

УДК 621.31

М.С. Ершов, д.т.н., профессор, кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина;

В.А. Анцифоров, аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, e-mail: antsiforov@mail.ru

Причины и параметры кратковременных нарушений электроснабжения промышленных объектов

Рассмотрены основные параметры кратковременных нарушений электроснабжения, на основании анализа литературных источников и данных эксплуатации определены характерные диапазоны этих параметров, которые могут быть использованы в качестве исходных данных при моделировании режимов и процессов промышленных электротехнических систем. На основании анализа провалов напряжения, связанных с грозовой деятельностью, установлена необходимость и модифицирована расчетная схема моделирования независимости источников питания систем централизованного электроснабжения. Подчеркнута необходимость совершенствования уровня грозозащиты воздушных линий электропередачи, питающих объекты нефтегазовой промышленности.

Ключевые слова: системы электроснабжения, независимость источников питания, кратковременные нарушения электроснабжения.

Надежное функционирование современного промышленного производства невозможно без качественного электроснабжения. С появлением цифровой электроники, мощных электроприводов с частотным регулированием даже кратковременные нарушения электроснабжения (продолжительностью до 0,1–0,2 с), проявляющиеся в узлах нагрузки в виде провалов напряжения, могут приводить к самоотключению электроприемников, нарушению устойчивости электромеханических систем, нарушению и останову технологического процесса. Самоотключение низковольтных двигателей происходит из-за отпадания магнитных пускателей и контакторов. При полном исчезновении напряжения время отпадания пускателей составляет порядка одного периода основной гармоники напряжения – 0,02 с. Допустимое время перерыва электроснабжения для частотных асинхронных электроприводов также весьма кратковременно (до нескольких периодов) и зависит от мощности и

загрузки двигателя [1]. В пределах от 0,2 до 1 с находится время динамической устойчивости мощных нерегулируемых приводов и многомашинных электротехнических систем [2].

Проблема воздействия кратковременных нарушений электроснабжения на работу промышленных потребителей электроэнергии становится все более актуальной [3].

Причинами провалов напряжения (внезапное понижение напряжения ниже $0,9 U_{ном}$) являются короткие замыкания, которые могут быть обусловлены ударами молнии, загрязнением изоляции, механическими повреждениями изоляторов и опор линий электропередачи, касанием проводов посторонними предметами и другие [4].

Провалы напряжения характеризуются следующими показателями:

- вид (симметричные, несимметричные);
- глубина Δu ;
- длительность τ ;
- частота.

Согласно статистике, 70–88% повреждений в наиболее распространенных сетях 110–220 кВ внешнего электроснабжения приходится на однофазные короткие замыкания (КЗ), 10–20% – на двухфазные и 2–10% – на трехфазные КЗ. В распределительных сетях предприятий (кабельные линии 6–10 кВ) также преобладают однофазные КЗ на землю, но при выполнении мероприятий по компенсации емкостных токов, оперативному отысканию и отключению поврежденного оборудования они не переходят в многофазные замыкания и поэтому не вызывают провалов напряжения. Наибольшая несимметрия напряжений для данного вида КЗ имеет место в точке аварии. Примеры диаграмм напряжений для несимметричных КЗ приведены на рисунке 1. По мере удаления от места аварии диаграммы напряжений деформируются: возрастает составляющая напряжения прямой последовательности и уменьшаются другие симметричные составляющие

