

О применении УЗИП для защиты сети освещения

УДК 621.316.91

Сеть освещения с точки зрения грозозащиты обладает рядом особенностей: значительной протяженностью и низкой электрической прочностью изоляции. Функции системы освещения могут затрагивать вопросы безопасности и коммерческой эффективности предприятий. В данной статье предпринята попытка разработать систему обоснования применения УЗИП с целью защиты сетей освещения от грозовых перенапряжений. Решение такой задачи должно быть основано на экономическом расчете, исходными данными к которому является оценка рисков, связанных с повреждением оборудования.

Карпов П.Н.,
начальник лаборатории
ООО «ЭМС-Проект»

Косоруков А.В.,
к.т.н., главный специали-
ст АО «Ленгидро-
проект»

Кутузова Н.Б.,
руководитель на-
правления НЗУ АО
«НПО «Стример»

Пашичева С.А.,
аспирант Высшей школы
высоковольтной энерге-
тики ИЭ СПбПУ

Титков В.В.,
д.т.н., профессор
Высшей школы высоко-
вольтной энергетики
ИЭ СПбПУ

Ключевые слова:
УЗИП, прямой удар мол-
нии, сеть освещения

Развитие грозовых перенапряжений в сети освещения возможно вследствие прямых и близких ударов молнии. Влияние на количество случаев повреждения изоляции при ударе молнии и целесообразность применения устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) в сети освещения оказывают ее конструктивные особенности, наличие и тип заземления, наличие экранов, величина удельного сопротивления грунта и т.д.

Принципиально можно выделить следующие основные типы конструкций сети освещения:

- состоящая из опор, соединенных ВЛ (в т.ч. с СИП);
- состоящая из опор, соединенных КЛ;
- размещенная на отдельно стоящих опорах (прожекторных мачтах);
- источник питания которых соединен с ними по заземляющему устройству;
- размещенная на отдельно стоящих опорах (прожекторных мачтах), источник питания которых не имеет связи с ними по заземляющему устройству;
- подсветка, размещаемая на кровле сооружений и зданий.

Алгоритм обоснования применения УЗИП в сети освещения предполагает следующие этапы:

- оценка вероятности появления грозовых перенапряжений;
- оценка ущерба в результате воздействия;
- оценка экономических последствий.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

При использовании кабельных линий в сети освещения воздействие грозовых перенапряжений возможно только при ударах молнии в опоры освещения. Количество ударов молнии в отдельно стоящую опору освещения может быть рассчитано в соответствии с [1] по формуле:

$$N_{\text{оп}} = 9\pi h^2 p \cdot 10^{-6}.$$

Среднегодовое число ударов молнии в 1 км² поверхности земли p можно принять согласно таблице 1.

По данным [2], число ударов молнии в 1 км² земной поверхности также может быть оценено по выражению:

$$p = 0,05 N_{\text{гч}}.$$

Использование последнего выражения дает меньший результат (рисунок 1).

Табл. 1. Число ударов молнии в 1 км² земной поверхности

Число грозочасов $N_{\text{гч}}$	Число ударов молнии, p
10–20	1
20–40	2
40–60	4
60–80	5,5
80–100	7
>100	8,5

