

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем
Кафедра Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная
техника

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

_____ В.В. Титков

«___» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ВЛ 110 кВ С ГРОЗОЗАЩИТНЫМ
ТРОСОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПН С ВНЕШНИМ ИСКРОВОМ
ПРОМЕЖУТКОМ

по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
по образовательной программе
07 «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника»

Выполнил
студент гр. 43213/1

Гулов А.М.

Руководитель
доцент, к.т.н.

Адамьян Ю.Э.

РЕФЕРАТ

На 50 с., 24 рисунка, 8 таблиц, 1 приложение.

**МОЛНИЕЗАЩИТА, ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ОПН, ЛИ-
НЕЙНЫЙ РАЗРЯДНИК, ВАРИСТОР, ЛИНЕЙНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ, ВНЕШНИЙ
ИСКРОВОЙ ПРОМЕЖУТОК**

В данной работе проводится исследование молниезащиты ВЛ 110 кВ с грозозащитным тросом при использовании ОПН с внешним искровым промежутком. Приведен обзор основных параметров молнии, последствий удара молнии для токоведущих элементов и средств защиты от грозовых перенапряжений. В программном комплексе EMTPWorks создана схема замещения ВЛ для расчетов грозовых перенапряжений. Проведен анализ молниезащиты ВЛ 110 кВ при установке линейных разрядников и без них.

THE ABSTRACT

Mentor: Y.E. Adamyan. Author: A.M. Gulov

The title of the graduating work: Research on lightning protection of OHL with ground-wire with transmission line arresters

50 pages, 24 pictures, 8 tables, 1 applications

**LIGHTNING PROTECTION, OVERHEAD LINE, SURGE ARRESTER, TRANS-
MISSION LINE ARRESTER, VARISTOR, LINE INSULATION, SPARK GAP**

In this paper is carried out a study of lightning protection of 110 kV overhead line with using of overhead ground-wire cable and surge arrester with external spark gap. In this work are reviewed the main parameters of lightning, the consequences of lightning for current carrying elements and means of protection against lightning surges. The equivalent circuit of overhead power line is created in the software complex EMTPWorks for the calculation of lightning surges. The main topic is the analysis of lightning protection of overhead power line 110 kV with the installation of line transmission arresters and without them

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1. Обзор литературы.....	8
1.1 Основные параметры молниевых разрядов и их статистические характеристики.....	8
1.2 Воздействие молнии на токоведущие элементы	13
1.2.1 Грозопоражаемость воздушных линий	14
1.2.2 Удар молнии в опору или в трос вблизи опоры	15
1.3 Современные средства защиты от грозовых перенапряжений	16
1.3.1 Особенности работы линейного разрядника	18
1.3.2 Основные параметры линейных разрядников	19
2. Моделирование удара молнии в воздушную линию электропередачи.....	20
2.1 Вольт-секундная характеристика изоляции воздушной линии	20
2.2 Модель линейной изоляции и ее вольт-секундной характеристики	22
2.3 Модель опоры воздушной линии электропередачи	25
2.4 Модель линейного разрядника	26
2.4.1 Вольт-амперная характеристика варистора	26
2.4.2 Вольт-амперная характеристика рабочего резистора	27
2.4.3 Вольт-секундная характеристика линейного разрядника	29
3. Анализ грозовых перенапряжений при ударе молнии в опору или в трос вблизи опоры ВЛ 110 кВ	31
3.1 Расчетная модель	31
3.2 Расчет перенапряжений при ударе молнии в опору без установки ЛР на фазах	33
3.3 Расчет перенапряжений при ударе молнии в опору с установкой ЛР на всех фазах одной цепи	38

3.4 Влияние фазного напряжения на импульсную прочность линейной изоляции при грозовых перенапряжениях	43
3.5 Расчеты перенапряжений при различных параметрах импульса	45
Заключение	47
Список использованных источников	49
Приложение. Линейные разрядники класса напряжения 110 кВ.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Защита высоковольтных воздушных линий электропередач от перенапряжений и связанных с ними неблагоприятных последствий одна из важных задач современной электроэнергетики. Большую опасность для безотказной работы воздушной линии представляют собой удары молнии. Нередко перенапряжения, вызванные ударом молнии, приводят к отключению линии, а при двухцепном построении возможно отключение обеих линий. Нарушение работы линий электропередачи может привести к обесточиванию предприятий, что влечет за собой неизбежные экономические потери, связанные с нарушением процесса производства. Во избежание таких неблагоприятных ситуаций необходимо повышать эффективность молниезащиты ВЛ.

В течении последних лет в качестве повышения грозоупорности ВЛ стали применять защитные аппараты, принцип действия которых основан на нелинейном сопротивлении. Применение таких аппаратов основывается на условиях эксплуатации ВЛ. При умеренных сопротивлениях заземления опор нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) могут быть использованы вместо грозозащитного троса. В районах с высоким удельным сопротивлением грунтов, где растет вероятность обратного перекрытия, решением по повышению эффективности грозоупорности ВЛ может стать применение ОПН с внешним искровым промежутком (линейный разрядник (ЛР)). Нехватка опыта эксплуатации таких систем молниезащиты оставляет открытыми многие важные вопросы. Необходимо выбирать места установки ОПН, частоту их использования, а также оценить потенциальные воздействия, которым подвергается ОПН, чтобы установленные аппараты оказали положительное влияние на эксплуатируемую систему, а не наоборот ухудшили ее надежность.

Для решения описанных выше задач в настоящее время разработан широкий спектр программных комплексов, с помощью которых появляется возможность создавать модели реальных объектов энергосистемы, производить необходимые расчеты и оценку, таким образом дополняя нехватку опыта эксплуатации.

Чтобы приблизить аналитические результаты к действительным, используемые модели должны быть своевременно улучшены и оптимизированы.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Основные параметры молниевых разрядов и их статистические характеристики

Основные характеристики молниевых разрядов фиксируются с помощью специальных регистраторов. Производится либо осциллографирование кривой импульсов тока молнии, либо регистрация максимальных значений токов молнии производится по методу фиксации остаточной намагниченности. Использование осциллографа дает более точный результат, чем регистраторы остаточного намагничивания. Преимуществом последнего способа измерения характеристик молнии является охват больших территорий (установка регистраторов на большом количестве опор). Таким образом уменьшается общая погрешность измерений. Однако, если требуется раздельно фиксировать характеристики первого и последующих разрядов, пригодными оказываются только данные, полученные осциллографированием.

Применительно к молниезащите основными характеристиками импульса тока молнии являются амплитудное значение тока молнии I_M и крутизна тока молнии I'_M . Под крутизной тока молнии понимается скорость повышения тока на фронте импульса. Обычно используют усредненное значение:

$$I'_M = \frac{I_M}{\tau_\phi}, \quad (1.1)$$

где τ_ϕ — длительность фронта импульса.

После достижения максимального значения импульс начинает постепенно уменьшаться до нуля. Время полуспада волны называется длительностью импульса $\tau_{и}$.

Статистические распределения амплитуд токов молнии могут быть представлены в следующем формульном виде:

$$P(I \geq I_M) = 1 - \frac{\lg(e)}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{\lg I_M}} \cdot \int_{I_{min}}^{I_M} \frac{1}{I} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\lg(I) - \lg(I_{M,cp})}{\sigma_{\lg I_M}} \right)^2 \right] dI, \quad (1.2)$$

где $\sigma_{\lg I'_M}$ – стандарт отклонения логарифма тока молнии;

$\lg(I'_{M.ср})$ – среднее значение логарифма тока молнии;

I'_{min} – минимальное зарегистрированное значение амплитуды тока молнии (200-500 А).

Аналогично для крутизны тока молнии:

$$P(I' \geq I'_M) = 1 - \frac{\lg(e)}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{\lg I'_M}} \cdot \int_{I'_{min}}^{I'_M} \frac{1}{I'} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\lg(I') - \lg(I'_{M.ср})}{\sigma_{\lg I'_M}} \right)^2 \right] dI, \quad (1.3)$$

где $\sigma_{\lg I'_M}$ – стандарт отклонения логарифма крутизны тока молнии;

$\lg(I'_{M.ср})$ – среднее значение логарифма крутизны тока молнии;

I'_{min} – минимальное значение крутизны тока молнии.

Распределение тока молнии согласно РД представлено на рисунке 1.1.

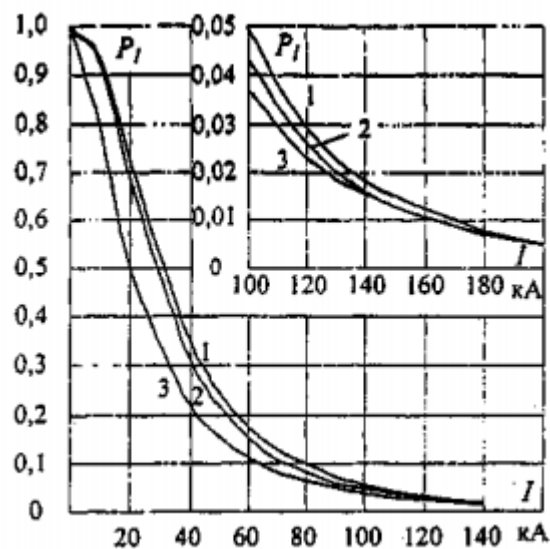


Рис. 1.1 Распределение амплитуды тока первых импульсов многократного разряда молнии:

1 – обобщенное распределение по результатам измерений преимущественно на башнях (рекомендация Исследовательского комитета № 33 СИГРЭ);

2 – по измерениям на ВЛ ($h_{оп}$ до 45 м);

3 – по измерениям на ВЛ ($h_{оп}$ до 20 м)

Такие параметры разряда молнии как длина фронта τ_ϕ и длина импульса $\tau_{и}$ также представляют собой случайные величины. Для первого разряда зафиксированы относительно длительные значения τ_ϕ и $\tau_{и}$. Разброс значений τ_ϕ

находится в диапазоне 2–10 мкс, с усредненным значением в 4,5 мкс. Для последующих импульсов τ_{ϕ} составляет в среднем 1 мкс. Приблизительное распределение длительностей фронта представлено на рисунке 1.2.

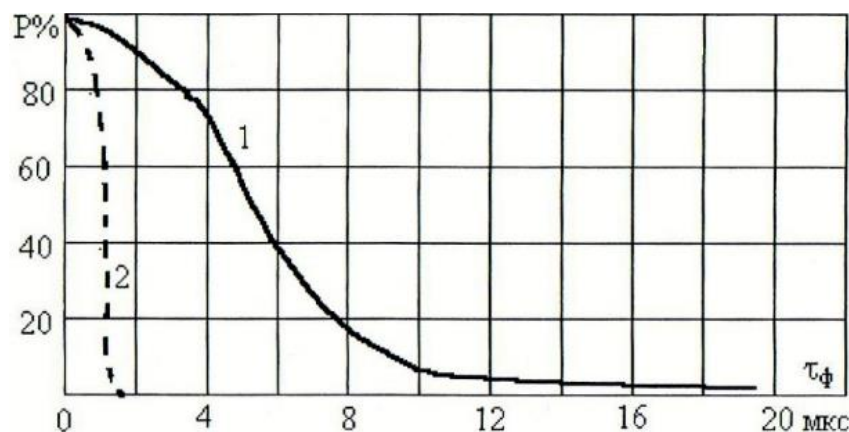


Рис. 1.2 Статистическое распределение длительностей фронта импульсов тока молнии при первом (1) и последующих (2) разрядах

Длительность импульса первого разряда находится в пределах 20–200 мкс, с усредненным значением в 100 мкс. Для последующих разрядов средняя длина примерно в два раза меньше – 50 мкс. Приблизительное распределение длительностей полуспада волны представлено на рисунке 1.3. В половине случаев удары молнии представляют собой одиночный разряд. В прочих ситуациях количество разрядов находится в диапазоне от 2 до 10. Иногда регистрируются молнии с числом разрядов более 20.