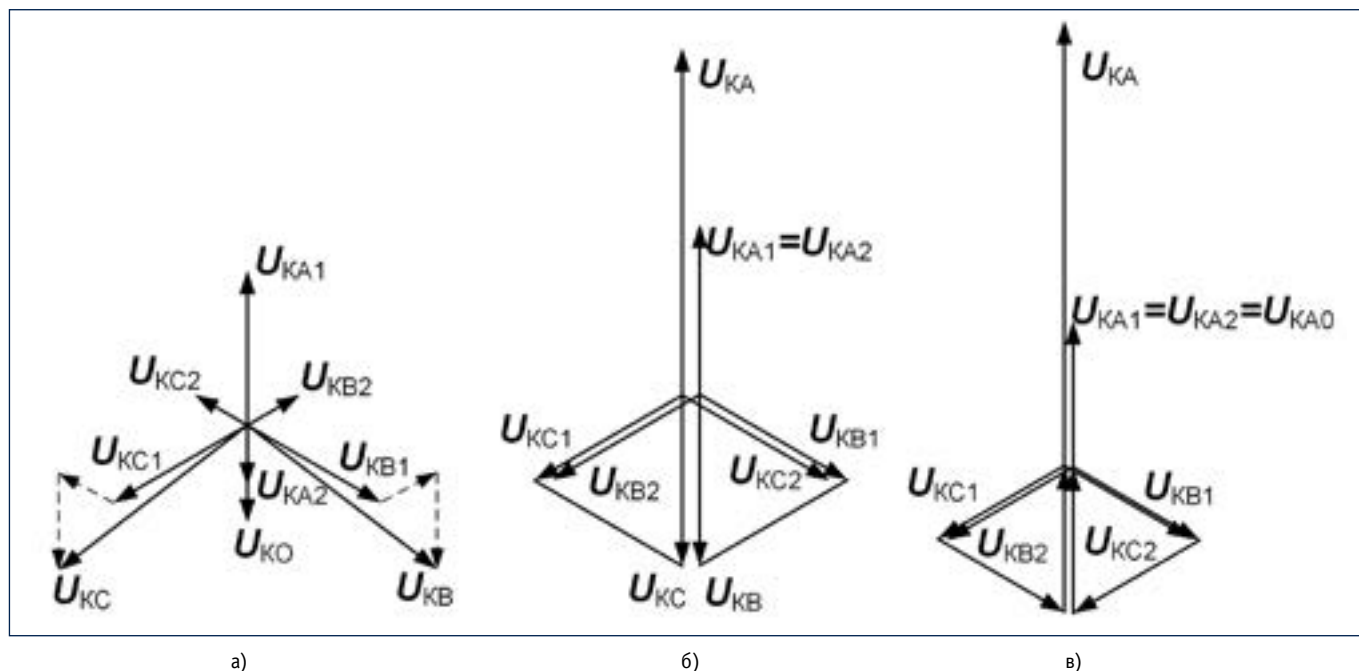


Рис. 1. Векторные диаграммы напряжений при несимметричных КЗ:
а) однофазном; б) двухфазном; в) двухфазном на землю

напряжения, что продемонстрировано на рисунке 2.

ГЛУБИНА ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ Δu

изменяется в пределах 0–1 отн. ед. и зависит от электрической удаленности (сопротивления) точки КЗ от узла, в котором фиксируется напряжение, а также от вида КЗ. При глубоких провалах напряжения узлы с электродвигательной нагрузкой отключаются (во избежание потери устойчивости и неупорядоченного отключения двигателей). Отключение питания узла нагрузки осуществляется защитой минимального напряжения, действующей по факту одновременного глубоко (обычно на 0,3 отн. ед. и более) провала линейных напряжений или по факту снижения одного линейного напряжения и контроле напряжения обратной последовательности (пусковой орган института «Тяжпромэлектропроект») [5]. Параметром, определяющим динамическую устойчивость электротехнической системы, является ограниченное во времени остаточное напряжение прямой последовательности, которое также может быть использовано в пусковом органе защиты минимального напряжения [6].