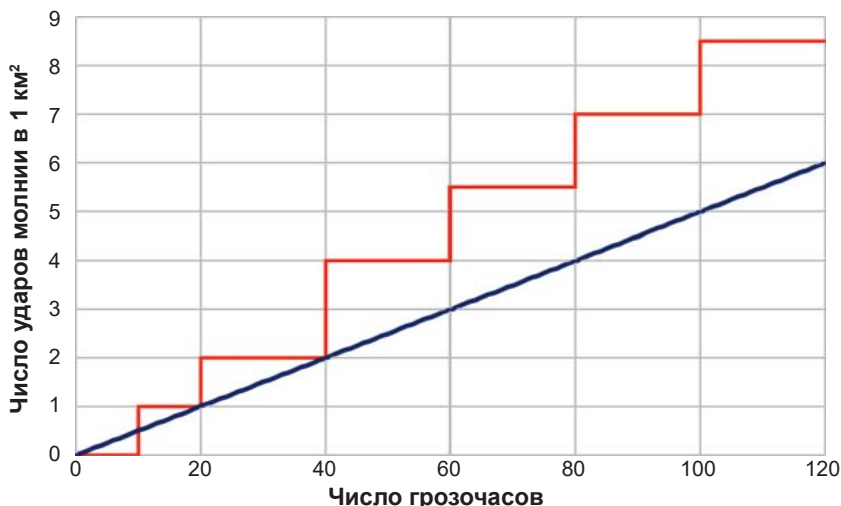


Рис. 1. Число ударов молнии в 1 км² земной поверхности по разным методикам

Табл. 2. Коэффициенты экранирования

Характеристика размещения опоры	k
Окружена более высокими объектами	0,25
Окружена объектами той же высоты или ниже	0,5
Отдельно стоящая опора на равнине	1
Опора освещения на равнине и на возвышенности	2

Вероятность удара молнии в одну из N опор линии освещения за T лет эксплуатации соответственно равно:

$$N_n = N \cdot N_{\text{оп}} \cdot T \cdot k,$$

где k — коэффициент экранирования линии соседними объектами, расположенными на расстоянии до $3h$. Значения k определены в [2] и приведены в таблице 2.

При конкретном проектировании при расчете числа ударов молнии в линию возможно учитывать коэффициент k для каждой опоры отдельно, в этом случае необходимо перейти от умножения к суммированию:

$$N_n = \sum_{i=1}^N N_{\text{оп}} \cdot T \cdot k_i.$$

Необходимо также отметить, что число ударов в несколько рядом расположенных опор будет меньше вследствие того, что зоны стягивания опор перекрываются.

Если речь идет о защите линии с СИП между опорами освещения, то количество ударов молнии в линию за срок эксплуатации определяется по выражению (высота до 30 м):

$$N_n = 0,2p (5h - 2h^2/30) \cdot (L/100) \cdot T \cdot k,$$

где L — длина линии в км.

Рассмотрим для примера линию из 10 опор протяженностью 400 м в городе Санкт-Петербурге. Количество грозových часов в регионе: 20–40, принимаем 1,0 удар в 1 км² поверхности земли, срок эксплуатации — 30 лет, высота опор — от 10 м до 30 м.

Результаты расчетов коэффициентов взаимного экранирования и числа ударов молнии для системы освещения с кабельной линией представлены в таблицах 3 и 4. Видно, что коэффициент взаимного экранирования между опорами приблизительно соответствует коэффициенту экранирования окружающими строениями аналогичной высоты (таблица 2).

Можно говорить о том, что в условиях городской застройки, когда система освещения окружена высокими зданиями (столбец с $k = 0,25$), удар молнии маловероятен, то есть его можно не учитывать в качестве расчетного случая. Если говорить о ситуациях, когда система освещения окружена аналогичными по высоте сооружениями ($k = 0,5$), то удар молнии вероятен только при применении высоких опор, однако, с точки зрения объективного анализа, такая ситуация не характерна для городской черты

Табл. 3. Результаты оценочного расчета коэффициента экранирования опорами друг друга (10 опор)

Высота опоры, м	Площадь стягивания 1 опоры, м ²	Расстояние между опорами, м	Площадь стягивания 10 опор, м ²	Коэффициент взаимного экранирования
10	2827	20	13 333	0,47
15	6362	30	30 000	0,47
20	11 310	40	53 331	0,47
25	17 671	50	83 330	0,47
30	25 447	60	119 996	0,47

Табл. 4. Результаты расчетов количества ударов молнии в опоры с КП в регионе г. СПб

$h, \text{ м}$	$N \cdot N_{\text{оп}} \cdot T \cdot k \cdot k_{\text{взаим}}$			
	0,25	0,5	1	2
8	0,06	0,13	0,26	0,52
9	0,08	0,16	0,33	0,66
10	0,10	0,20	0,40	0,81
11	0,12	0,24	0,49	0,98
12	0,15	0,29	0,58	1,17
13	0,17	0,34	0,68	1,37
14	0,20	0,40	0,79	1,59
15	0,23	0,46	0,91	1,82
16	0,26	0,52	1,04	2,07
17	0,29	0,58	1,17	2,34
18	0,33	0,66	1,31	2,62
19	0,37	0,73	1,46	2,92
20	0,40	0,81	1,62	3,24
21	0,45	0,89	1,78	3,57
22	0,49	0,98	1,96	3,92
23	0,54	1,07	2,14	4,28
24	0,58	1,17	2,33	4,66
25	0,63	1,26	2,53	5,06
26	0,68	1,37	2,74	5,47
27	0,74	1,47	2,95	5,90
28	0,79	1,59	3,17	6,34
29	0,85	1,70	3,40	6,81
30	0,91	1,82	3,64	7,28

и встречается редко. Реальным расчетным случаем является прямой удар молнии в систему освещения на открытом пространстве при высоте опор от 15 м и в аналогичных условиях на возвышенностях.