Характеристики логнормальных распределений параметров разряда тока молнии приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Статистические характеристики импульсов молнии

Наименование параметра		Характеристики распределения		Значения параметров, превышение которых возможно с вероятностью			Наибольшее зарегистрированное значение
		Мат. ожидание	σ_{lgI}	0,95	0,5	0,05	
Первый импульс							
I_M , кА	СИГРЭ(башни)	30,3	0,32	8,9	30	100,8	250
	ВНИИЭ(ВЛ, $h_{оп} = 25-45$ м)	28	0,32	8,3	28	94	250
	НИ-ИПТ(ВЛ, $h_{оп}=1$ 3-20 м)	20	0,39	4,6	20	87,7	250
$\tau_{и}$, мкс		75	0,25	30	75	200	250
I'_M , кА/мкс	$I'_{M 0,1}$	5	0,28	1,7	5	14,1	15
	$I'_{M 0,3}$	7,2	0,27	2,6	7,2	20	18
	$I'_{M max}$	24,3	0,26	9,1	24,3	65	72
$\tau_{ф}$, мкс	$\tau_{ф0,1}$	4,5	0,25	1,8	4,5	11,3	30
	$\tau_{ф0,3}$	2,3	0,24	0,9	2,3	5,8	9
Последующие импульсы							
I_M , кА		11,8	0,23	4,9	11,8	28,6	35
$\tau_{и}$, мкс		32	0,4	6,5	32	140	170
I'_M , кА/мкс	$I'_{M 0,1}$	15,4	0,41	3,3	15,4	72	300
	$I'_{M 0,3}$	20,1	0,42	4,1	20,1	98,5	300
	$I'_{M max}$	39,9	0,37	9,9	39,9	161,5	300
$\tau_{ф}$, мкс	$\tau_{ф0,1}$	0,6	0,4	0,1	0,6	2,8	5,2
	$\tau_{ф0,3}$	0,4	0,44	0,1	0,4	1,8	3,8

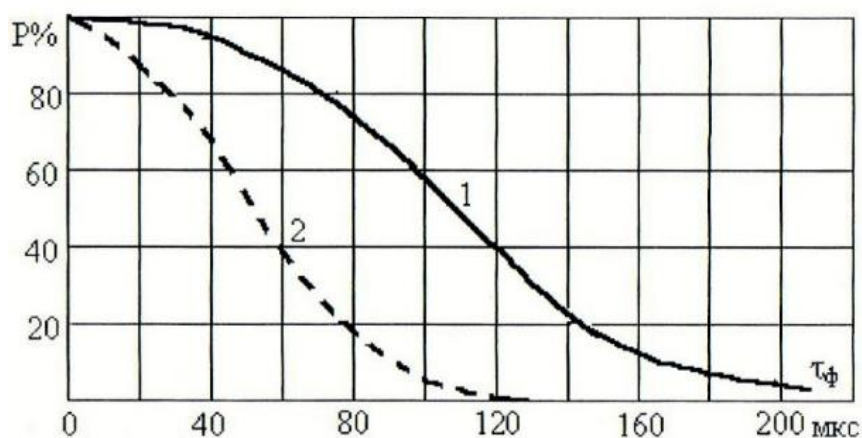


Рис. 1.3 Статистическое распределение длительности полуспада импульсов тока молнии при первом (1) и последующих (2) разрядах

Для анализа перенапряжений в объектах, которые подверглись удару молнии, вводится эквивалентная схема замещения канала молнии со стекающим в объект током. В расчетах канал молнии обычно представляют как однородную однопроводную линию без потерь с волновым сопротивлением Z_M , по которой идет волна с максимальным напряжением:

$$U_M = 0,5 \cdot I_M Z_M. \quad (1.4)$$

Волновое сопротивление канала молнии – это условная величина, которая зависит от времени, тока молнии и от высоты участка канала. При малых токах значение Z_M колеблется от 1 до 10 кОм, при очень больших токах от 300 до 600 Ом. Зависимость Z_M от амплитуды тока молнии представлена на рисунке 1.4.

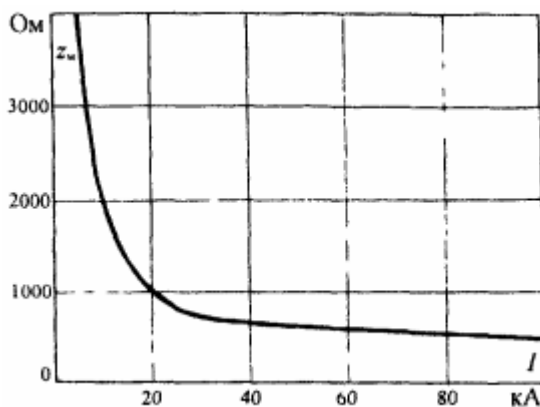


Рис. 1.4 Зависимость волнового сопротивления канала от тока молнии

На практике принимают при $1 \text{ кА} < I_M < 200 \text{ кА}$:

$$Z_M = 140 \cdot \left(1 + \frac{240}{I_M}\right). \quad (1.5)$$

При использовании расчетного значения волнового сопротивления Z_M изменяется амплитуда тока в пораженном объекте $I_{об}$, которая выражается следующим образом:

$$I_{об} = I_{R0} \cdot \frac{Z_M}{Z_M + z_{эКВ}}, \quad (1.6)$$

где I_{R0} – амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект;

$Z_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление пораженного объекта.

Как правило при расчетах Z_M приравнивают бесконечности, тогда $I_{об} = I_{R0}$. Также в качестве расчетной схемы замещения канала молнии используется источник тока с эквивалентным волновым сопротивлением (см. рис. 1.5).

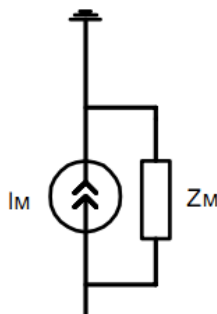


Рис. 1.5 Схема замещения канала молнии

1.2 Воздействие молнии на токоведущие элементы

Внешние перенапряжения, вызванные ударом молнии, представляют собой большую опасность для энергосистемы. Наиболее тяжелые последствия в электрической цепи проявляются при прямом ударе молнии (ПУМ) в токоведущие части. Ток молнии может достигать сотен килоампер. Результатом воздействия такого импульса становятся перенапряжения величиной в несколько мегавольт, которые приводят к перекрытию изоляции. При большом удельном сопротивлении грунта опасными являются обратные перекрытия с заземленных частей электрической системы.

Другой тип внешних перенапряжений – индуктированные перенапряжения – вызваны электромагнитной связью канала молнии и токоведущих элементов. Они имеют куда меньшую величину по сравнению с перенапряжениями от ПУМ.

1.2.1 Грозопоражаемость воздушных линий

Число прямых ударов молнии в год в воздушную линию длиной L километров при плотности разрядов молнии p_0 (1/км²) вдоль трассы ВЛ определяется по формуле:

$$N_{\text{ПУМ}} = N_{\text{ПУМ}}^* \cdot \frac{p_0}{5} \cdot \frac{L}{100}, \quad (1.7)$$

где $N_{\text{ПУМ}}^*$ – число ударов молнии на 100 км длины ВЛ и 100 грозových часов.

Согласно РД [1] $N_{\text{ПУМ}}^*$ определяют как:

$$N_{\text{ПУМ}}^* = \frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + 5 \cdot h_{\text{ср}} - \frac{2 \cdot h_{\text{ср}}^2}{30}, \text{ при } h_{\text{ср}} \leq 30 \text{ м}, \quad (1.8)$$

$$N_{\text{ПУМ}}^* = 0,75 \cdot \left(\frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + h_{\text{ср}} + 90 \right), \text{ при } h_{\text{ср}} \geq 30 \text{ м}, \quad (1.9)$$

где $d_{\text{тр-тр}}$ – расстояние между тросами (или проводами для бестросовой линии), м (для ВЛ с одним тросом равное 0);

$h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса троса (верхнего провода, если трос отсутствует), м.

В данной работе рассматривается ВЛ с опорами П110-4В с одним тросом ($h_{\text{ср}} = 29$ м), предположительно расположенная в районе г. Сургута. Число ударов молнии в линию на 100 км при 40 грозových часах ($p_0 = 2$ удара на км²), характерных для этого района, рассчитывается по (1.7) с учетом (1.8):

$$N_{\text{ПУМ}} = \left(5 \cdot 29 - \frac{2 \cdot 29^2}{30} \right) \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{100}{100} = 36.$$

Такая ВЛ испытывает в среднем 36 ударов молнии в год на каждые 100 км длины, т.е. для нормальной работы необходимы специальные меры по грозозащите.

1.2.2 Удар молнии в опору или в трос вблизи опоры

Обратное перекрытие с опоры на фазный провод становится возможным, когда напряжение на изоляционных промежутках опоры превзойдет их импульсную прочность. Напряжение на изолирующей подвеске считается как разность потенциалов на опоре и фазном проводе. Напряжение на опоре $U_{оп}$ становится максимальным в момент окончания фронта импульса тока молнии, тогда схема замещения опоры эквивалентруется как последовательное соединение индуктивности опоры $L_{оп}$ и импульсного сопротивления заземления опоры $R_{зи}$.

На рисунке 1.6 представлена эквивалентная схема воздействия удара молнии в опору или в трос вблизи опоры на линию электропередач, где $Z_{тр}$ — волновое сопротивление троса.

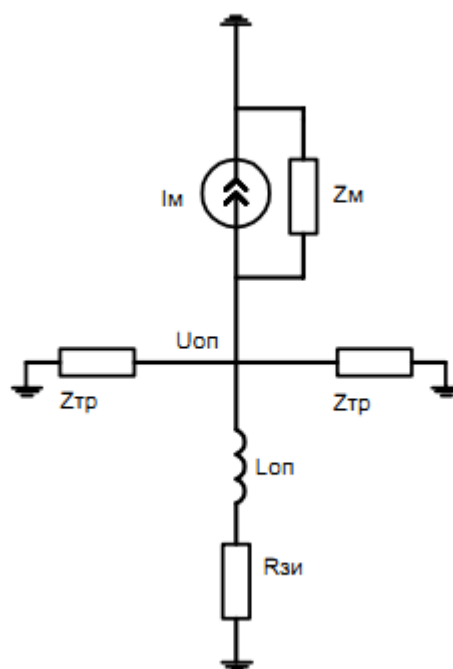


Рис. 1.6 Эквивалентная схема воздействия удара молнии в опору или трос вблизи опоры на линию электропередач

Результатом обратного перекрытия может стать силовая дуга и отключение линии. Количество отключений линии в год, вызванных обратными перекрытиями, оценивается формулой:

$$n_{пр} = N_{ПУМ} \cdot P_{оп} \cdot P_{I_{оп}} \cdot P_{д}, \quad (1.10)$$

где $N_{\text{ПУМ}}$ – число прямых ударов молнии в линию, в год;

$P_{\text{оп}}$ – вероятность попадания молнии в вершину опоры или трос вблизи опоры;

$P_{I_{\text{оп}}}$ – вероятность обратного перекрытия изоляции при ударе молнии в опору;

$P_{\text{д}}$ – вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу.