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ

τ определяется временем отключения линии, если КЗ ликвидируется действием релейной защиты. Время отключения линии под действием штатных быстродействующих защит в сетях 110 кВ и выше составляет порядка 0,12–0,15 с. Если восстановление нормального напряжения в узле требует срабатывания автоматики сетей, то длительность провала напряжения может достигать нескольких секунд, а при системных авариях и более. Из этих показателей согласно ГОСТ 13109-97 [7] ограничивался по предельно допустимому значению только один показатель – длительность провала напряжения,

который в сетях до 20 кВ не должен был превышать 30 с. Согласно новому стандарту, введенному в действие в 2013 г. взамен указанного выше ГОСТ Р 54149-2010 [8], длительность провалов напряжения вообще не нормируется, что полностью перекладывает решение проблемы кратковременных нарушений электроснабжения с поставщиков на потребителей электроэнергии [9]. По данным регистрации напряжения, в узлах нагрузки длительность провалов напряжения может быть меньше 0,12 с. Такие кратковременные провалы напряжения, часто вызванные грозовой активностью, имеют относительно умеренную интенсивность (остаточное напряжение при провалах порядка 0,4

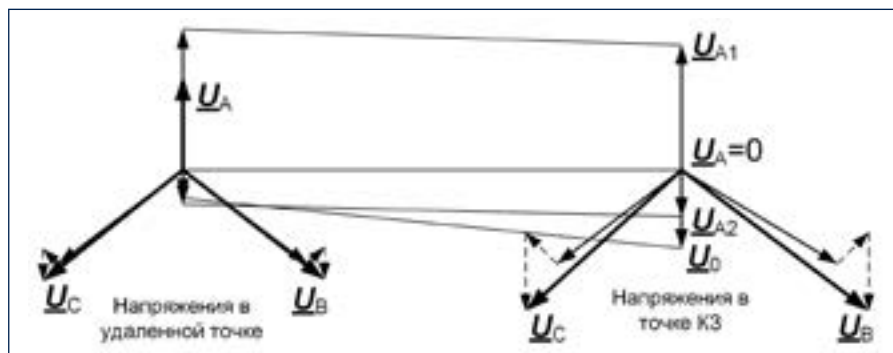


Рис. 2. Эпюры напряжений отдельных последовательностей и векторные диаграммы напряжений при однофазном КЗ

Таблица 1. Показатели надежности электроснабжения по временной и проектной схемам

Схема	$\Delta u_{\text{св}}$	$P_{\Delta u}$	τ_0	P_{τ}	P	$N_{\text{откл}}$
1-й ввод						
Временная	0,27	0,827	0,25	0,423	0,350	3,50
Проектная	0,30	0,769	0,45	0,212	0,163	1,63
2-й ввод						
Временная	0,26	0,852	0,35	0,298	0,254	2,54
Проектная	0,29	0,787	1,00	0,032	0,025	0,25
3-й ввод						
Временная	0,29	0,787	0,20	0,502	0,395	3,95
Проектная	0,30	0,763	0,25	0,423	0,323	3,23

отн. ед. и выше) и длительность. Вместе с тем провалы напряжения, вызванные грозowymi явлениями, с большой вероятностью, приходят одновременно на два ввода электротехнической системы. Как отмечено в статье [1], этот факт обусловлен тем, что питание предприятий часто осуществляется по двухцепным воздушным линиям, «что предопределяет возможность передачи высокого потенциала, наводимого в одной цепи при грозовом разряде в соседнюю цепь за счет большого значения взаимной индукции».

НАИБОЛЕЕ ПОЛНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ГЛУБИНЫ ΔU И ДЛИТЕЛЬНОСТИ τ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для практических целей можно воспользоваться рекомендациями [10], согласно которым, по данным многолетних наблюдений, плотность распределения случайных величин Δu и τ подчиняется двумерному экспоненциальному закону

$$f(\Delta u, \tau) = (\Delta u_{\text{мо}})^{-1} (\tau_{\text{мо}})^{-1} \exp\{-(\Delta u / \Delta u_{\text{мо}}) - (\tau / \tau_{\text{мо}})\}, \quad (1)$$

где $\Delta u_{\text{мо}}$ – математическое ожидание (среднее) глубины провалов напряжения; $\tau_{\text{мо}}$ – математическое ожидание

(среднее) длительности провалов напряжения.