Аналогичные расчеты были выполнены для линии освещения протяженностью 400 м, с СИП, высота подвеса которого от 10 до 20 м.

Результаты расчетов показывают, что для линий с СИП удар молнии в линию следует рассматривать в качестве расчетного случая для всех случаев, когда система не экранирована окружающими сооружениями.

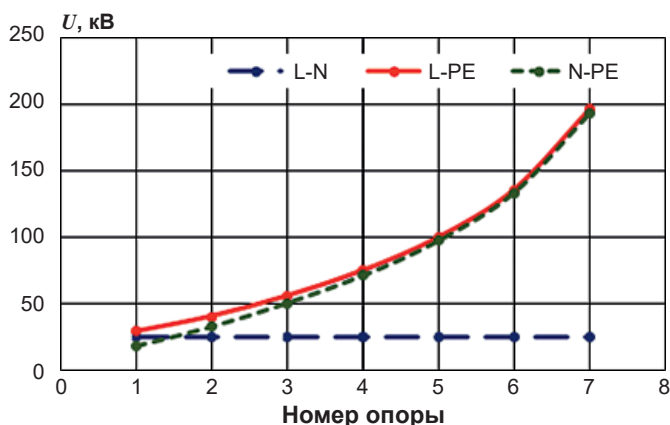


Рис. 2. Распределение напряжения на изоляционных конструкциях вдоль ВЛ при ударе молнии в опору № 7 (при допущении об отсутствии перекрытий)

Для всех конструкций сети освещения, когда элементы этой сети размещаются на элементах системы молниезащиты, удар молнии является расчетным случаем для оценки количества и последствий повреждений независимо от степени грозовой активности в регионе и других факторов.

ПРОЦЕССЫ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В ЭЛЕМЕНТЫ СЕТИ ОСВЕЩЕНИЯ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ОПОР, СОЕДИНЕННЫХ ПРОВОДАМИ (в т.ч. СИП) В УСЛОВИЯХ СЕТИ TN-S

Типичным объектом является линия освещения вдоль объекта транспортной или дорожной инфраструктуры.

В качестве примера рассмотрена линия, состоящая из 7 опор на расстоянии 30 м друг от друга. В 30 метрах от крайней из них находится питающая ТП, на которой заземлена нейтраль. Заземляющее устройство ТП имеет величину сопротивления 10 Ом.

В таблице 5 приведена картина ожидаемых повреждений для ВЛ с обычными проводами в условиях сети TN-S, если импульс тока молнии — 10/350 мкс, амплитуда импульса молнии — 100 кА, удельное сопротивление грунта — 100 Ом·м. Результаты расчета по методике [4] получены следующим образом:

- посчитан потенциал всех проводников (L, N, PE) на всех опорах при ударах в разные опоры;
- участки изоляции с большим перенапряжением шунтировались, после чего производился перерасчет напряжений и т.д. (имитация пробоя изоляционного промежутка).

На рисунке 2 показана эпюра распределения напряжения на изоляции ВЛ при ударе молнии в опору № 7. График построен с допущением об отсутствии перекрытий, что сделано лишь для оценки верхней границы величины перенапряжений. Основным смыслом при этом имеет лишь точка на опоре № 7 и общий характер кривых. В реальности из-за процессов перекрытия зависимости будут иными.

Из рисунка 1 видно, что напряжение, воздействующее на изоляцию от земли проводников ВЛ на пораженной опоре очень высокое и представляет опасность для изоляции «фаза-земля» и «ноль-земля» (если речь идет об удаленных от ТП опорах).