Вероятность попадания молнии в вершину опоры или трос вблизи опоры приближенно выражается формулой:

$$P_{\text{оп}} = \frac{4 \cdot h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (1.11)$$

где $h_{\text{оп}}$ – высота опоры, м;

$l_{\text{пр}}$ – длина пролета, м.

1.3 Современные средства защиты от грозových перенапряжений

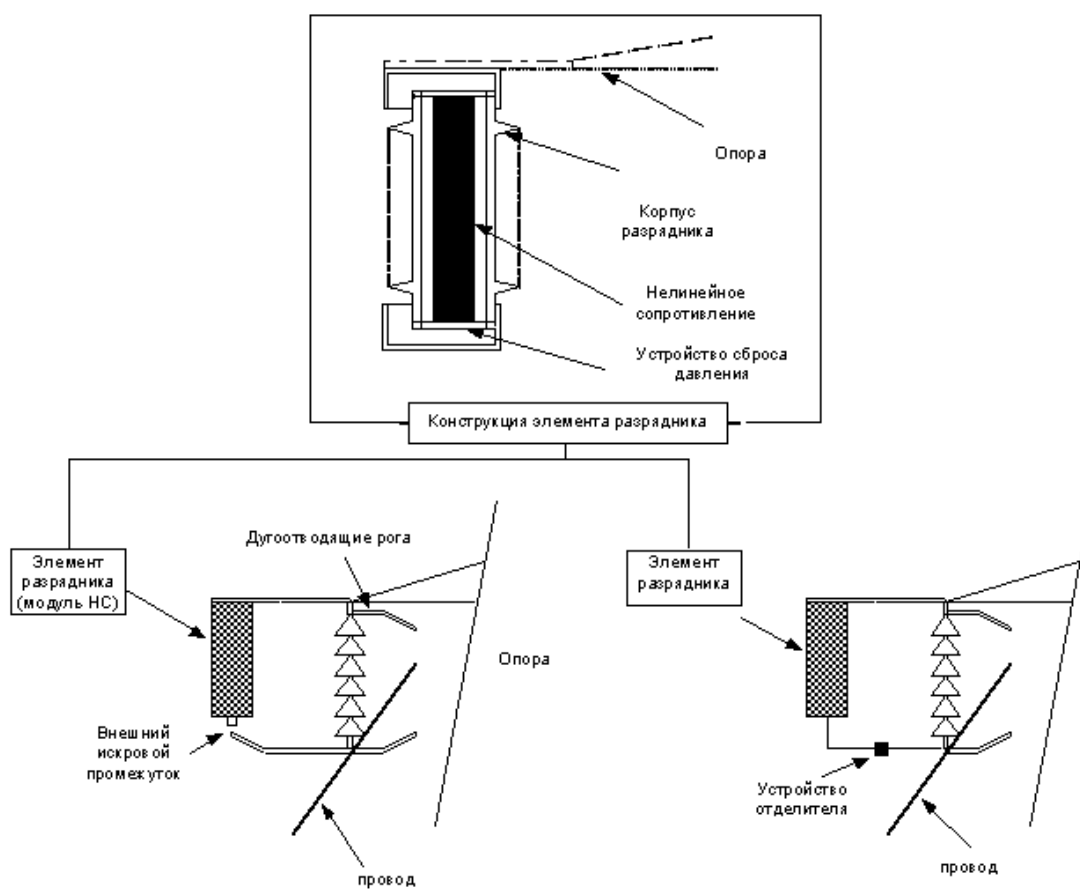
В ситуациях, когда традиционные средства защиты воздушных линий, такие как тросы и заземление опор, не могут обеспечить должный уровень надежности работы ВЛ, рекомендуется применять специальные аппараты: нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и линейные разрядники с внешним искровым промежутком (ЛР). К таким ситуациям можно отнести эксплуатацию ВЛ без тросов или прохождение линии по местности с большим удельным сопротивлением грунта.

Конструкция ОПН состоит из последовательно соединенных нелинейных сопротивлений – варисторов, которые помещаются в изолирующую крышку из полимерных материалов. Варисторы изготавливаются из вещества на основе оксида цинка ZnO. В результате получают сопротивления с резко нелинейной вольт-амперной характеристикой и большой пропускной способностью. Все ОПН, устанавливаемые на ВЛ, должны быть оборудованы отделителем – устройством, целью которого является разрыв соединения аппарата с фазным проводом в случае повреждения ОПН и предотвращение короткого замыкания. Для

обеспечения взрывобезопасности ограничители перенапряжений оснащаются устройством сброса давления.

Линейный разрядник состоит из рабочего резистора (РР) и внешнего искрового промежутка (ВИП) между РР и фазным проводом. По конструкции РР не отличается от ОПН. Оснащать ЛР отделителем нет необходимости так как его роль исполняет ВИП.

На рисунке 1.7 схематично изображена конструкция ЛР и ОПН



а) Разрядник с внешним искровым промежутком б) Линейный ОПН

Рис. 1.7 Конструкция ЛР и ОПН

На рисунке 1.8 изображен смонтированный на траверсе опоры ЛР.

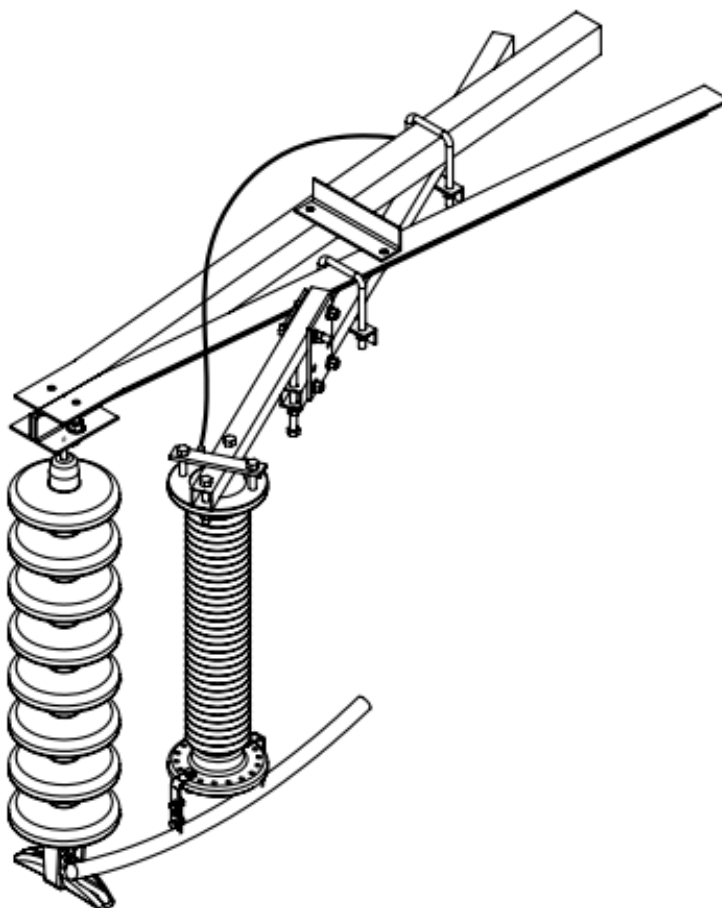


Рис. 1.8 Монтаж ЛР на траверсе опоры

1.3.1 Особенности работы линейного разрядника

К работе ЛР относится ряд особенностей. В процессе эксплуатации большая часть рабочего напряжения приложено к ВИП. Во время опасных для линейной изоляции перенапряжений искровой промежуток перекрывается и напряжение на изоляции ограничивается до уровня остающегося напряжения рабочего резистора при конкретном разрядном токе. Как только ток молнии иссякает, электрическая прочность ВИП должна быстро восстановиться, чтобы искровое перекрытие не перешло в силовую дугу короткого замыкания. Для этого необходимо оборвать сопровождающий ток промышленной частоты при первом его переходе через ноль, который составляет доли ампера и появляется в ионизованном разрядом молнии воздухе искрового промежутка.

Наличие внешнего искрового промежутка дает линейному разряднику ряд преимуществ над ОПН. Благодаря ВИП рабочий резистор не подвергается постоянному воздействию рабочего напряжения сети, а также защищен от коммутационных и квазистационарных перенапряжений. Таким образом уменьшается вероятность повреждения РР, возрастают его надежность и продолжительность срока службы. Кроме того, нелинейное сопротивление разрядника комплектуется на меньшее остающееся напряжение, что удешевляет его по сравнению с обычным ОПН. В случае повреждения РР возникновение негативного влияния на ВЛ мало, так как существует ВИП, отделяющий фазный провод от резистора.

1.3.2 Основные параметры линейных разрядников

Ниже приведены параметры линейных разрядников, которые нуждаются в обязательном определении.

Максимально допустимая длина внешнего искрового промежутка должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечивалось опережающее срабатывание ЛР по отношению к перекрытию линейной изоляции. Другими словами, вольт-секундная характеристика (ВСХ) ЛР обязана находиться ниже ВСХ линейной изоляции в диапазоне предразрядного времени от 1 до 10 мкс. В качестве критерия для выполнения этого условия можно принять выражения:

$$U_{50,ЛР} < 0,9 \cdot U_{50,из}, \quad (1.12)$$

где $U_{50,ЛР}$ — разрядное пятидесятипроцентное напряжение ЛР;

$U_{50,из}$ — разрядное пятидесятипроцентное напряжение фазной изоляции.

$$U_{ЛР_{1\text{ мкс}}} < U_{из_{1\text{ мкс}}}, \quad (1.13)$$

где $U_{ЛР_{1\text{ мкс}}}$ — разрядное напряжение ЛР с предразрядным временем 1 мкс;

$U_{из_{1\text{ мкс}}}$ — разрядное напряжение фазной изоляции с предразрядным временем 1 мкс.

Согласно (1.12) определяется условие опережающего срабатывания ЛР при предразрядном времени около 10 мкс, согласно (1.13) при крутом развитии разряда и малых временах.

Наибольшая допустимая длина ВИП зависит от типа изоляторов, которыми оснащается воздушная линия, от параметров РР. Для класса напряжения 110 кВ предельная длина ВИП колеблется в диапазоне 400-600 мм.

В соответствии с основными параметрами рабочего резистора, а именно остающемся напряжении при номинальном разрядном токе $U_{ост}$ (10 кА) и пропускной способностью происходит выбор варисторов и комплектация РР. Предельные значения остающегося напряжения определяются исходя из двух условий. Верхняя граница зависит от импульсной прочности линейной изоляции, так как необходимо обеспечить согласование вольт-секундных характеристик ЛР и изоляции. Остающееся напряжение не должно превышать $0,9 \cdot U_{50,из}$. Ограничением для нижней границы является выполнение условия обрыва сопровождающего тока. По экономическим причинам стараются сделать разрядник с наименьшим возможным $U_{ост}$.