По статистическим данным, глубина и длительность провалов напряжения практически независимы друг от друга, то есть являются некоррелированными случайными величинами. Поэтому эти величины могут характеризоваться отдельно одномерными законами распределения

$$f(\Delta u) = (\Delta u_{\text{мо}})^{-1} \exp(-\Delta u / \Delta u_{\text{мо}}), \quad (2)$$

$$f(\tau) = (\tau_{\text{мо}})^{-1} \exp(-\tau / \tau_{\text{мо}}). \quad (3)$$

Вероятность попадания параметров Δu и τ в заданные интервалы $(\Delta u_1, \Delta u_2)$ и (τ_1, τ_2) соответственно может быть определена из выражения

$$P\{\Delta u(\Delta u_1, \Delta u_2) \& (\tau_1, \tau_2)\} = P_{\Delta u} P_{\tau} = \int_{\Delta u_1}^{\Delta u_2} f(\Delta u) d(\Delta u) \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $P_{\Delta u}$ – вероятность провала напряжения ниже границы статической устойчивости $u_{\text{св}}$; P_{τ} – вероятность провала напряжения длительностью более времени динамической устойчивости τ_0 . Соответственно, пределы интегрирования в формуле (5) определяются показателями устойчивости электротехнической системы: $u_{\text{св}}$ – напряжением статической устойчивости и τ_0 – временем динамической устойчивости

системы. Вероятность P критических провалов напряжения определяет математическое ожидание вынужденных отключений узла нагрузки $N_{\text{откл}}$;

$$N_{\text{откл}} = N_{\text{ср}} P, \quad (6)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее за год число провалов напряжения, фиксируемых аварийными осциллографами по одному вводу.

Для примера: по многолетним данным обработки аварийных осциллограмм, снятых на ГПП крупного газоперерабатывающего завода (ГПЗ), среднее значение глубины провалов напряжения составило $\Delta u_{\text{мо}} = 0,375$ отн. ед., а средняя длительность провалов напряжения $\tau_{\text{мо}} = 0,29$ с, число провалов напряжения $N_{\text{ср}} = 10$ [10]. В начале эксплуатации завода было установлено, что переход с временной на проектную схему электроснабжения позволит уменьшить напряжения статической устойчивости и увеличит время динамической устойчивости трех основных узлов электрической нагрузки предприятия (шины РУ ГПП). Приведенные выше выражения позволили оценить, насколько сократится число отключений основных узлов нагрузки при переводе системы электроснабжения на проектную схему. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Математическое ожидание числа критических провалов напряжения и соот-

Таблица 2. Показатели отказов воздушных линий

Воздушные линии	Параметр потока отказов, отказ/год на 100 км при напряжении, кВ					
	750	500	330	220	110	35
Одноцепные	0,6	0,6	1,3	1,7	3,9	2,0
Двухцепные (отказ одной цепи)	–	–	3,8	2,0	3,9	1,6
Двухцепные (отказ двух цепей)	–	–	0,4	0,4	0,9	0,4

Таблица 3. Эксплуатационные показатели ВЛ 110–500 кВ по отключениям

U _н , кВ	Число отключений на 100 км и 1 год эксплуатации				Доля грозовых отключений, %	
	n _{общ}		n' _г		Пределы изменения	Средняя
	Пределы изменения	Среднее	Пределы изменения	Среднее		
110	3,5–14,4	9,0	0,33–2,3	1,0	4,5–22,5	12
220	1,3–5,8	3,0	0,03–1,2	0,45	1,2–30,0	15
330	0,4–3,0	2,0	0,10–0,66	0,20	4,3–51,1	10
500	–	0,6	–	0,08	–	15

Примечание: n_{общ} – число отключений по всем причинам; n'_г – число грозовых отключений.

ветственно числа массовых отключений электроприемников составляет:

- для существующей схемы N_{откл} = 9,99;
- для проектной схемы N_{откл} = 5,11.

