

УДК 621.311

И. М. Антропов, Б. В. Ефимов, Ю. М. Невретдинов

Влияние перекрытий изоляции линии на формирование грозových перенапряжений

I. M. Antropov, B. V. Efimov, Yu. M. Nevretdinov

Influence of line isolation overlappings on formation of lightning overvoltages

Аннотация. Представлена модель защиты подстанции от грозových волн, в которой учтены многократные перекрытия изоляции линии. Показано влияние многократных перекрытий изоляции на опорах линии на формирование грозových перенапряжений. Выявлена неоднозначность определения опасных параметров тока молнии при фиксированной длине его фронта.

Abstract. The model of substation protection against lightning waves with considered multiple overlappings of line isolation has been presented. Influence of multiple overlapping of isolation on line support on formation of lightning overvoltages has been shown. Ambiguity of determination of lightning current dangerous parameters at the fixed length of its front has been revealed.

Ключевые слова: грозových волны, грозозащита подстанции, модель перекрытия изоляции.
Key words: lightning surges, lightning protection of substation, isolation overlapping model.

Введение

Моделирование грозových перенапряжений в системе "подстанция с подключенными воздушными линиями (ВЛ)" [1], как правило, выполняется с учетом однократного перекрытия изоляции линии на подходах. Однако при ударах молнии в провод или трос возникающая волна перенапряжения распространяется по проводу или тросу в обе стороны от точки удара и, соответственно, действует на изоляцию пораженной фазы на нескольких опорах, расположенных как по направлению к подстанции, так и в противоположном направлении. При перекрытиях изоляции на нескольких опорах ВЛ возникают дополнительные точки преломлений и отражений волн, что может существенно изменить процесс формирования грозových перенапряжений на подстанции. Лишь при ударах молнии вблизи опоры ВЛ с перекрытием изоляции на этой опоре распространяющаяся по тросу волна не создает повторных перекрытий, как правило, при низком сопротивлении заземления опор. В этом случае можно считать модель однократного перекрытия изоляции ВЛ достаточной.

В случаях ударов молнии на удалении от опоры образовавшиеся волны могут вызвать перекрытия изоляции на обеих опорах, близких к точке удара. Также возможно образование повторных перекрытий изоляции на разных опорах ВЛ при ударах молнии в провод, если первое перекрытие изоляции произошло на опоре с высоким сопротивлением заземления. В этих случаях образование повторных перекрытий изоляции ВЛ создают дополнительные точки отражений, которые создают условия для формирования опасных перенапряжений на оборудовании подстанции. Такая ситуация наиболее вероятна в районах с низкой проводимостью грунта, к которым относится Кольский полуостров [2].

Характеристика исследуемой подстанции

Рассмотрим целесообразность учета многократных перекрытий изоляции ВЛ [2] на примере подстанции 110 кВ в Мурманском регионе. Выбор параметров линии и подстанции определен тем, что на территории Кольского полуострова эксплуатируется 77 подстанций на напряжении 110–150 кВ. 55 % подстанций 110–150 кВ работают по блочным схемам: 1ВЛ-1Т или 2ВЛ-2Т с неавтоматической перемычкой. Схема 2ВЛ-2Т в итоге может быть сведена либо к первой, либо к схеме 1ВЛ-2Т, которая возможна при длительном выводе одной из линий в ремонт или недостаточной мощности одного трансформатора. Режим 2ВЛ-1Т не используется по условиям надежности. Таким образом, рассмотрение схем 1ВЛ-1Т и 1ВЛ-2Т охватывает 60 % подстанций Кольской энергосистемы.

При моделировании грозových перенапряжений использована схема 1ВЛ-1Т. Принципиальная схема подстанции 110 кВ представлена на рис. 1.

Ошиновка ОРУ выполнена проводом АС-120/19. Высота ошиновки – 10 м. Расстояние между фазами по горизонтали – 2 м.

Выбор типа защитных аппаратов типа ОПН-110/88/550/10 основан на том, что в системе 51 % трансформаторов 110–150 кВ эксплуатируются в режиме с разземленной нейтралью. При этом возможно

возникновение опасных для ОПН внутренних перенапряжений, поэтому применяют ОПН с повышенным на 20 % наибольшим допустимым рабочим напряжением [3], [4].