Амплитуда разрядного тока и энергия, рассеиваемая ЛР при возникновении грозовых перенапряжений, зависят от многих факторов. Среди них параметры импульса тока и заряд вспышки молнии, конструкция ВЛ, место удара молнии, сопротивление заземления опор. Для определения энергии наиболее важным является общий заряд вспышки молнии первого и последующих импульсов тока.

Основные параметры ЛР для класса напряжения 110 кВ должны соответствовать требованиям, указанным в приложении.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА МОЛНИИ В ВОЗДУШНУЮ ЛИНИЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

2.1 Вольт-секундная характеристика изоляции воздушной линии

Импульсная прочность линейной изоляции отражается ее вольт-секундной характеристикой. Зависимость напряжения перекрытия от времени возникает так как электрический пробой развивается с определенной скоростью. Скорость

разряда в свою очередь зависит от изоляционной среды, приложенного напряжения и от степени неоднородности электрического поля.

Вольт-секундную характеристику можно получить экспериментальным путем. Испытуемый объект подвергается воздействию импульсов напряжения одинаковой формы, но различной амплитуды. Таким образом снимается предразрядное время и напряжение, при котором происходит перекрытие испытуемого объекта.

На практике импульсы напряжения, воздействующие на изоляцию, имеют нестандартную форму. В таком случае для определения ВСХ используют интегральный метод.

ВСХ изоляции определяется уравнением:

$$\int_{t_0}^t [|u_{\text{возд}}(t)| - U_0]^K dt - D \geq 0, \quad (2.1)$$

где $u_{\text{возд}}(t)$ – напряжение, воздействующее на воздушный промежуток;

U_0 – критическое начальное напряжение, кВ;

K и D – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Вычисление интеграла начинается в момент времени t_0 , когда $u_{\text{возд}}(t)$ превысит значение критического начального напряжения U_0 (рис. 2.1). Перекрытие изоляции происходит, когда площадь A (рис. 2.1) подынтегральной кривой $[|u_{\text{возд}}(t)| - U_0]^K$ будет больше параметра D .

Вычисление коэффициентов уравнения (2.1) производится при помощи экспериментальных данных. Берется три пары точек ВСХ изоляции и решается система из трех уравнений.

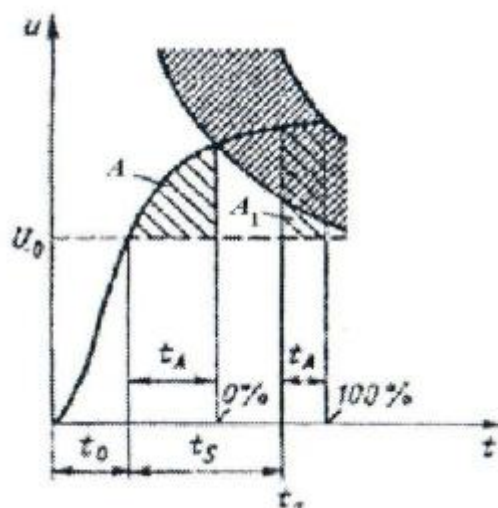


Рис. 2.1 Интегральный метод построения ВСХ

Согласно рис. 2.1 время от начала импульса напряжения до перекрытия промежутка состоит из трех величин:

t_0 – время от начала импульса до достижения критического начального напряжения U_0 ;

t_s – время статистического запаздывания (от момента образования мощного электрического поля, в котором происходит ионизация газа, до появления эффективного начального электрона);

t_A – время формирования разряда.

Таким образом преимущество данного метода заключается в том, что учитываются перекрытия не только на фронте импульса, но и на его хвосте.

2.2 Модель линейной изоляции и ее вольт-секундной характеристики

Построение схем замещения, расчеты и исследования проводятся при помощи программных комплексов ATPDraw и EMTPWorks.

На рисунке 2.2 представлена схема модели в EMTPWorks, отражающая вольт-секундную характеристику линейной изоляции.

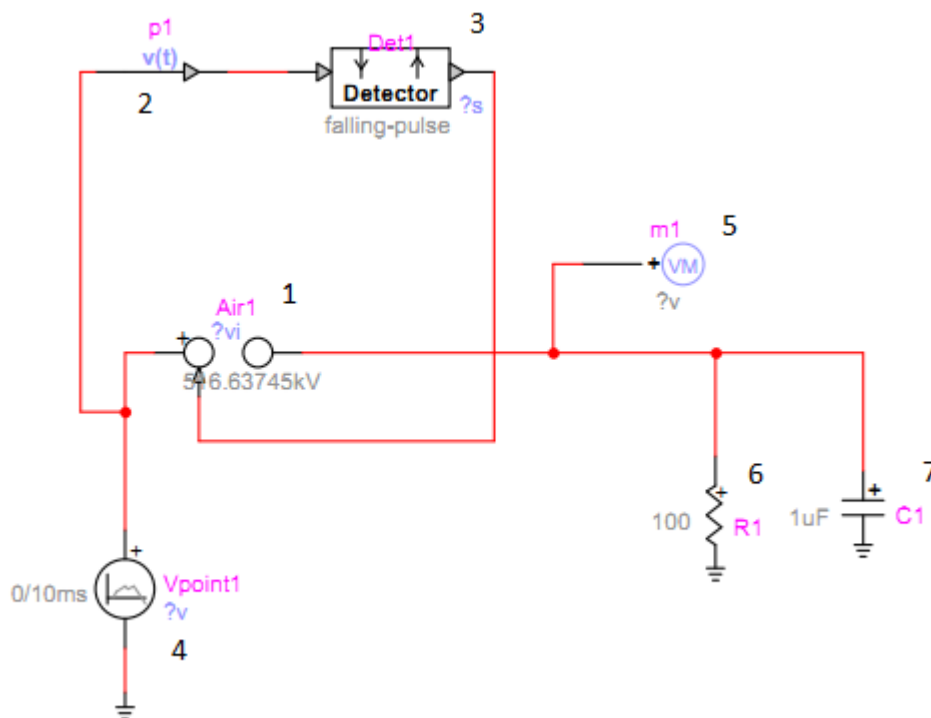


Рис. 2.2 Модель BCX изоляции в EMTPWorks

Цифрами на схеме обозначены следующие элементы:

1 – воздушный промежуток, который работает по описанному выше интегральному методу. В нем задаются параметры U_0 , K и D , в соответствии с которыми вычисляется интеграл (2.1);

2 – датчик, измеряющий мгновенное значение напряжение подаваемого сигнала $u_{\text{возд}}(t)$;

3 – управляющий элемент, который улавливает изменение входящего сигнала импульса;

4 – источник косоугольного импульса напряжения, подаваемого на объект исследования;

5 – прибор, измеряющий напряжение в конкретном участке цепи;

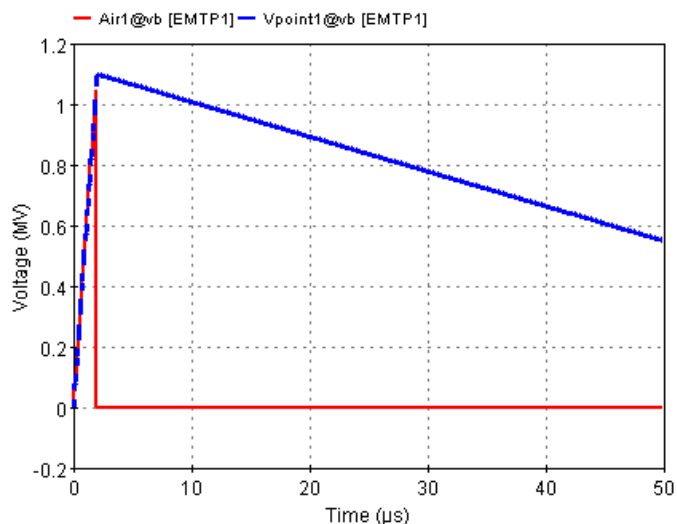
6 – сопротивление заземления;

7 – емкость на землю.

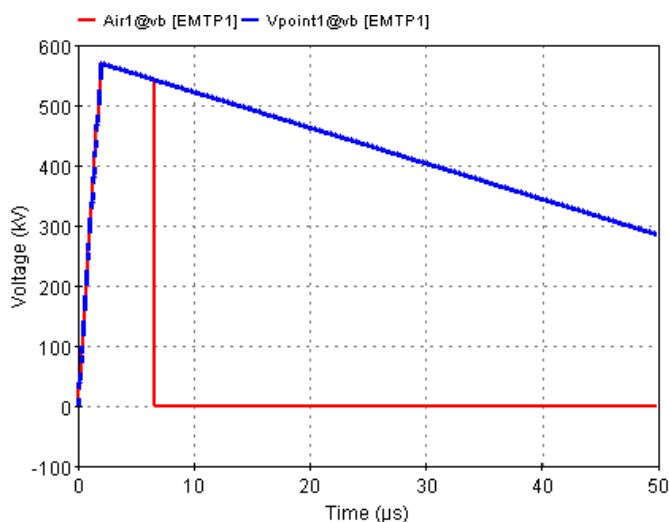
Коэффициенты для уравнения (2.1) были вычислены на основе экспериментальной BCX гирлянды изоляторов $8 \times \text{ПС70Д}$. В результате решения системы из трех уравнений получены следующие значения:

$$U_0 = 516,64 \text{ кВ}; K = 0,904; D = 0,067.$$

В качестве примера проведем два испытания, в первом случае подавая ко-соугольный импульс напряжения с амплитудой 1100 кВ и длиной фронта 2 мкс, во втором 570 кВ с аналогичной длиной фронта. На рисунке 2.3 приведены осциллограммы напряжения источника и воздушного промежутка (цифры 4 и 1 на рис. 2.2 соответственно).



а) Перекрытие на фронте импульса



б) Перекрытие на хвосте импульса

Рис. 2.3 Напряжение на источнике 4 (—), на воздушном промежутке 1 (—)

Как видно из рис. 2.3 напряжение на воздушном промежутке изначально повторяет сигнал с источника, но в момент времени $t = 1,85$ мкс для (а) и $t = 6,55$ мкс для (б) происходит перекрытие промежутка и напряжение падает до

нуля. Осциллограмма наглядно демонстрирует учет пробоя как на фронте, так и на хвосте импульса.

2.3 Модель опоры воздушной линии электропередачи

Рассматривается опора промежуточного типа П110-4В конструкция которой приведена на рис. 2.4.