Таким образом, на основании выполненных расчетов устойчивости узлов электродвигательной нагрузки и последующего анализа надежности электроснабжения можно заключить, что переход от временной на проектную схему внешнего электроснабжения существенно сократит число массовых отключений электрооборудования ГПЗ.

ЧАСТОТА ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

на вводах систем промышленного электроснабжения может быть определена по результатам мониторинга напряжения на вводах системы электроснабжения в процессе эксплуатации или определена в результате компьютерного моделирования системы внешнего электроснабжения [6].

Остановимся подробнее на определении исходных данных частоты отказов для компьютерного моделирования. В первую очередь частота кратковременных нарушений электроснабжения – провалов напряжения на вводах системы определяется отказами, сопровождающимися короткими замыканиями воздушных линий (ВЛ) электропередачи 35–330 кВ, в особенности линий напряжением 110 кВ, протяженность которых намного превышает протяженность линий других классов напряжения. Основными причинами нарушений в работе ВЛ являются: климатические воздействия (ветер и гололед), превышающие расчетные значения; грозовые перенапряжения; посторонние и несанкционированные воздействия. В отечественной энергетике особенно перспективным направлением сниже-

ния частоты отказов воздушных линий является повышение грозоупорности линий электропередачи, поэтому данное явление целесообразно рассмотреть подробнее.

В технической литературе встречаются различные значения частоты (параметра потока) отказов воздушных линий электропередачи. Для сравнения в таблице 2 приведены данные, взятые из справочника по проектированию электрических сетей [11], в таблице 3 – данные из руководящего документа РАО «ЕЭС России».

Характерный большой разброс эксплуатационных показателей грозоупорно-

сти ВЛ 110–330 кВ является следствием местных условий регионов по уровню грозовой деятельности и характеристикам грунта, а также различий в конструкции опор [12].

Показатели грозоупорности зависят от конструкции воздушных линий и наиболее проявляются для ВЛ напряжением 110 кВ и выше, выполненных на металлических и железобетонных опорах и защищенных тросом. На ВЛ, защищенной тросом, возможны грозовые отключения при переходе импульсных разрядов в дуговые от ударов в опору (n_{оп}), трос (n_{тр}) и прорыва молнии на провода (n_{пр}). Вероятность перехода