Табл. 5. Картина ожидаемых повреждений на ВЛ освещения 10/350 мкс 100 кА 100 Ом*м в условиях сети TN-S

Место приложения воздействия	Номер поврежденной опоры						
	1	2	3	4	5	6	7
N-PE							
опора № 1	V	V	V	V	V	V	
опора № 2	V	V	V	V	V	V	V
опора № 3	V	V	V	V	V	V	V
опора № 4	V	V	V	V	V	V	V
опора № 5		V	V	V	V	V	V
опора № 6		V	V	V	V	V	V
опора № 7		V	V	V	V	V	V
L-PE							
опора № 1	V	V	V	V	V	V	
опора № 2	V	V	V	V	V	V	V
опора № 3	V	V	V	V	V	V	V
опора № 4	V	V	V	V	V	V	V
опора № 5	V	V	V	V	V	V	V
опора № 6	V	V	V	V	V	V	V
опора № 7	V	V	V	V	V	V	V
L-N							
опора № 1	V						
опора № 2	V	V					
опора № 3	V	V	V				
опора № 4	V	V	V	V			
опора № 5	V	V	V	V	V		
опора № 6	V	V	V	V	V	V	
опора № 7	V	V	V	V	V	V	V

Примечание: V — повреждение изоляции

Из таблицы 5 видно, что количество повреждений растет при ударах молнии в конец линии, удаленный от ТП, что объясняется увеличением расстояния до нейтрали, а также до относительно «развитого» заземляющего устройства.

При всех вариантах уровень перенапряжений для изоляции L-PE остается настолько высоким, что идет речь о тотальных повреждениях вдоль всей ВЛ. Механизм повреждения при ударе в опору заключается в выносе потенциала пораженной опоры на фазный провод и в дальнейшем перекрытие изоляции при его приближении к другим заземленным конструкциям (опорам). Перекрытие происходит, так как фазный провод изолирован от других проводников на всем своем протяжении, при этом полевая (через емкость и индуктивность) связь PE- и N-проводников улучшает ситуацию, но не настолько, чтобы предотвратить повреждения.

Позитивное влияние PE-проводника можно проиллюстрировать, например, тем, что при ударе в опору № 7 потенциал опоры относительно удаленной земли составляет 1,28 МВ, при этом потенциал на изоляции L-PE — 195,6 кВ, то есть примерно в 6,5 раз меньше (рисунок 3). При исключении из расчета PE-проводника напряжение на изоляции становится рав-

ным потенциалу опоры относительно удаленной земли.

На рисунках 4–6 показан процесс изменения распределения напряжений на изоляции линии при перекрытии изоляции на опорах. Видно, что за счет перекрытия изоляции на одной опоре уровень перенапряжений на соседних падает.

Для изоляции N-PE наблюдается сходная картина, так как нулевой проводник аналогично фазному изолирован от опор на протяжении всей ВЛ. Однако из-за наличия точки заземления нулевого проводника на ТП уровень перенапряжений на изоляции N-PE опоры № 1 при удаленных ударах молнии в конце ВЛ (опоры № 5–7) оказывается более низким и не превышает допустимых уровней. Фактически к этой изоляции приложено падение напряжения на N- и PE-проводнике пролетов до ТП. Это означает, что при увеличении длины первого пролета до ТП уровень перенапряжений для опоры № 1 увеличится, однако в рассматриваемом случае (30 м) при некоторых ударах молнии изоляция способна выдержать молниевые перенапряжения.

Для изоляции L-N ситуация несколько иная. Поскольку на удалении от ТП L- и N-проводники находятся в одинаковых условиях (изолированы от земли), то уровень перенапряжений оказывается более низким, несимметрия начинает сказываться только в начале линии у ТП, где потенциал нулевого проводника падает при сохранении потенциала фазного проводника. Такая ситуация приводит к росту напряжения на L-N изоляции.

При анализе данных необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- 1) при расчетах не была учтена схема замещения трансформатора, что должно улучшить ситуацию с перенапряжениями при ударах молнии вблизи от ТП;
- 2) в общем случае процессы перекрытия изоляции случайны, поэтому результаты реальных аварийных событий могут не совпадать с теоретическими представлениями.