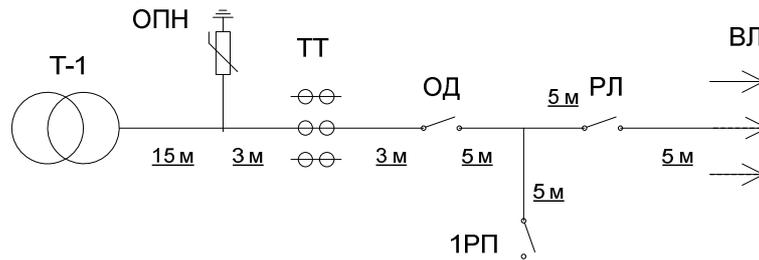


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции 110 кВ

Параметры линии на подходе также выбраны по конструктивному исполнению линий 110 кВ, характерных для Кольской энергосистемы:

- расстояние от ОРУ до первой опоры – 50 м; средняя длина пролета – 200 м;
- число изоляторов в гирлянде – 8 шт; длина гирлянды изоляторов – около 1 м;
- погонная индуктивность опор – 0,75 мкГн/м;
- защитный угол троса – 30°;
- расстояние между проводом и тросом в середине пролета – 4,5 м;
- удельное сопротивление грунта вдоль трассы – 1 000 Ом·м;
- сопротивление заземления опор – 30...60 Ом.

Расчетная модель защиты подстанции от грозовых волн

Расчетная модель подстанции с подключенной линией приведена на рис. 2. Она включает блок подстанции и блок подхода ВЛ из моделей трех пролетов. Блок подстанции состоит из входных емкостей оборудования подстанции – разъединителей линейного (РЛ) и междушинного (1РП), отделителя (ОД-110), трансформатора тока (ТТ-110) и силового трансформатора (Т-1), а также из модулей отрезков ошиновки, соединяющих узлы подстанции и модели защитных аппаратов (ОПН). Входные емкости оборудования, модули ошиновки и модель ОПН имеют трехфазное исполнение.

Каждая модель пролета состоит из двух модулей отрезков линии (П-110-3), что позволяет подключать модель молнии в токе соединения этих модулей в трос или один из фазных проводов и, меняя их длину, моделировать удары молнии в провод на различном удалении от опор. На рис. 2 представлен расчетный случай удара молнии в опору или трос в непосредственной близости от опоры 1. Вольт-секундная характеристика модели перекрытия гирлянды изоляции линии (FLASH) задана в соответствии с формулой Горева – Машкиллейсона:

$$U(\tau) = A \cdot \sqrt{1 + \frac{B}{\tau}},$$

где A и B – коэффициенты, определенные по методике НИИПТ:

для перекрытий с провода на опору $A = 605$ кВ, $B = 1,661$ мкс;

для обратных перекрытий с опоры на провод $A = 595$ кВ, $B = 2,388$ мкс.

Начало отсчета предразрядного времени τ принято в момент превышения напряжения на гирлянде изоляции амплитуды наибольшего рабочего фазного напряжения сети (103 кВ).

Учет однократного перекрытия изоляции ВЛ на опоре (мономодель) выполнен одной моделью, расположенной в непосредственной близости от удара молнии по направлению движения волны к подстанции. Учет многократных перекрытий изоляции ВЛ на опорах (полиномодель) выполнен расположением нескольких моделей, расположенных по обе стороны от точки удара молнии в обоих направлениях движения волн (рис. 2). Модели опор включают индуктивности элементов опор и сопротивление их заземления (ЗУ оп.).

В программе АТР–ЕМТР моделирование импульсной короны может быть выполнено сосредоточенными элементами [5]. Однако дискретное подключение моделей короны может значительно исказить процесс формирования грозовой волны на подходе, поэтому в расчетах действие короны не учтено, что, по мнению авторов, допустимо для пробега волны расстояний до нескольких сотен метров.

Модель молнии выбрана в соответствии с [6], [7], т. е. с учетом нулевой начальной производной тока на фронте. Эквивалентное сопротивление канала молнии принято 1 000 Ом.