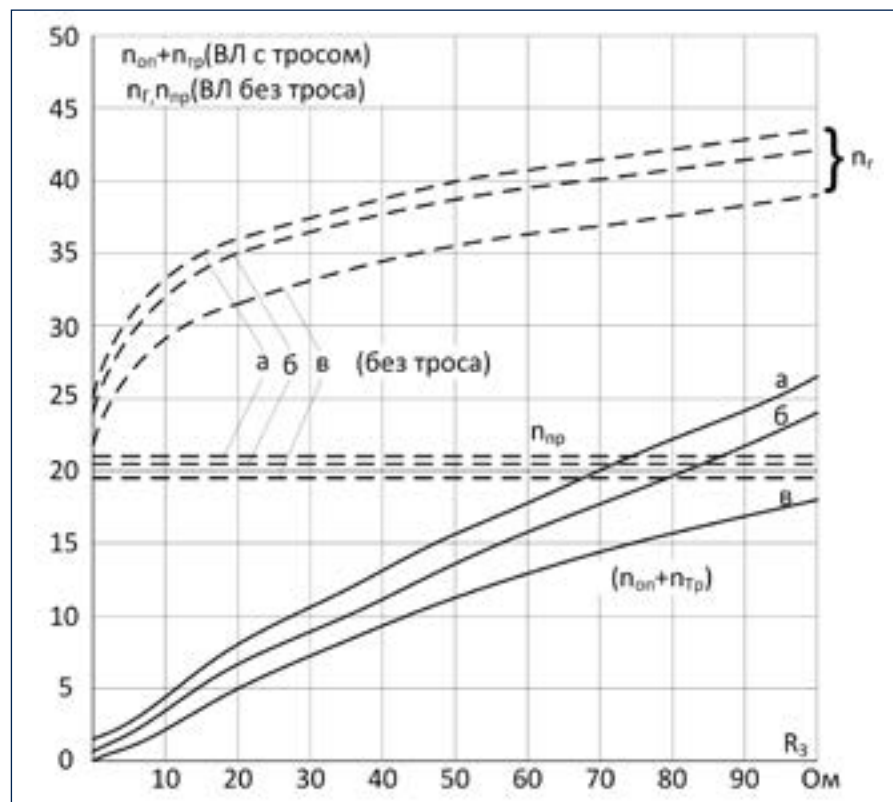


Рис. 3. Удельное число грозовых отключений ВЛ 110 кВ на одноцепных железобетонных опорах с одним тросом при различной линейной изоляции (а, б, в), на 100 км и 100 грозовых часов

импульсного перекрытия в дугу зависит от величины рабочего напряжения и материала опор. В случае деревянных опор вероятность перехода в дугу мала; для линий на железобетонных и металлических опорах эта вероятность порядка 0,5 для сетей 3–35 кВ, а для ЛЭП 110–500 кВ близка к единице [13]. При ударе в опору или трос возникают обратные перекрытия линейной изоляции из-за перенапряжений, возникающих при протекании тока молнии по опоре.

Практически каждый удар молнии в провод ВЛ 110 кВ вызывает перекрытие изоляции, в то время как опасными при прорывах молнии на провода ВЛ 500 кВ являются 30–40% разрядов молнии. Удельное число отключений для ВЛ с тросом определяется по формуле

$$n_{\Gamma} = n_{\text{он}} + n_{\text{мп}} + n_{\text{пр}} \quad (6)$$

Удельное число отключений ВЛ без троса определяется по формуле

$$n_{\Gamma} = n_{\text{он}} + n_{\text{пр}} \quad (7)$$

Очевидно, что значения составляющих в формулах не одинаково, методика их определения приведена в [12].

Особенностью отключений ВЛ, связанных с грозовой деятельностью, является возможность одновременных отключений цепей одной двухцепной линии, то есть отключения цепей ВЛ электропередачи являются зависимыми событиями. Это можно проиллюстрировать примером, взятым из [12] и приведенным на рисунке 3. В среднем, как следует из [12], около 50% грозовых разрядов, попадающих в двухцепные ВЛ, приводят к одновременным отключениям обеих цепей. Этот факт следует учитывать при моделировании зависимости источников питания в системах централизованного электроснабжения промышленных производств. Для этого расчетную схему [6] предлагается

дополнить, добавив в средней части двухцепных ВЛ фиктивные узлы, объединяющий цепи линии, в котором моделируются короткие замыкания. Частота таких аварий может быть взята из таблицы 1 или определена по формуле

$$n_{\text{ој}} = 0,5n'_{\Gamma}L_{\text{вл}} \quad (8)$$

где n'_{Γ} – удельное число грозовых отключений (табл. 2); $L_{\text{вл}}$ – длина двухцепной воздушной линии.

Отметим, что поражаемость разрядами молнии каждой из двух одинаковых воздушных линий, идущих в одном коридоре, не повышается, как можно было ожидать, а наоборот, снижается [12] из-за экранирующего действия линий друг на друга.

Традиционно грозозащита воздушных линий электропередачи 110–750 кВ с металлическими и железобетонными опорами строится на использовании грозозащитных тросов и заземлении опор. Согласно «Правилам устройства электроустановок», сооружение ВЛ 110–500 кВ или участков без использования грозозащитных тросов допускается только в особых случаях:

- 1) в районах с числом грозовых часов в году менее 20 и в горных районах с плотностью разрядов на землю менее 1,5 на 1 км²/год;
- 2) на участках ВЛ в районах с плохо проводящими грунтами;
- 3) на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 25 мм;
- 4) для ВЛ с усиленной изоляцией провода относительно заземленных частей опоры при обеспечении расчетного числа грозовых отключений линии.