Установку УЗИП в сети указанного типа надо производить между проводниками и заземленными конструкциями (защита изоляции L-PE, N-PE),

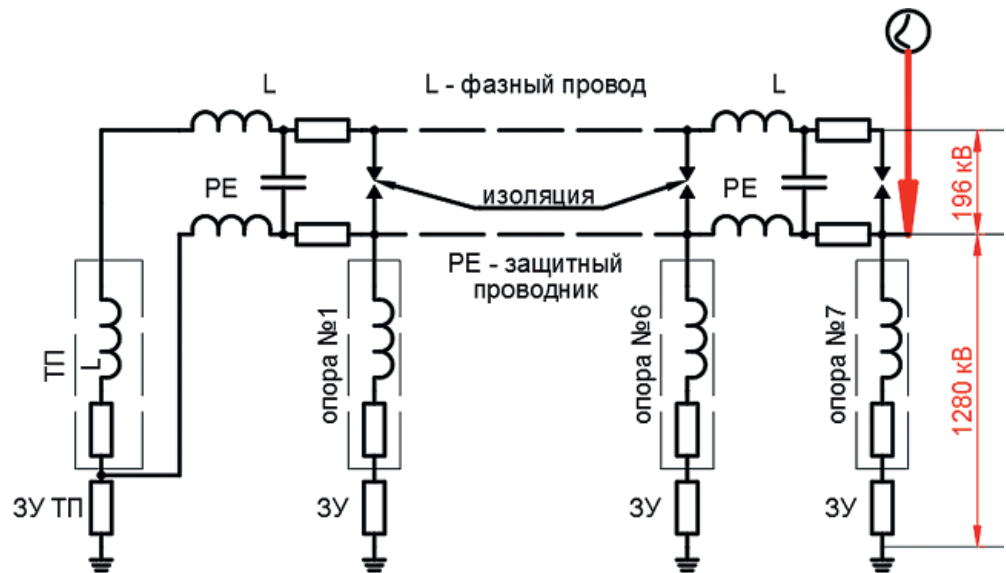


Рис. 3. Влияние PE-проводника на снижение перенапряжений на изоляции «фаза-земля»

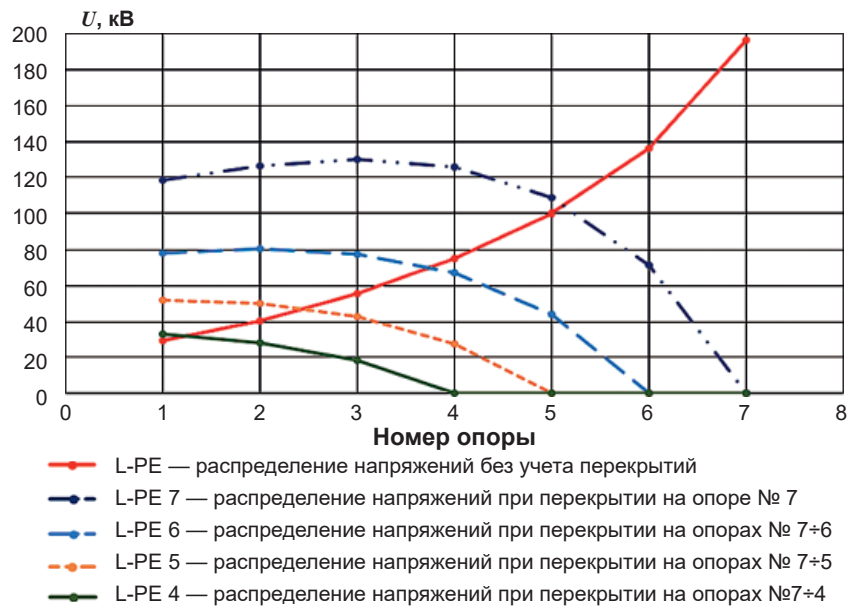


Рис. 4. Распределение напряжения на изоляции «фаза-земля» вдоль ВЛ при перекрытии изоляции соседних опор