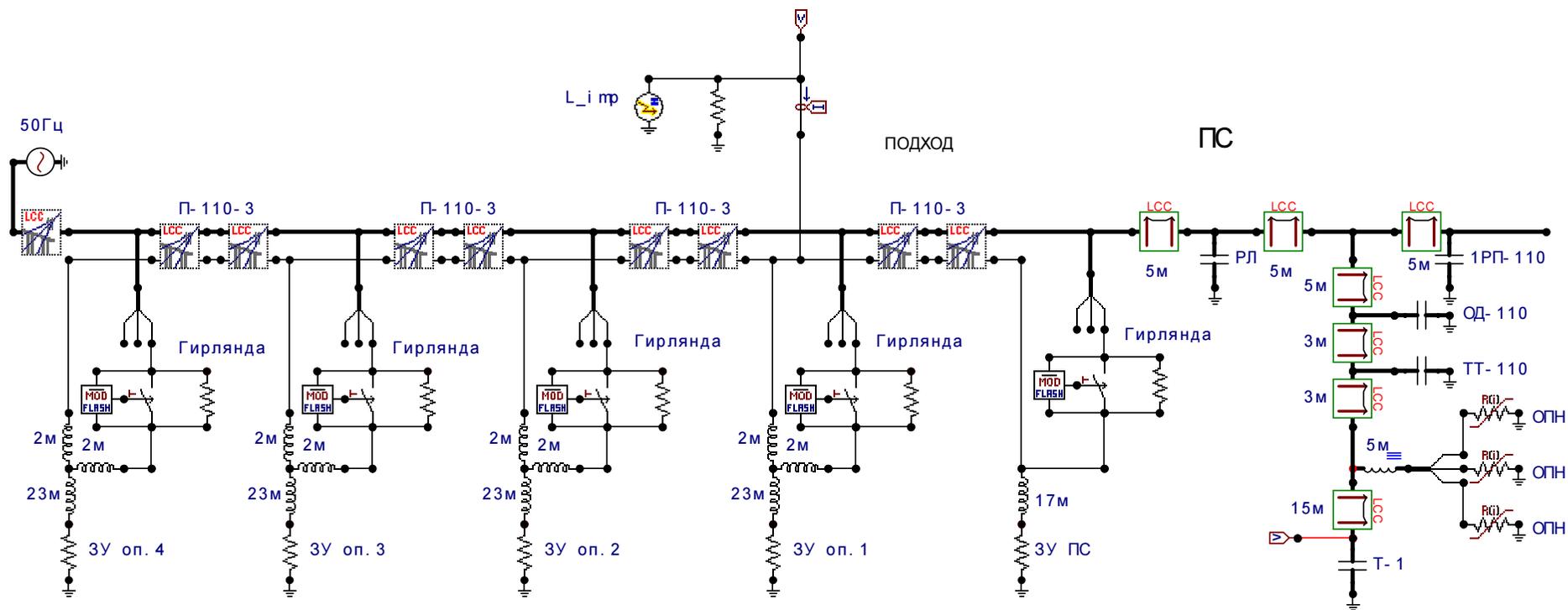


Рис. 2. Расчетная модель подстанции 110 кВ с подходом подключенной линии, выполненная в EMTP.
 Сопротивления заземляющих устройств опор (ЗУ оп.) и контура подстанции (ЗУ ПС);
 FLASH – модель импульсного перекрытия гирлянды изоляции на опоре;
 ОПН 110/88/II – модель защитного аппарата одной фазы; Т-1 – входная емкость силового трансформатора;
 L_{i mp} – модель канала молнии; П-110-3 – модель отрезка линии; LCC – модель отрезка ошиновки

Основные расчетные случаи Удар молнии в трос в середине пролета

Пример кривых опасных токов молнии (КОТ) для удара молнии в трос в середине 2-го пролета между опорами 1 и 2 (150 м от ОРУ) приведен на рис. 3. В расчетах учтено однократное перекрытие гирлянды на опоре 1 (рис. 2) – мономодель перекрытий. Второй вариант расчета – размещение моделей перекрытия изоляции на всех опорах подхода и на портале (полимодель). Сопротивление заземления опор в приведенном примере принято 60 Ом.