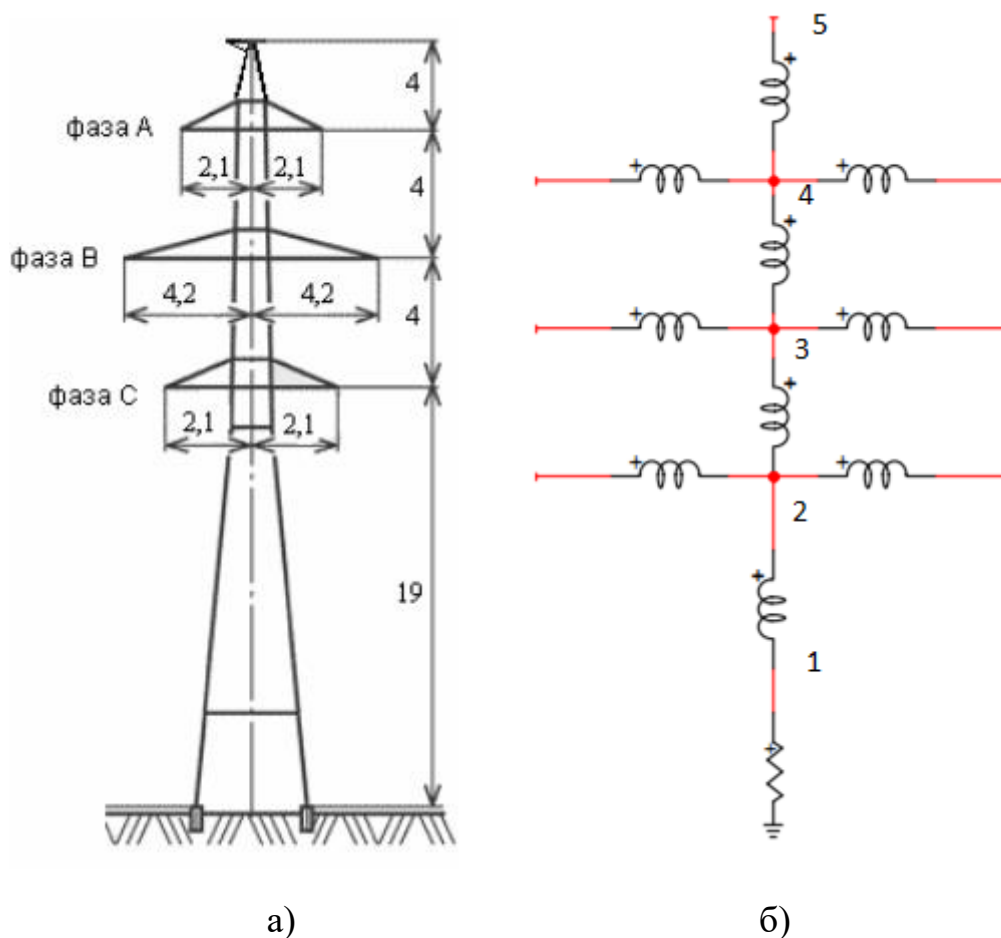


Рис. 2.4 Конструкция а), расчетная модель б) опоры П110-4В

В качестве расчетной модели опоры используется набор индуктивностей. Приблизительный расчет индуктивности опоры производится по следующей формуле:

$$L_{\text{оп}} = L_{\text{оп}}^* \cdot h_{\text{оп}}, \quad (2.2)$$

где $L_{\text{оп}}^*$ — средняя индуктивность на единицу длины опоры, мкГн/м;

$h_{\text{оп}}$ — высота опоры, м.

Средняя индуктивность на единицу длины для металлических опор равна 0,6 мкГн/м, тогда индуктивность всей опоры П110-4В будет составлять 18,6 мкГн. Индуктивность от земли до нижней траверсы (участок 1-2 на рис.2.4 б) будет составлять 11,4 мкГн, участков между траверсами (2-3 и 3-4) 2,4 мкГн, от верхней траверсы до троса (4-5) также 2,4 мкГн. Индуктивности верхних и нижних траверс опоры равны 1,26 мкГн, средней траверсы 2,52 мкГн. Сопротивление заземления будем считать чисто активным.

2.4 Модель линейного разрядника

2.4.1 Вольт-амперная характеристика варистора

Как уже говорилось выше варистор имеет нелинейную зависимость сопротивления от приложенного напряжения. При воздействии на варистор напряжения больше определенного значения его сопротивление резко понижается.

В программном комплексе ATPDraw были проведены расчеты вольт-амперной характеристики варистора марки Epcos S10V-E48KV612E остающееся напряжение которого при номинальном разрядном токе 10 кА варьируется в пределах $U_{ост} = 10,35 - 12,25$ кВ. Для получения ВАХ подавался импульс постоянной формы 8/20 мкс и с разной амплитудой тока. Результаты приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Вольт-амперная характеристика варистора

I_M, A	650	1200	2670	4180	5710	7260	8830	10410
$U_{ост}, B$	8660	9347	9820	10300	10720	11010	11300	11570

На рисунке 2.5 ВАХ отражена графически. Таким образом для номинального разрядного тока 10 кА остающееся напряжение будет равно 11,5 кВ.

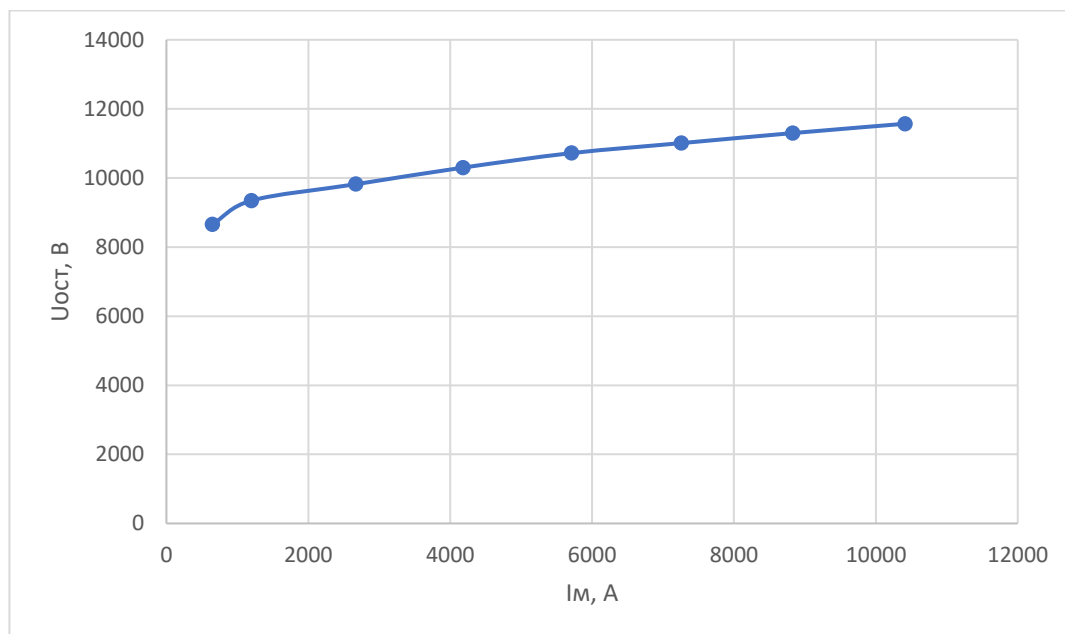


Рис. 2.5 ВАХ варистора

2.4.2 Вольт-амперная характеристика рабочего резистора

Рабочий резистор необходимо укомплектовать варисторами для работы на воздушной линии 110 кВ. Для надежной работы ЛР нужно правильно выбрать остающееся напряжение РР. С наибольшим рабочим напряжением $U_{нро}$ оно связано следующим соотношением:

$$U_{нро} = \frac{U_{ост}}{3,2}, \quad (2.3)$$

Как правило для защиты ВЛ 110 кВ используются подвесные ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением $U_{нро} = 88$ кВ. Для ЛР требуется комплектация на меньшее остающееся напряжение, так как аппарат не находится под постоянным воздействием рабочего напряжения сети. Соответственно и наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение задается меньшим, чем у подвесных ОПН. Для ВЛ 110 кВ воспользуемся рабочим резистором с $U_{нро} = 60$ кВ. Тогда при номинальном разрядном токе 10 кА остающееся напряжение ЛР:

$$U_{ост} = 3,2 \cdot U_{нро} = 3,2 \cdot 60 = 192 \text{ кВ.}$$

Используя данные таблицы 2.1 для ВАХ варистора получена ВАХ рабочего резистора, которая представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Вольт-амперная характеристика рабочего резистора

I_M , А	650	1200	2670	4180	5710	7260	8830	10410
$U_{ост}$, кВ	143,8	155,2	163	170,1	177,9	182,8	187,6	192,1

Напряжение на разряднике связано с током, протекающим через резистор, следующей степенной зависимостью:

$$U_{ост} = A \cdot I_M^\alpha, \quad (2.4)$$

где α – коэффициент нелинейности материала;

A – константа, зависящая от свойств материала и геометрических размеров варистора.

Коэффициенты α и A имеют разные значения в области малых и больших токов. Для расчета принимаем $\alpha = 0,135$, тогда по известным величинам вычислим коэффициент $A = 55091,63$ В/А. Результаты расчета ВАХ рабочего резистора, полученные при помощи степенной зависимости (2.4), приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Вольт-амперная характеристика рабочего резистора

I_M , кА	1	5	10	20	40	50
$U_{ост}$, кВ	139,99	173,9	191	209,8	230,3	237,4

На рисунке 2.6 изображены ВАХ РР, полученные двумя способами.

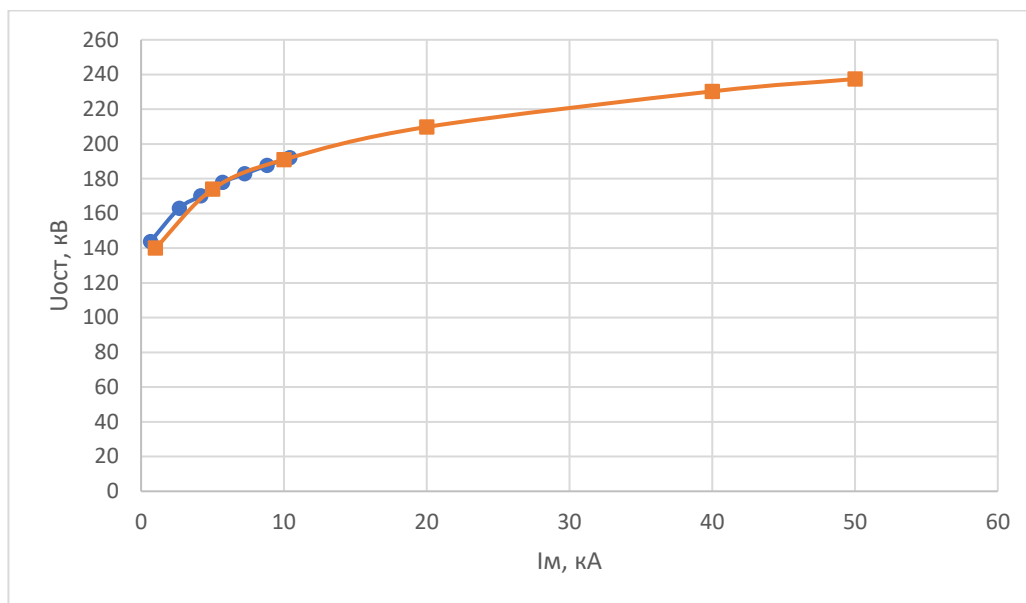


Рис. 2.6 — ВАХ по выражению (2.4), — ВАХ по экспериментальным данным

По рисунку 2.6 видно, что вольт-амперные характеристики немного расходятся только при малых токах, что говорит о достаточной точности проведенных расчетов.