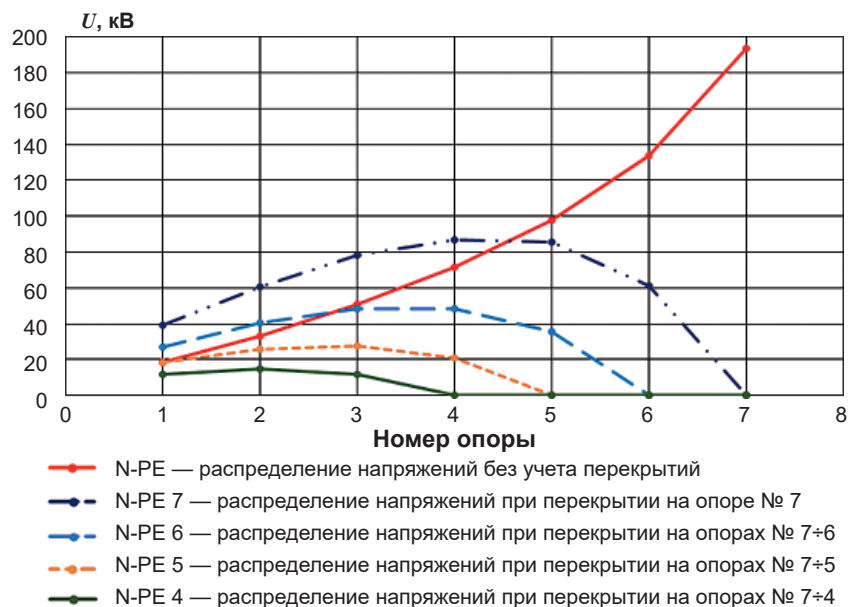


Рис. 5. Распределение напряжения на изоляции «ноль-земля» вдоль ВЛ при перекрытии изоляции соседних опор

так как напряжения на указанных изоляционных конструкциях максимальны. Импульсный ток УЗИП должен соответствовать уровню защиты IV, максимальная амплитуда тока молнии — 100 кА. Ток молнии распределяется между проводниками ВЛ, при пяти проводниках имеем импульсный ток УЗИП 20 кА на полюс. Защищаются фазные и нулевой проводники. Следует защищать также и обмотку трансформатора на ТП.

Для линии освещения, выполненной с применением СИП с экраном (по сути, речь идет о подвеске КЛ), уровни перенапряжения на изоляции оказываются меньшими, так как экран действует подобно дополнительному РЕ-проводнику. Анализируя картину повреждений, оценочно можно говорить об уменьшении числа повреждений изоляции до 2–3 раз. Анализировать расположение мест повреждений в данном расчете невозможно, так как из-за допущений перекрытия изоляции они «конкурируют» друг с другом, например, учет перекрытия L-PE на одной опоре и N-PE на соседней снижает перенапряжения на изоляции L-N или, напротив, учет одного перекрытия приводит к росту перенапряжений на соседней опоре между указанными проводниками. Можно говорить лишь о тенденциях снижения количества повреждений и о том, что изоляция L-PE по-прежнему находится в худших условиях. Также в худших условиях находится изоляция наиболее удаленных от источника питания опор. Таким образом, рекомендации по защите остаются аналогичными предыдущему случаю.

Табл. 6. Напряжения на изоляционных конструкциях в системе освещения TN-S при использовании СИП с экраном. Удар молнии в опору №7 без учета перекрытия изоляции

	Ток молнии	Место расчета	Уровень перенапряжений		
			L-N, кВ	L-PE, кВ	N-PE, кВ
Место приложения воздействия — опора № 7	100 кА (10/350 мкс)	опора № 1	10,99	5,86	5,24
		опора № 2	10,98	2,25	9,12
		опора № 3	10,98	2,92	13,77
		опора № 4	10,98	8,24	19,23
		опора № 5	10,98	14,57	25,52
		опора № 6	10,98	21,93	32,71
		опора № 7	10,98	30,51	40,92
	50 кА (10/350 мкс)	опора № 1	5,49	2,93	2,62
		опора № 2	5,49	1,12	4,56
		опора № 3	5,49	1,46	6,88
		опора № 4	5,49	4,12	9,61
		опора № 5	5,49	7,29	12,76
		опора № 6	5,49	10,96	16,35
		опора № 7	5,49	15,25	20,46