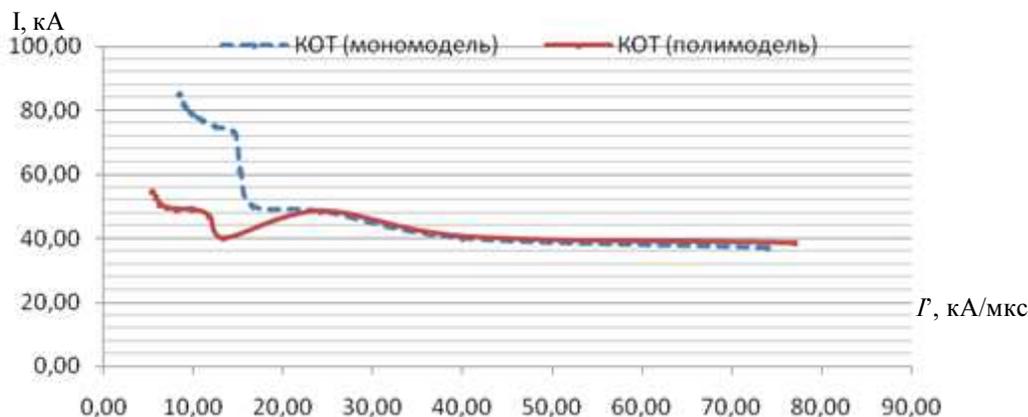


Рис. 3. Кривые опасных токов при ударе молнии в трос в середине 2-го пролета

Из рис. 3 видно, что учет многократных перекрытий изоляции ВЛ приводит к снижению кривой опасных токов молнии (КОТ) (в координатах амплитуда I и крутизна Γ тока молнии) для значений крутизны тока молнии менее 20 кА/мкс. Таким образом, ограничение числа точек перекрытий изоляции мономоделью в расчетной модели может привести к недооценке опасности ударов молнии. Для пояснения на рис. 4 приведены осциллограммы перенапряжений на гирляндах изоляции 1-й и 2-й опор при ударе молнии с амплитудой тока 40 кА и длиной фронта импульса тока 3 мкс, полученные на расчетной модели с моно- и полимоделью перекрытий изоляции на опорах ВЛ. Здесь же показаны перенапряжения на силовом трансформаторе Т-1.

Как видно, при моделировании перекрытия изоляции на 1-й опоре (по ходу волны к подстанции) (рис. 4, а) перенапряжение на изоляции 1-й опоры не превышает разрядное напряжение, и перекрытия не происходит. Соответственно, перенапряжения на трансформаторе отсутствуют. Однако перенапряжение на гирлянде опоры 2 достигает разрядного напряжения изоляции линии (рис. 4, а).

В полимодели перекрытий изоляции (рис. 4, б) на опоре 2 учитывается обратное перекрытие с опоры на провод, и образованная волна на проводе создает опасное перенапряжение на трансформаторе. Таким образом, упрощенное моделирование не выявляет все случаи опасных ударов молнии.

