007 g.* [Research and development in mechanical engineering, power engineering, and management: proceedings of the VII International interuniversity scientific and technical conference of students, master's degree students, and postgraduates, Gomel', 2007]. Gomel', Gomel'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni P. O. Sukhogo, 2007, pp. 161–164 (in Russian).
7. Shirokov O. G. Study of the influence of voltage sags on the operation of the SSD. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2004, no. 3, pp. 43–48 (in Russian).
8. Popov A. N. Elimination of voltage sags in electrical networks of industrial enterprises. *Polzovskii vestnik*, 2013, no. 4–2, pp. 163–167 (in Russian).
9. Shklyarskii A. Ya. Causes of voltage drops and means of their compensation. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern technics and technologies*, 2014, no. 5. Available at: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3833> (accessed 19 February 2025) (in Russian).
10. Shpiganovich A. N., Chernykh I. A., Shilov I. G. Voltage dips in high-voltage electrical networks. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*, 2006, no. 2, pp. 21–26 (in Russian).

Поступила 19.02.2026 г.