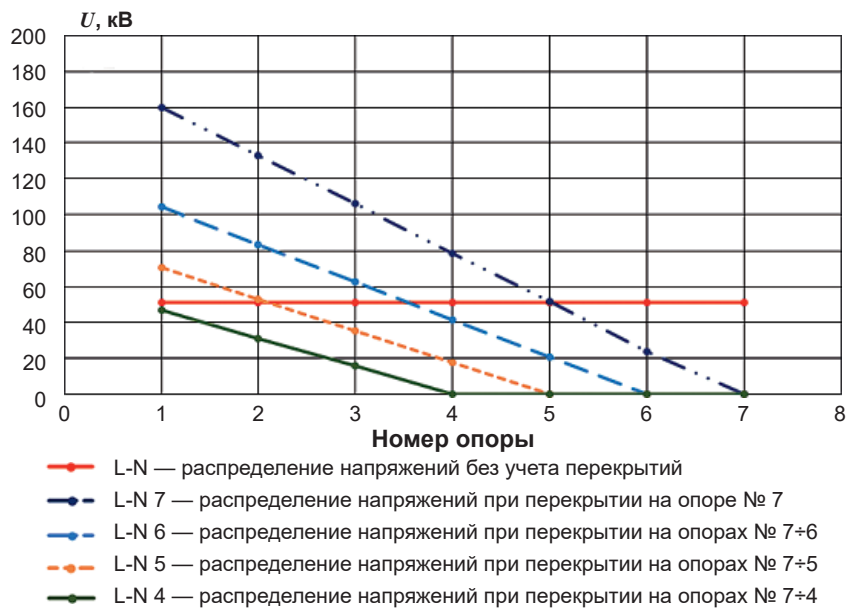


Рис. 6. Распределение напряжения на изоляции «фаза-ноль» вдоль ВЛ при перекрытии изоляции соседних опор

СЕТИ ТИПА TN-C

Для системы TN-C ситуация, которая на практике чаще используется для питания подобных потребителей, картина повреждений приблизительно такая же, как и для сети TN-S. Уровень перенапряжений вследствие уменьшения количества проводников линии чуть выше.

Меры по защите сети от перенапряжений: установка УЗИП по схеме 3+0 или 1+0, импульсный ток УЗИП при равенстве площади поперечного сечения жил кабеля, соответственно, не менее 25 кА.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ТОКА МОЛНИИ И ГРУНТА НА УРОВЕНЬ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТИ ОСВЕЩЕНИЯ

В таблице 6 показаны напряжения на изоляционных конструкциях при ударе молнии в опору № 7 ВЛ освещения с экранированным СИП. Видно, что уровень напряжений пропорционален амплитуде импульса тока молнии. Линейная зависимость объясняется длительным фронтом, который значительно превышает время двойного пробега волны вдоль ВЛ.

Соответственно, количество поврежденных изоляционных конструкций для импульса с меньшей амплитудой снижается. Поскольку прочность изоляции не зависит от амплитуды импульса тока молнии, количество повреждений снижается не пропорционально данному параметру, а чуть меньше.

При уменьшении фронта повреждения изоляции «сосредотачиваются» ближе к месту удара молнии, то есть величина перенапряжений становится большей, но область их распространения в сети уменьшается, что связано с большим падением напряжения вдоль проводников линии. При малой амплитуде тока молнии в сочетании с малым фронтом импульса повреждения становятся локальными и затрагивают до 3–4 опор от точки удара.

Уровень перенапряжений в сети растет пропорционально \sqrt{p} , соответственно, увеличивается и количество повреждений.

СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ, РАЗМЕЩЕННАЯ НА ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ОПОРАХ (ПРОЖЕКТОРНЫХ МАЧТАХ), ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КОТОРЫХ СОЕДИНЕН С НИМИ ПО ЗАЗЕМЛЯЮЩЕМУ УСТРОЙСТВУ

Типичным объектом является промышленная площадка с сооружениями: компрессорные станции, электростанции, подстанции, терминалы.

Вероятность удара в систему молниезащиты высокая: от 0,5 для компактных объектов типа ПС 110 кВ до нескольких десятков для крупных сооружений за 30 лет эксплуатации. Удар молнии является расчетным случаем всегда, так как система выполняет функции системы молниезащиты.

Система заземления объекта, как правило, развитая, то есть имеет шаг сетки ячейки заземлителя менее 20 м или большое количество фундаментов.

СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ, РАЗМЕЩЕННАЯ НА ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ОПОРАХ (ПРОЖЕКТОРНЫХ МАЧТАХ), ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КОТОРЫХ НЕ ИМЕЕТ СВЯЗИ С НИМИ ПО ЗАЗЕМЛЯЮЩЕМУ УСТРОЙСТВУ

Ситуация в значительной мере эквивалентна случаю линии освещения, однако с той лишь разницей, что расстояние между ТП и опорой может быть малым, а множественные повреждения возможны только при организации питания шлейфом. При коротких (10–30 м) кабельных линиях с экраном от прожекторной мачты до ТП повреждение маловероятно, при больших длинах КЛ — весьма вероятны.

СИСТЕМА ПОДСВЕТКИ, РАЗМЕЩАЕМАЯ НА КРОВЛЕ СООРУЖЕНИЙ И ЗДАНИЙ

Система подсветки в общем случае расположена по периметру здания, в редких случаях, при наличии посадочных площадок и т.п. еще и на поверхности кровли. При организации защиты здания с помощью молниеприемной сетки удар молнии в кровлю является расчетным случаем, кроме того, периметральные проводники молниеприемной сетки, располагаемые на парапетах, оказываются вблизи и параллельными КЛ освещения. Такая ситуация представляется опасной как с точки зрения воздействия кондуктивных помех, так и с точки зрения появления индуцированных перенапряжений.

При прохождении проводников молниеприемной сетки снаружи стен здания имеет место опасность повреждения КЛ сети освещения в местах пересечения кабелей и токоотводов (из-за удаленности точек заземления нулевых проводников от кровли их потенциал и потенциал фазных проводников оказывается малым по сравнению с потенциалом токоотвода). Обеспечить снижение вероятности обратного перекрытия возможно только путем применения сплошных стальных экранов из металлических труб и коробов, указанные меры также ограничивают и индуцированные перенапряжения. Применение УЗИП целесообразно в указанном случае только для за-

щиты оборудования в здании. Уровень воздействия соответствует в этом случае УЗИП класса 1 с токами до 5 кА для высоких зданий без металлокаркаса или классу 2 в случае наличия металлокаркаса или малого размера зданий. Точные оценки возможны лишь по результатам расчета конкретной конструкции.

ВЫВОДЫ

Для всех систем освещения, размещаемых на элементах системы молниезащиты, удар молнии является расчетным случаем.

В общем случае можно говорить о том, что для линии освещения дорожной инфраструктуры, при отсутствии окружающих экранирующих объектов (леса, зданий и т.п.), высоте опор более 15 м и числе грозовых часов от 20 и более, удар молнии является расчетным случаем.

Для принятия решения о целесообразности применения УЗИП, независимо от степени грозовой активности в регионе и других факторов, необходимо сравнить стоимость УЗИП со стоимостью светильников и шкафов управления освещением с учетом транспортных расходов и стоимости монтажа.

Для решения о применении УЗИП помимо стоимости оборудования и монтажа необходимо учитывать экономические потери в результате простоя. Например, для автозаправочных станций в результате тотальных повреждений освещения полос съезда и разгона потери могут многократно превышать стоимость УЗИП. **Р**

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. Под научн. ред. Н.Н. Тиходеева. 2-е изд. СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. 355 с.
2. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 31 с.
3. ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 2. Оценка риска. М.: Стандартинформ, 2011. 71 с.
4. Shishigin D.S., Shishigin S.L. Numerical modeling in EMC problems of electric power substations when lightning strikes. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) 2017, Milan, Italy, 6-9 June 2017.

REFERENCES

1. RD 153-34.3-35.125-99. Guidelines for the protection of electric networks 6-1150 kV from lightning and internal overvoltages. Ed. N.N. Tikhodeev. 2nd ed. St. Petersburg: PEIPK Mintopenergo RF, 1999, 355 p. (in Russian)
2. RD 34.21.122-87. Instructions for lightning protection of buildings and structures. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 31 p. (in Russian)
3. State Standard GOST R IEC 62305-2-2010. Risk management. Lightning protection. Part 2. Risk assessment, Moscow: Standartinform, 2011, 71 p. (in Russian)
4. Shishigin D.S., Shishigin S.L. Numerical modeling in EMC problems of electric power substations when lightning strikes. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) 2017, Milan, Italy, 6-9 June 2017.