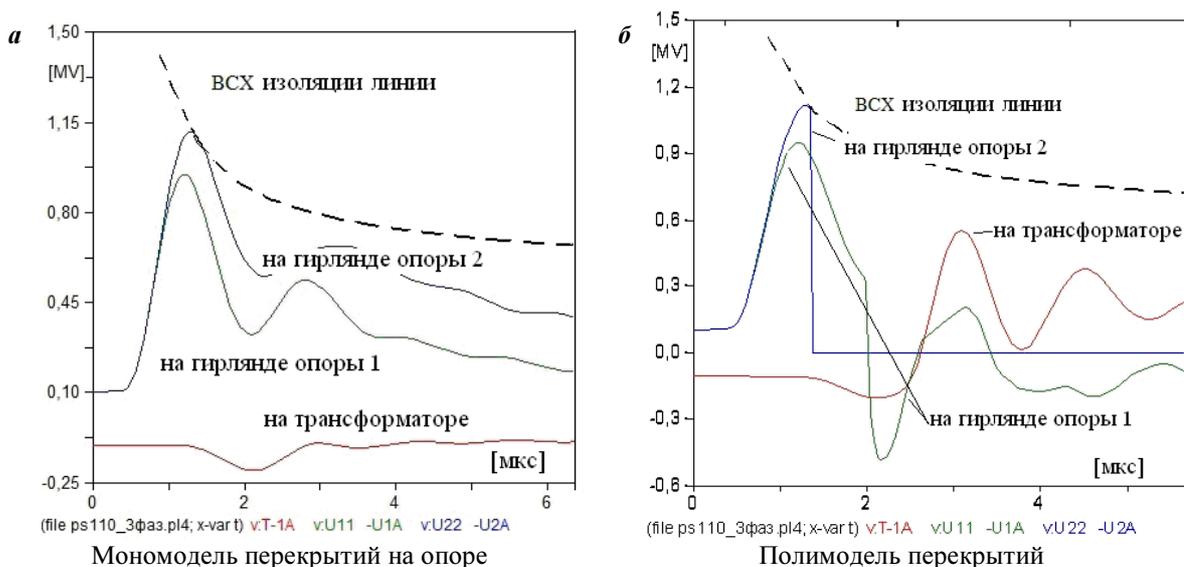


Рис. 4. Сопоставление расчетов формирования перенапряжений на трансформаторе при ударе молнии в трос в середине пролета. Параметры тока молнии – амплитуда 40 кА, длина фронта 3 мкс:
а – мономодель перекрытий на опоре; б – полимодель перекрытий

При удалении точки удара молнии от ОРУ подстанции разница в кривых опасных токов при расчетах моно- и полимоделированием перекрытий изоляции становится практически незаметной. Для примера на рис. 5 представлены КОТ при ударе молнии в трос в середине 3-го пролета (350 м от ОРУ).

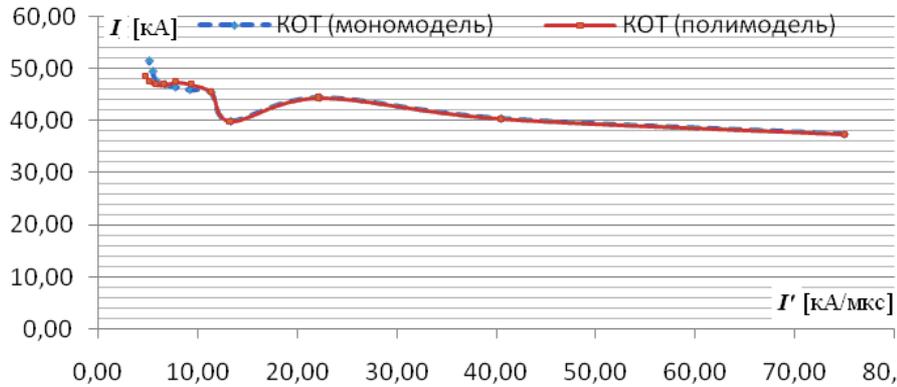


Рис. 5. Сопоставление расчетов КОТ для моно- и полимоделирования перекрытий изоляции на подходе

При уменьшении сопротивления заземления опор до 30 Ом вероятность обратных перекрытий изоляции (с опоры на провод) снижается, поэтому влияние полимодели на КОТ проявляется лишь при ударах молнии в трос в середине первых двух пролетов.

Удар молнии в опору с тросом

Для случаев удара молнии в опоры на подходе к подстанции (рис. 1) расчеты выполнены с варьированием величины сопротивления заземления опор $R_3 = 30$ Ом и $R_3 = 60$ Ом. В табл. 1 дано сопоставление результатов расчетов опасных параметров токов молнии при ударах в опоры или трос вблизи опоры для вариантов моно- и полимоделирования перекрытий изоляции ВЛ. В табл. 1 даны граничные значения амплитуд токов молнии, разделяющие области опасных и безопасных токов, при варьировании длины фронта импульса тока. Рассмотрены варианты ударов молнии в опоры 1 и 2.

Таблица 1

Опасные параметры тока молнии при ударе в 1 и 2 опоры

Точка удара молнии	Длина фронта, мкс	Амплитуда опасных токов молнии, кА			
		Мономодель перекрытий		Полимодель перекрытий	
		При сопротивлении заземления опор			
		30 Ом	60 Ом	30 Ом	60 Ом
Опора 1 (50 м от ОРУ)	0,5	>40,0	>36,0	40–62	36–49
	1	>41,0	>36,0	41–81	>36
	2	>53,0	>40,0	>53,0	>40
Опора 2 (250 м от ОРУ)	0,5	>41,0	>29,0	>41,0	>29,0
	1	>45,0	>28,0	>45,0	>28,0
	2	>46,0	>26,0	>46,0	>26,0

Из табл. 1 видно, что различие опасных токов молнии в расчетах с полимоделью перекрытий изоляции ВЛ проявилось лишь для ударов молнии в опору 1 при длине фронта тока молнии 1 мкс и менее. При этом область опасных токов молнии сузилась, т. е. по амплитуде токов эта область ограничена "сверху". Это объясняется тем, что при больших амплитудах тока молнии вторичное перекрытие изоляции на портале подстанции снижает уровень перенапряжений. Отметим, что этот эффект проявляется и при сопротивлении заземления опоры 30 Ом.