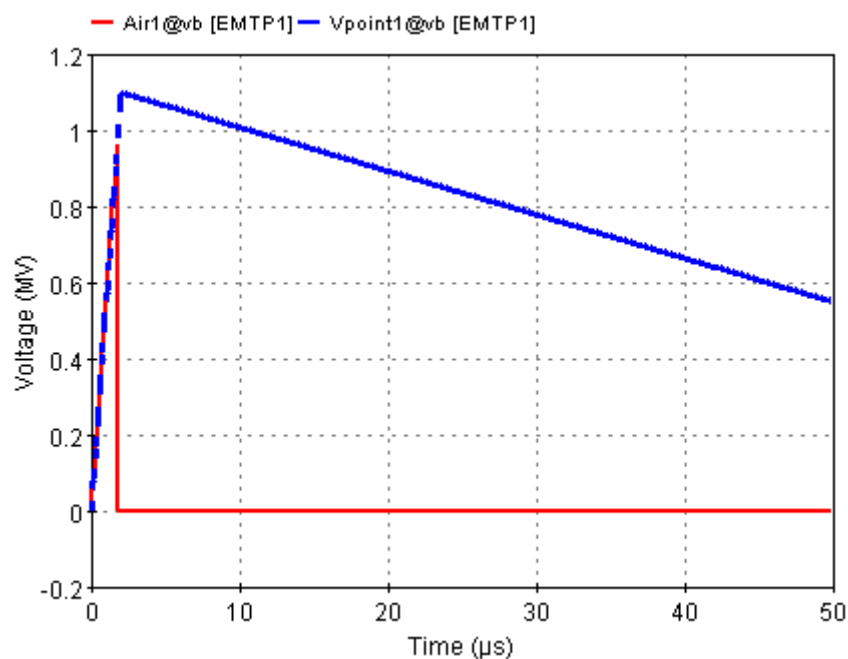
2.4.3 Вольт-секундная характеристика линейного разрядника

Для обеспечения успешной работы ЛР, его ВСХ должна лежать ниже ВСХ линейной изоляции. Это необходимо для соблюдения условия опережающего срабатывания аппарата. Интервал координации должен составлять не менее 10-20%.

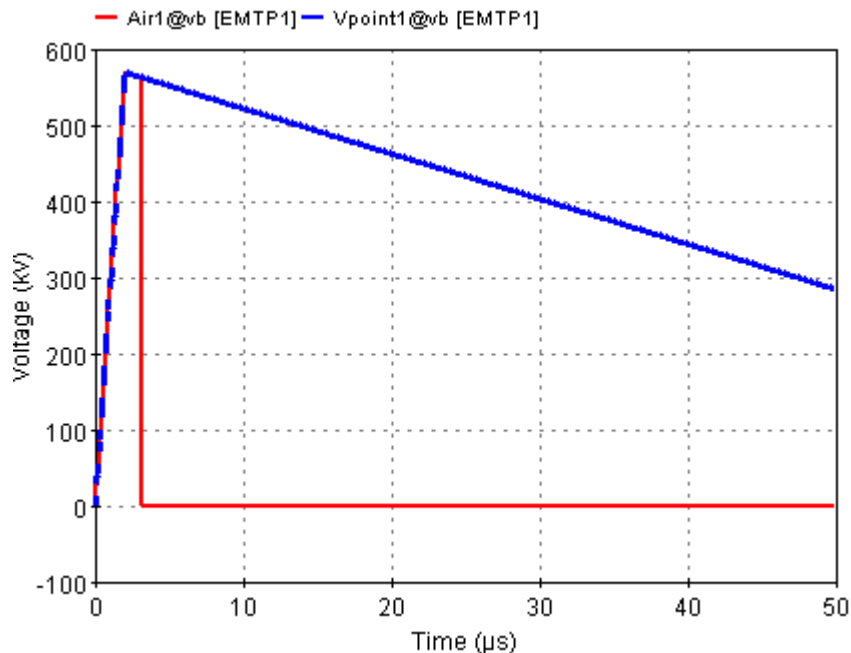
Построение модели ВСХ разрядника в EMTPWorks осуществляется аналогично ВСХ линейной изоляции, которое описано в параграфе 2.2. Для получения вольт-секундной характеристики ЛР нужно изменить коэффициенты в интегральном уравнении (2.1). Наиболее серьезное влияние оказывает начальное критическое напряжение U_0 , с учетом его понижения на 20 % $U_0 = 413,3$ кВ.

В качестве примера проведем испытания, аналогичные описанным в параграфе 2.2. Импульс напряжения с амплитудой 1100 кВ и длиной фронта 2 мкс, затем 570 кВ с такой же длиной фронта. На рисунке 2.7 приведены

осциллограммы напряжения источника и воздушного промежутка (цифры 4 и 1 на рис. 2.2 соответственно).



а) Перекрытие на фронте при $t = 1,75$ мкс



б) Перекрытие на хвосте при $t = 3,175$ мкс

Рис. 2.7 Перекрытие внешнего искрового промежутка ЛР

Сравним полученные результаты с данными из параграфа 2.2. При воздействии аналогичного импульса перекрытие линейной изоляции происходило при

временах $t = 1,85$ мкс при амплитуде напряжения 1100 кВ (см. рис. 2.3 (а)) и $t = 6,55$ мкс при амплитуде напряжения 570 кВ (см. рис. 2.3 (б)). Таким образом наглядно видно выполнение условия опережающего срабатывания разрядника.

3. АНАЛИЗ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В ОПОРУ ИЛИ В ТРОС ВБЛИЗИ ОПОРЫ ВЛ 110 кВ

3.1 Расчетная модель

В качестве расчетной модели для анализа грозовых перенапряжений используется участок двухцепной линии с тросом, состоящий из трех опор П110-4В с двумя пролетами по 300 метров. В качестве допущения не была учтена индуктивная связь между каналом молнии и опорой, что занижает получаемые перенапряжения. На удаленном расстоянии в 15 километров, по отношению к первой опоре, к линии присоединен источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Линия является холостой. Блок-схема расчетной цепи изображена на рисунке 3.1. Удар молнии воспроизводится при помощи источника косоугольного импульса тока, подключенного к опоре 2.

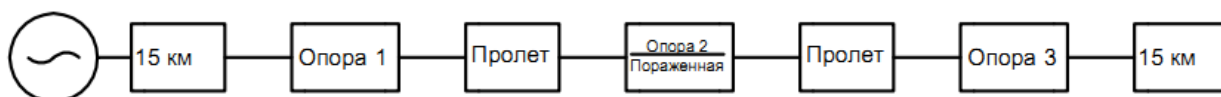


Рис. 3.1 Блок-схема расчетной модели ВЛ

На рисунке 3.2 представлена схема замещения опоры для расчета перенапряжений в EMTPWorks с подключенными ЛР и источник молнии.

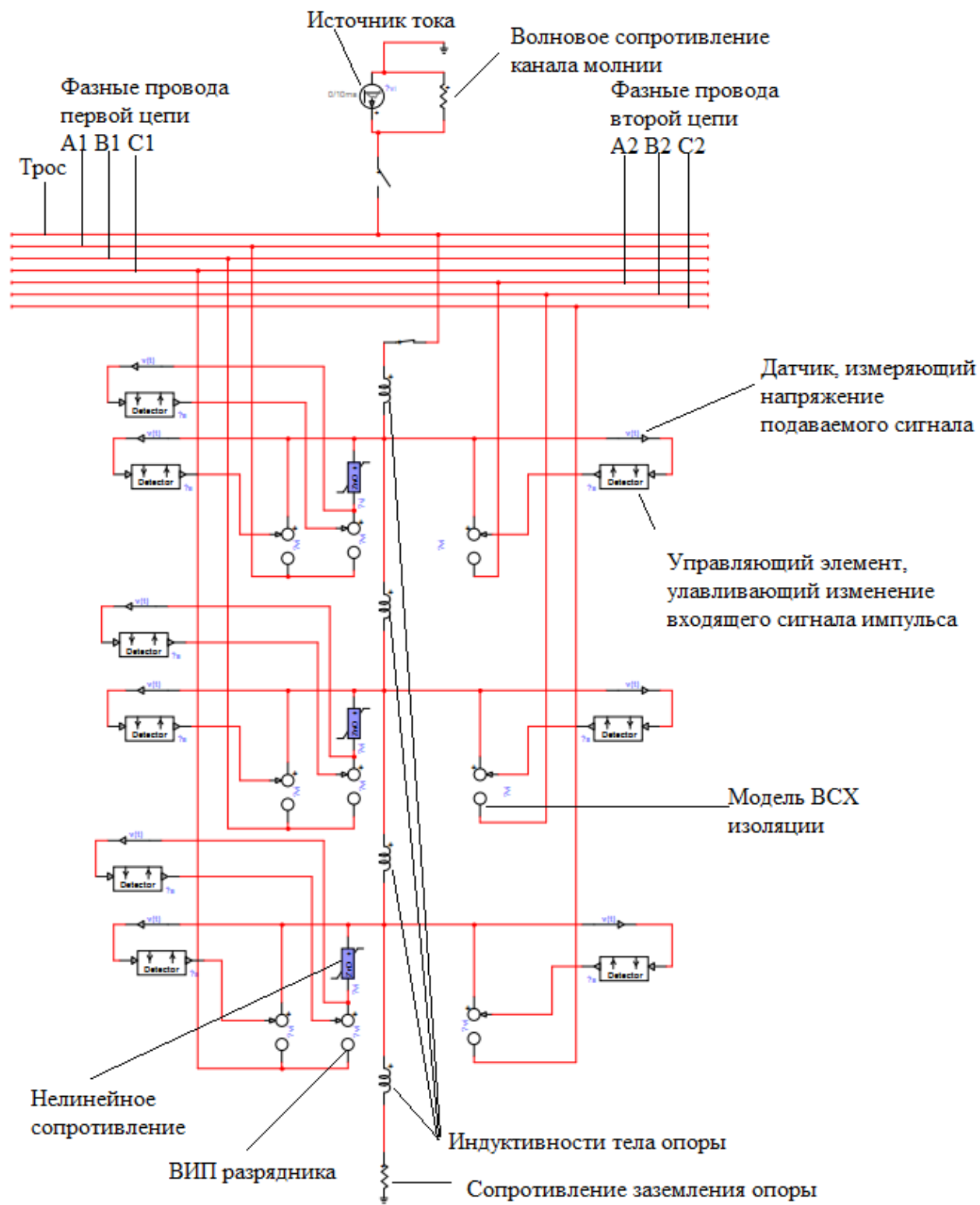
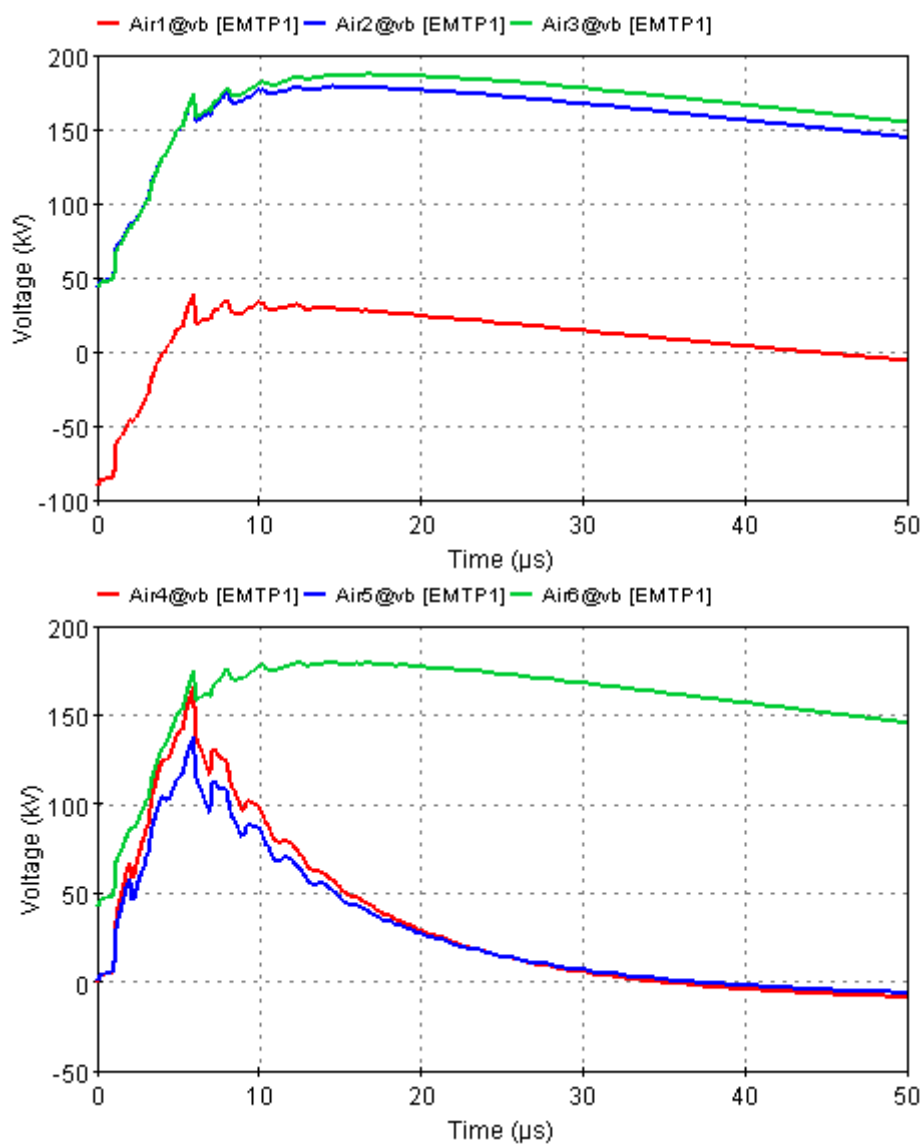