При этом число грозовых отключений линии для вышеперечисленных случаев, определенное расчетом с учетом опыта эксплуатации, не должно превышать без усиления изоляции трех в год для ВЛ 110–330 кВ и одного в год для ВЛ 500 кВ. Особое внимание уделяется электроснабжению объектов добычи и

транспорта нефти и газа, для которых запрещается сооружение воздушных линий 110–220 кВ без защиты от прямых ударов молнии тросами по всей длине (независимо от интенсивности грозовой деятельности и удельного эквивалентного сопротивления земли) [14]. Согласно классификации [12], рекомендуется грозозащиту ВЛ осуществлять по категории «В».

Отсутствие троса даже на ограниченном участке линии может существенно снижать грозоупорность ВЛ в целом. Негативные последствия грозовых отключений при ударах молнии в провод усугубляются повреждениями изоляции. Как показывает опыт эксплуатации, фактическое число грозовых отключений ВЛ без тросов зачастую превышает регламентируемые нормы. Грозовые отключения ВЛ без тросов обусловлены в основном прямыми ударами молнии в провод, которые приводят к перекрытию изоляции с вероятностью, близкой к единице, даже для ВЛ 500 кВ. [12] Для защиты таких ВЛ используют вентильные и трубчатые разрядники. На сегодняшний день применение таких средств защиты является малоэффективным. При проверке разрядников обслуживающий персонал зачастую сталкивается с их неисправностями, свидетельствующими о выработанном ресурсе.

В настоящее время в России идет процесс апробации и сравнения технологий защиты воздушных линий электропередачи от грозовых перенапряжений. В периодической литературе предлагается в качестве наиболее эффективной меры повышения грозоупорности ВЛ применение ограничителей перенапряжения (ОПН), устанавливаемых на опорах ВЛ. Существующая статистика применения ОПН в странах Европы и Японии показывает высокую надежность защиты ВЛ от индуцированных импульсов, хотя при прямых ударах молнии в токоведущий провод ограничители перенапряжения часто выходят из строя.

Литература:

1. Егоров А.В., Мелик-Шахназарова И.А., Суржиков А.В. Опыт повышения надежности электроснабжения высокотехнологичного производства // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2012. – №3/268.
2. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: Недра, 2011.
3. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. – 408 с.

4. Фишман В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий // Новости электротехники. – 2009. – №3 (57).
5. Беляев А.В. Противоаварийная автоматика в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. – СПб.: ЭИПК, 2007. – Ч. 1.
6. Ершов М.С., Егоров А.В., Анцифоров В.А. Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1.
7. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
8. ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (введен в действие с 01.01.2013).
9. Егоров А.В., Ершов М.С., Комков А.Н. Новый стандарт качества электрической энергии и вопросы регулирования взаимоотношений ее поставщиков и потребителей // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2012. – № 6.
10. Ершов М.С., Егоров А.В., Федоров В.А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприводов многомашинного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. – 1992. – № 7. – С. 23–26.
11. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2007.
12. РД 153-34.3-35.125-99 «Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений». – СПб.: Изд-во ЭИПК, 1999.
13. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИргУПС, 2005.
14. Гайворонский А.С. Грозозащита ВЛ без тросов. Опыт проектирования с применением линейных ОПН // Новости электротехники. – 2012. – №5 (77).

UDC 621.31

M.S. Ershov, Dr. Sci. Tech., professor, the chief of chair of theoretical electrical engineers and electrification oil and gas industry of the Russian Gubkin state university of oil and gas; **V.A. Antsiforov**, the research scientist of chair of theoretical electrical engineers and electrification oil and gas industry of the Gubkin Russian state university of oil and gas, e-mail: antsiforov@mail.ru

Causes and parameters of short-term perturbations of power supply of industrial facilities

Considered the basic parameters of the short-term violations of power supply. Based on the analysis of literary sources and data exploitation is defined characteristic ranges of these parameters, which can be used as an initial data to the simulation conditions and processes of industrial electrical systems. Based on the analysis of thunderstorms voltage dips, ascertained a requirement and modified the design scheme of modeling an independent of power supplies sources in centralized electrical power systems. Stressed the need to improve the level of lightning protection of overhead power lines supplying oil and gas industry.