Прорывы молнии на фазный провод ВЛ мимо тросовой защиты

В расчетном случае прорывов молнии на провод также, как в случае ударов молнии в опоры, отмечается образование дополнительных интервалов опасных и безопасных амплитуд токов молнии. При этом диапазон неоднозначности оценки опасности расширяется в сторону увеличения длины фронта тока молнии.

Иллюстрация изменений в оценке опасных параметров тока молнии для прорывов на провода мимо тросовой защиты дана в табл. 2. Здесь рассмотрены удары молнии на расстоянии 25 и 50 м от ОРУ.

Таблица 2

Опасные параметры тока молнии при прорывах на провод (R_3 опор 30 Ом и 60 Ом)

Точка удара молнии	Длина фронта, мкс	Амплитуда опасных токов молнии, кА			
		Моно модель перекрытий		Поли модель перекрытий	
		При сопротивлении заземления опор			
		30 Ом	60 Ом	30 Ом	60 Ом
Провод в середине 1-го пролета (25 м от ОРУ)	0,5	4–10 и >45	4–10 и >42	4–10 и >54	4–10 и >54
	1	4–11 и >36	4–11 и >33	4–11 и >49	4–11 и >48
	2	>5,0	>5,0	5–18 и >39	5–18 и >38
	3	>7,0	>7,0	>7,0	>7,0
Провод у опоры 1 (50 м от ОРУ)	0,5	4–10 и >22	4–10 и >15	4–10, 22–41 и >89	4–10, 15–39 и >76
	1	4–9 и >18	>4,0	4–9 и >18	>4,0
	2	>5,0	>5,0	>5,0	>5,0

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что применение полимодели перекрытий изоляции ВЛ – увеличение числа точек возможных перекрытий при прорывах молнии в провода линии приводит к следующим изменениям:

– смещение верхней границы опасных амплитуд тока молнии; так, для прорыва молнии на расстоянии 25 м при длине фронта тока 1 мкс верхняя граница опасных амплитуд изменяется от 36 кА до 49 кА (для R_3 опор 30 Ом) и от 33 кА до 48 кА (для R_3 опор 60 Ом);

– образование дополнительных зон безопасных значений амплитуды тока молнии; так, для ударов молнии с длиной фронта 2 мкс образуется зона безопасных токов от 18 кА до 38...39 кА.

Таким образом, в рассмотренной схеме грозозащиты подстанции 110 кВ более точный учет числа возможных перекрытий при прорывах молнии на провода приводит к увеличению показателя надежности защиты.

Для иллюстрации влияния полимодели перекрытий на формирование перенапряжений и формирование областей безопасных параметров на рис. 6 приведены осциллограммы перенапряжений на силовом трансформаторе тупиковой подстанции (рис. 1) для расчетов с учетом перекрытий моно- и полимоделью. Здесь же показан уровень предельно допустимых грозовых перенапряжений для силового трансформатора 468 кВ.