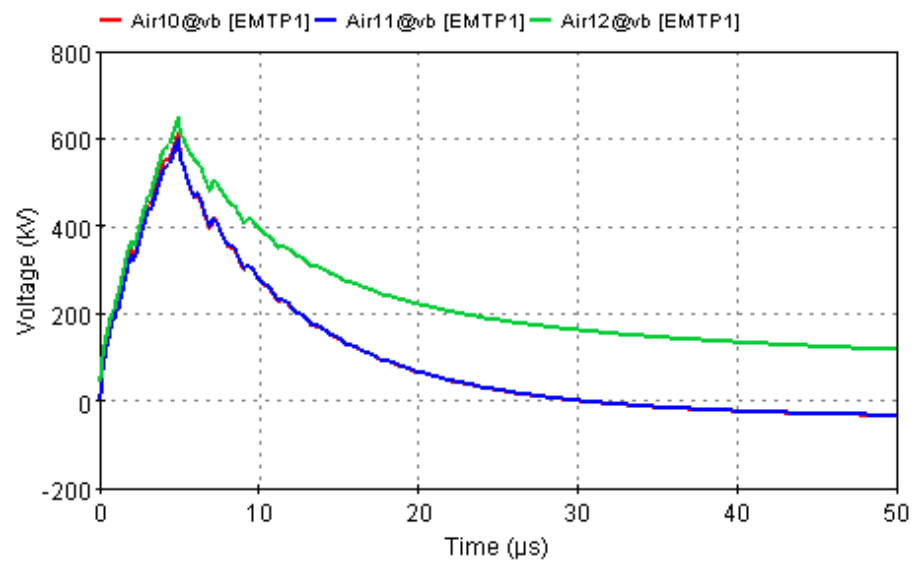
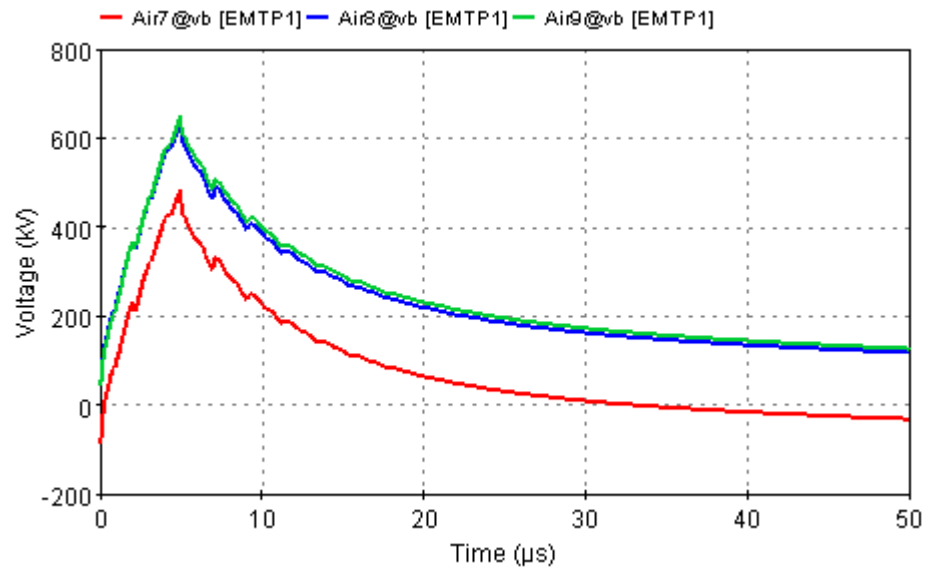
Рис. 3.2 Схема замещения опоры для расчета перенапряжений

3.2 Расчет перенапряжений при ударе молнии в опору без установки ЛР на фазах

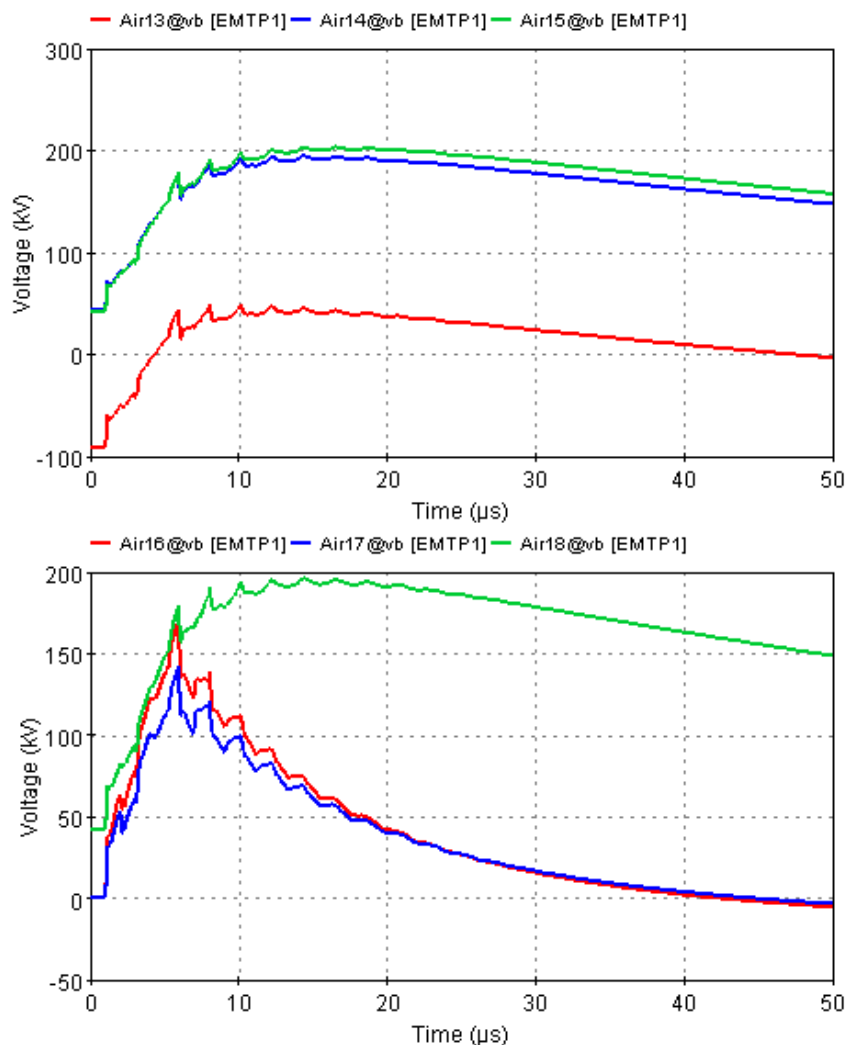
На рисунке 3.2 представлены осциллограммы падения напряжения на изолирующих подвесках при токе молнии 30 кА с длиной фронта 5 мкс. Сопротивление каждой опоры 30 Ом. Напряжение на изолирующей подвеске считается как разность потенциалов на опоре и фазном проводе. Как видно из рис. 3.2 наибольшее падение напряжения возникает на гирлянде нижней фазы С пораженной молнией опоры 2. Максимальное напряжение доходит до 649,675 кВ.



а) Падение напряжения на изоляторах опоры 1



б) Падение напряжения на изоляторах опоры 2



в) Падение напряжения на изоляторах опоры 3

А, В, С – верхняя, средняя и нижняя фазы соответственно

Рис. 3.2 Падение напряжения на изолирующей подвеске при ударе молнии в опору ($I_M = 30$ кА, длина фронта 5 мкс)

На опорах 1 и 3 максимальное падение напряжения также происходит на нижних фазах, но их значения приблизительно в три раза меньше, чем на пораженной опоре 2 и достигают около 200 кВ.

Будем повышать амплитуду тока молнии до первого перекрытия линейной изоляции, сохраняя фронт и сопротивление опор неизменными. На рисунке 3.3 изображена осциллограмма падения напряжения на изоляции опоры 2.