Keywords: power supply systems, independence of power supplies, short-term violations of power supply.

References:

1. Yegorov A.V., Melik-Shakhnazarova I.A., Surzhikov A.V. Opyt povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya vysokotekhnologichnogo proizvodstva (Practice in reliability enhancement of high-technology production power supply) // Works of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. – 2012. – No. 3/268.
2. Yershov M.S., Yegorov A.V., Trifonov A.A. Ustoichivost' promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem (Industrial electrical system stability). – Moscow: Nedra, 2011.
3. Gurevich Yu.Ye., Kabikov K.V. Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinuyu raboty promyshlennogo potrebitelya (Specific features of power supply aimed at failure-free operation of industrial consumer). – Moscow: ELEX-KM, 2005. – 408 p.
4. Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatyi (Voltage depression in grids of industrial enterprises) // Electrical Engineering News. – 2009. – No. 3 (57).
5. Belyaev A.V. Protivoavariynaya avtomatika v uzлах nagruzki s sinkhronnymi elektrodvigatelyami bol'shoi motshnosti (Emergency control automation in load centers with synchronous high-powered motors). – СПб.: PEIPK, 2007. – Part 1.
6. Yershov M.S., Yegorov A.V., Antsiforov V.A. Metody otsenki nadezhnosti i nezavisimosti istochnikov pitaniya v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya (Methods for evaluating the reliability and independence of power sources in the industrial electric power supply systems) // Industrial Power Engineering. – 2014. – No. 1.
7. GOST 13109-97 «Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obtshego naznacheniya» («Electric power. Electromagnetic compatibility. Electric power quality standards in the general power supply systems»).
8. GOST R 54149-2010 «Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obtshego naznacheniya» («Electric power. Electromagnetic compatibility. Electric power quality standards in the general power supply systems») (put into effect from 01.01.2013).
9. Yegorov A.V., Yershov M.S., Komkov A.N. Novyi standart kachestva elektricheskoi energii i voprosy regulirovaniya vzaimootnosheniya ee postavshikov i potrebitel'ei (New electric power quality standard and issues on regulation of relationships between its suppliers and consumers) // NEFTEGAS Territory. – 2012. – No. 6.
10. Yershov M.S., Yegorov A.V., Fedorov V.A. Nekotorye voprosy povysheniya ustoichivosti elektroprivodov mnogomashinnogo kompleksa s nepreryvnym tekhnologicheskim protsessom pri vozmushcheniyakh v sisteme elektrosnabzheniya (Certain issues on stability improvement of electric drives of the multiple-computer complex with a continuous process with the power supply system disturbances) // Industrial Power Engineering. – 1992. – No. 7. – P. 23–26.
11. Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei (Electric grids design handbook) / Under the editorship of D.L. Faibisovich. – 2nd edition, revised and enlarged – Moscow: ENAS, 2007.
12. RD 153-34.3-35.125-99 «Rukovodstvo po zatshte elektricheskikh setei 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy» («Guideline for electric grids protection (6–1150 kV) from lightning and internal overvoltage»). – СПб.: PEIPK Publishing House, 1999.
13. Zakaryukin V.P. Tekhnika vysokikh napryazheniy (High-voltage engineering): Lecture notes. – Irkutsk: IrGUPS, 2005.
14. Gaivoronskiy A.S. Grozozatshita VL bez trossov. Opyt proektirovaniya s primeneniem lineinykh OPN (Wireless HV line lightning protection. Design experience with the use of linear overvoltage suppressors) // Electrical Engineering News. – 2012. – No. 5 (77).