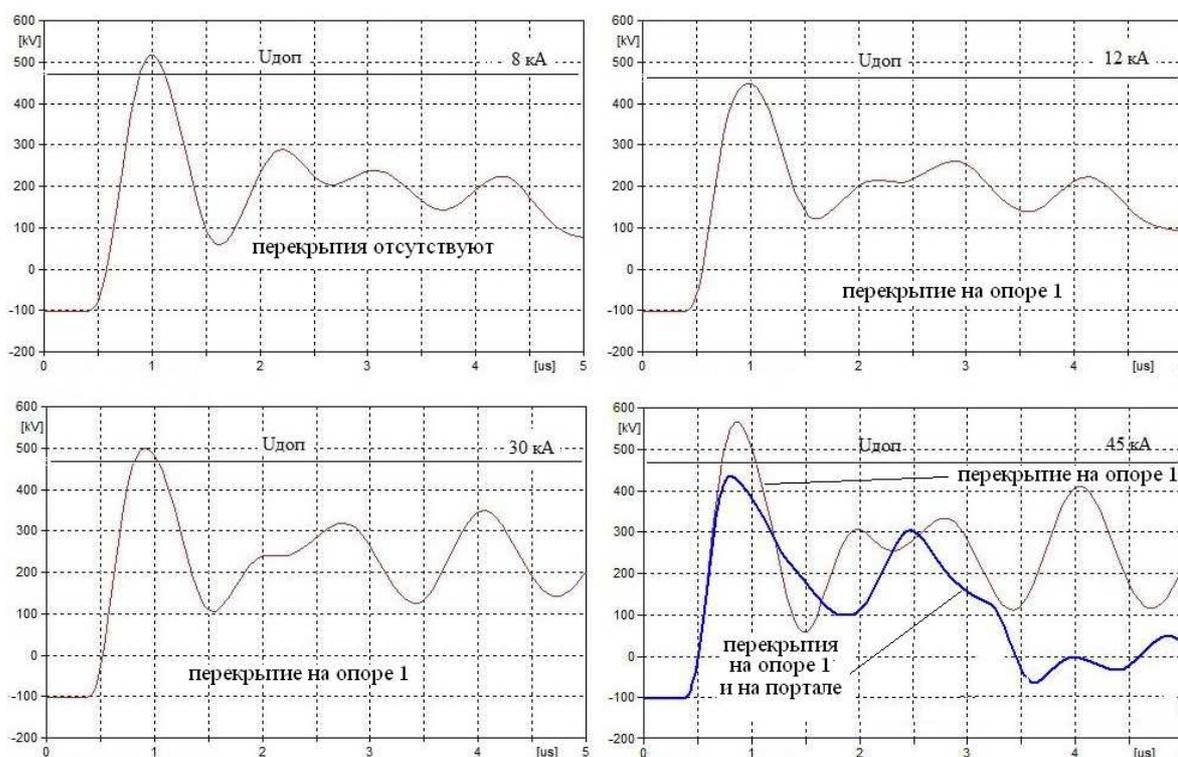


Рис. 6. Сопоставление осциллограмм на трансформаторе подстанции при прорыве молнии на провод вблизи опоры 1 для вариантов моделирования перекрытий изоляции моно- или полимоделью

Приведенные осциллограммы соответствуют расчетному варианту прорыва молнии на провод вблизи опоры 1 при длине фронта тока молнии 0,5 мкс.

Как видно, при амплитуде тока молнии 8 кА перенапряжения на силовом трансформаторе превышают допустимый уровень (верхние осциллограммы). При увеличении тока появляется зона безопасных токов молнии, так, для амплитуды 12 кА перенапряжения ниже уровня допустимых перенапряжений. Это свидетельствует об ограничении перенапряжений вследствие перекрытия гирлянды изоляции на опоре 1. При дальнейшем повышении амплитуды тока молнии уровень перенапряжений увеличивается и при токе 30 кА становится опасным.

Как видно, форма и опасность перенапряжений одинакова при расчетах с моно моделью и поли моделью перекрытий для токов от 30 кА и менее. Однако при дальнейшем увеличении амплитуды тока молнии формирование перенапряжений отличается при использовании поли модели. Так, при токе молнии 45 кА перенапряжения, полученные расчетом с моно моделью, являются опасными, а перенапряжения при расчетах с поли моделью вновь становятся безопасными. Это объясняется влиянием перекрытия гирлянды изоляции на портале. Таким образом, ограничение числа точек возможных перекрытий изоляции вместе с упрощением моделирования может привести к переоценке опасности ударов молнии в провода.

Отметим, что представленные результаты получены для условий, способствующих эффективному действию грозозащитных мер. К ним относятся: компактное исполнение ОРУ, применение ОПН, небольшое расстояние от ОПН до защищаемого трансформатора (15 м), расположение ОПН по ходу волны относительно трансформатора, отсутствие учета спуска к ОПН и его индуктивности, большое число изоляторов в гирлянде на подходе линии, что снижает вероятность обратных перекрытий при ударах молнии в опоры и трос.

Изменение этих факторов может способствовать увеличению влияний повторных перекрытий изоляции на формирование перенапряжений и необходимости использовать поли модели перекрытий изоляции на опорах и портале ОРУ.

Заключение

1. Показано, что упрощение расчетных моделей защиты подстанций от грозовых волн, набегающих по линиям, за счет учета возможных перекрытий изоляции ВЛ на одной из опор может привести к искажению процессов формирования перенапряжений на оборудовании подстанций и снизить достоверность результатов расчетов. При этом вносимые искажения могут привести как к завышению, так и занижению показателей эффективности системы грозозащиты в целом и отдельных мероприятий.

2. В расчетах с варьированием амплитуды тока молнии при фиксированной длине фронта возможна неоднозначность определения опасных параметров тока молнии. Это также снижает точность расчетных исследований в задачах грозозащиты подстанций.

Библиографический список

1. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.129-99. СПб. : Изд-во ПЭИПК, 1999. 353 с.
2. Регистрация грозовых перенапряжений на подстанции / Ефимов Б. В. [и др.] // Труды КНЦ РАН, Энергетика. Вып. 5. Апатиты, 2012. С. 28–37.
3. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110–750 кВ. М. : НТК "Эл-Проект", 2000. 68 с.
4. Дмитриев М. В. Применение ОПН в электрических сетях 6–750 кВ. СПб., 2007. 60 с.
5. Ефимов Б. В. Оптимизация схем замещения систем "подход ВЛ – подстанция" для целей анализа надежности грозозащиты подстанций // IV Российская конф. по молниезащите : сб. докладов. СПб., 2014. С. 373–382.
6. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхерд А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учебник. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. 319 с.
7. Дмитриев В. Л., Дмитриев М. В. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 4. С. 54–61.

References

1. Rukovodstvo po zaschite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennih perenapryazheniy [Guidelines for electrical networks 6–1150 kV protection from storm and internal surge]. RD 153-34.3-35.129-99. SPb. : Izd-vo PEIPK, 1999. 353 p.
2. Registratsiya grozovykh perenapryazheniy na podstantsii [Registration of lightning overvoltages in the substation] / Efimov B. V. [i dr.] // Trudy KNTs RAN, Energetika. Vyp. 5. Apatity, 2012. P. 28–37.
3. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu ogranichiteley v elektricheskikh setyah 110–750 kV [Guidance on use of limiters in electrical power networks 110–750 kV]. M. : NTK "El-Proekt", 2000. 68 p.

4. Dmitriev M. V. Primenenie OPN v elektricheskikh setyah 6–750 kV [Application of NAO 6–750 kV electric networks]. SPb., 2007. 60 p.

5. Efimov B. V. Optimizatsiya shem zamesheniya sistem "podhod VL – podstantsiya" dlya tseley analiza nadezhnosti grozozaschity podstantsiy [Optimization of replacement systems "approach AL – substation" for the analysis of reliability of lightning protection of substations] // IV Rossiyskaya konf. po molniezaschite : sb. dokladov. SPb., 2014. P. 373–382.

6. Kadomskaya K. P., Lavrov Yu. A., Reyherd A. Perenapryazheniya v elektricheskikh setyah razlichnogo naznacheniya i zaschita ot nih [Surges in electric networks for different purposes and protection against them] : uchebnik. Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. 319 p.

7. Dmitriev V. L., Dmitriev M. V. Parametry razryada molnii v zadachah grozozaschity [Parameters of lightning in the problems of lightning protection] // Izvestiya RAN. Energetika. 2005. N 4. P. 54–61.

Сведения об авторах

Антропов Илья Михайлович – ПО "ЦЭС" филиала ОАО "МРСК Северо-Запада" "Колэнерго", инженер; e-mail: antropov.i.m@yandex.ru

Антропов I. M. – PO "CES" IDGC of the North-West, PJSC, engineer; e-mail: antropov.i.m@yandex.ru

Ефимов Борис Васильевич – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, д-р техн. наук, директор; e-mail: bvefimov@rambler.ru

Efimov B. V. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Laboratory of High-voltage Electro Energy and Technology, Dr of Tech. Sci., Professor, Director; e-mail: bvefimov@rambler.ru

Невретдинов Юрий Масумович – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, доцент; e-mail: ymnevr@mail.ru

Nevretdinov Yu. M. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Laboratory of High-Voltage Electroenergy and Technology, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: ymnevr@mail.ru