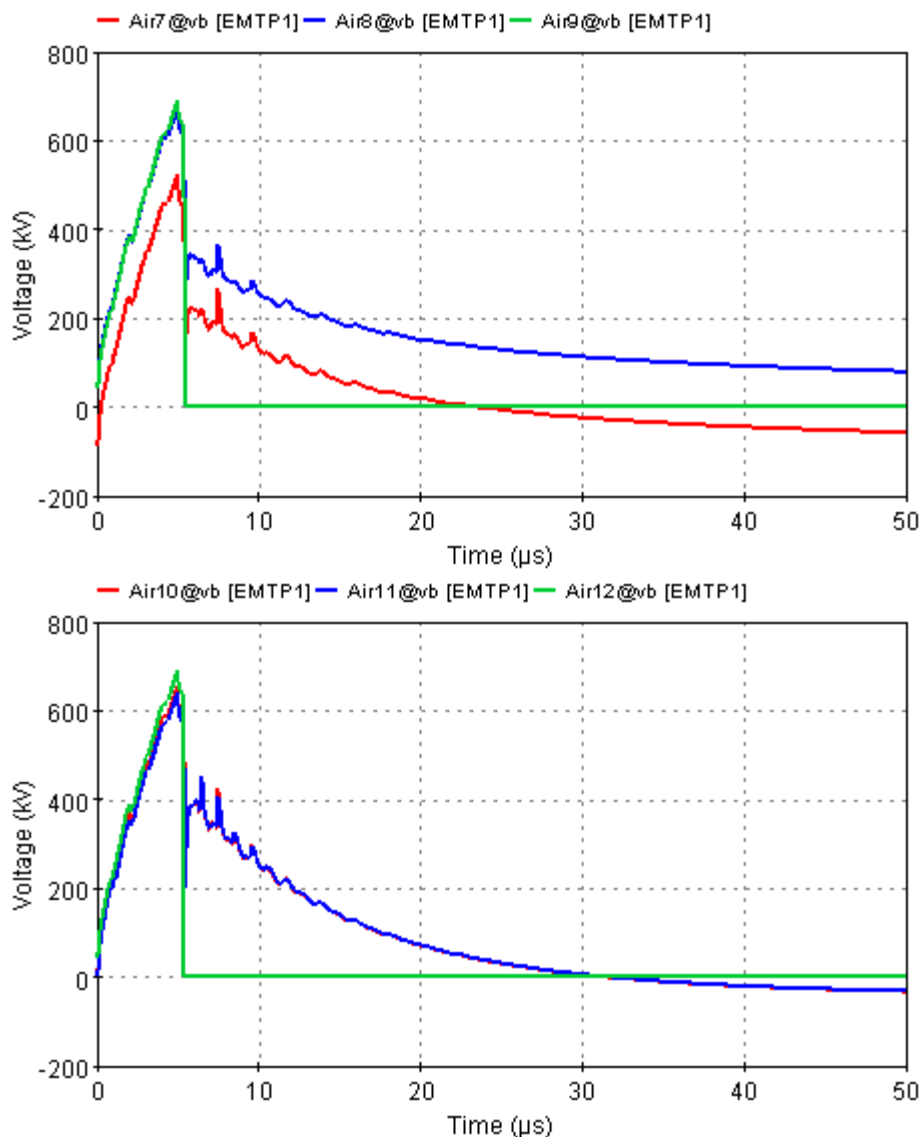


Рис. 3.3 Падение напряжения на изоляторах опоры 2 при ударе молнии в опору с амплитудой тока 32 кА

Как видно из рис. 3.3 на гирляндах нижних фаз обеих цепей напряжение упало до нуля в момент времени $t = 5,42$ мкс. Таким образом произошло двух-цепное перекрытие практически на амплитуде импульса.

После серии расчетов была получена таблица 3.1 в которой представлены минимальные амплитуды токов молнии, при которых происходят перекрытия изолирующей подвески. Расчеты проведены при разных фронтах импульса тока молнии (1, 5, 10 мкс) и сопротивлениях заземления опор (30, 50 и 100 Ом). Вероятность, с которой ток молнии достигнет необходимого для перекрытия

значения, вычисляется по формуле (1.2) с использованием данных из таблицы (1.1) для ВЛ с опорами высотой 25-45 метров.

Таблица 3.1

Минимальные амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески

R, Ом	τ_{ϕ} , мкс	I_M , кА	$P(I \geq I_M)$
30	1	26	0,54
	5	32	0,428
	10	36	0,367
50	1	18	0,726
	5	22	0,628
	10	28	0,5
100	1	12	0,875
	5	15	0,802
	10	19	0,701

На рисунке 3.4 изображены зависимости минимальной амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески от длины фронта импульса тока молнии.

С увеличением длины фронта амплитуда тока молнии, необходимая для перекрытия, возрастает, так как крутизна нарастания тока молнии заметно уменьшается. С возрастанием сопротивления заземления наблюдается заметное уменьшение амплитуды тока, при которой происходит пробой изоляции. Это непосредственно связано с увеличением вероятности обратных перекрытий с опоры на фазный провод при больших удельных сопротивлениях грунтов.

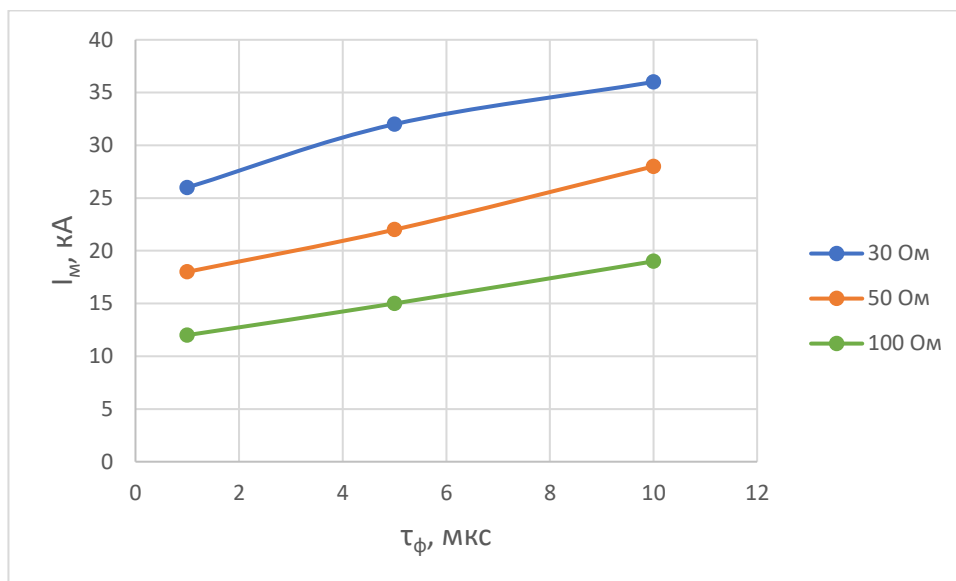
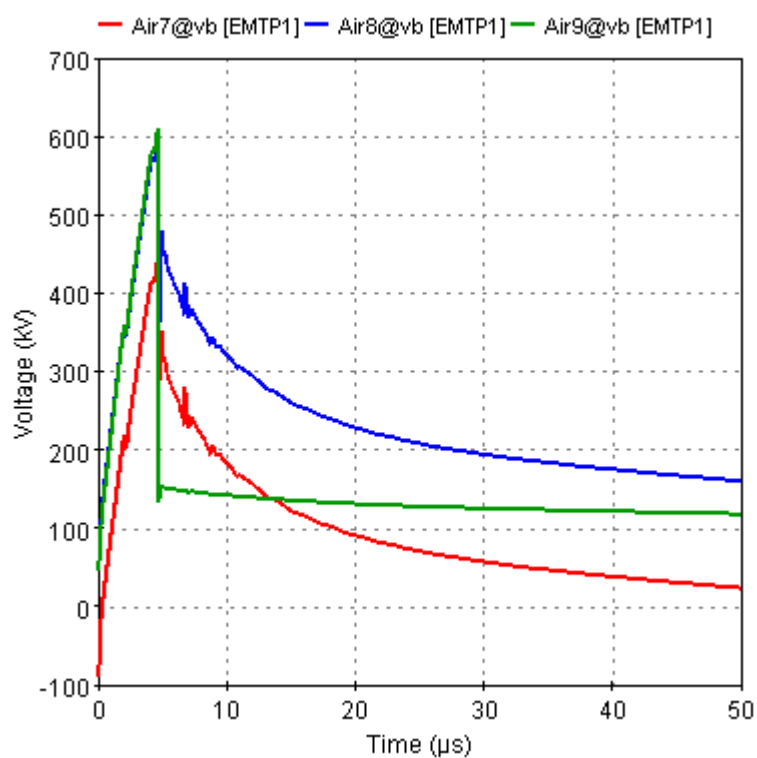


Рис. 3.4 Зависимости минимальной амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески от длины фронта импульса тока молнии

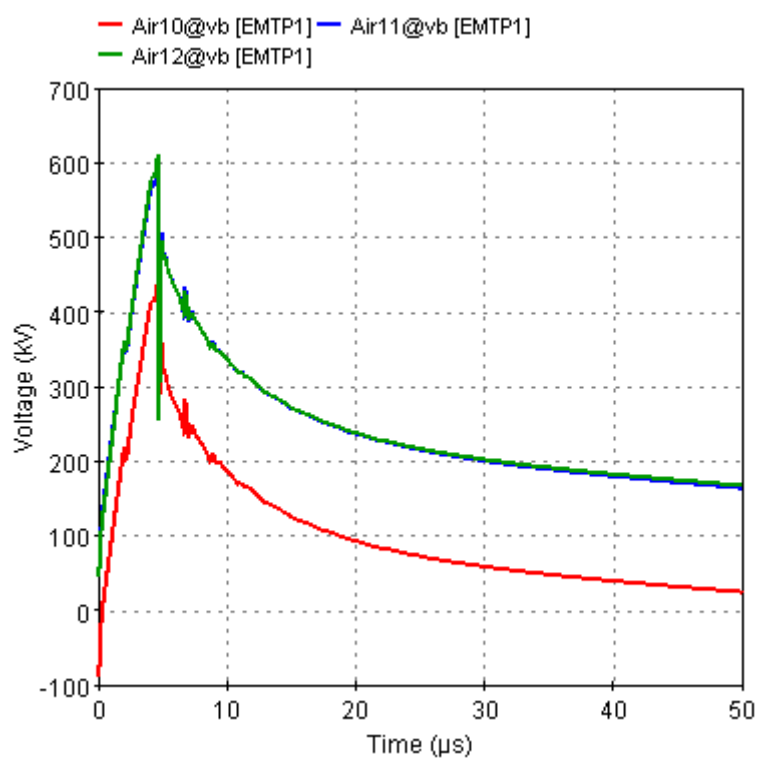
3.3 Расчет перенапряжений при ударе молнии в опору с установкой ЛР на всех фазах одной цепи

Установка ЛР на всех фазах одной цепи позволяет обеспечить надежную защиту хотя бы одной цепи и избежать отключения сразу двух ВЛ. ЛР дает гарантированную защиту изоляции только на той опоре и фазе, где он установлен. На рисунке 3.5 представлены осциллограммы падения напряжения на изолирующих подвесках опоры 2 при токе молнии 30 кА с длиной фронта 5 мкс. Сопротивление каждой опоры 30 Ом. Таким образом условия воздействия аналогичны условиям на рис. 3.2.

Согласно рис. 3.5 максимальное напряжение возникает на нижних фазах С и в момент времени $t = 4,7$ мкс достигает 610,7 кВ. Затем наблюдается резкая просадка напряжения на фазах С как первой (напряжение падает до 132,9 кВ), так и второй цепи (254,4 кВ). Это непосредственно связано со срабатыванием ЛР, установленного на фазе С первой цепи, напряжение на ВИП которого представлено на рисунке 3.6.



а) Цепь с установленными на всех фазах ЛР



б) Цепь без ЛР

Рис. 3.5 Падение напряжения на изоляторах опоры 2 при ударе молнии в опору с амплитудой тока 30 кА

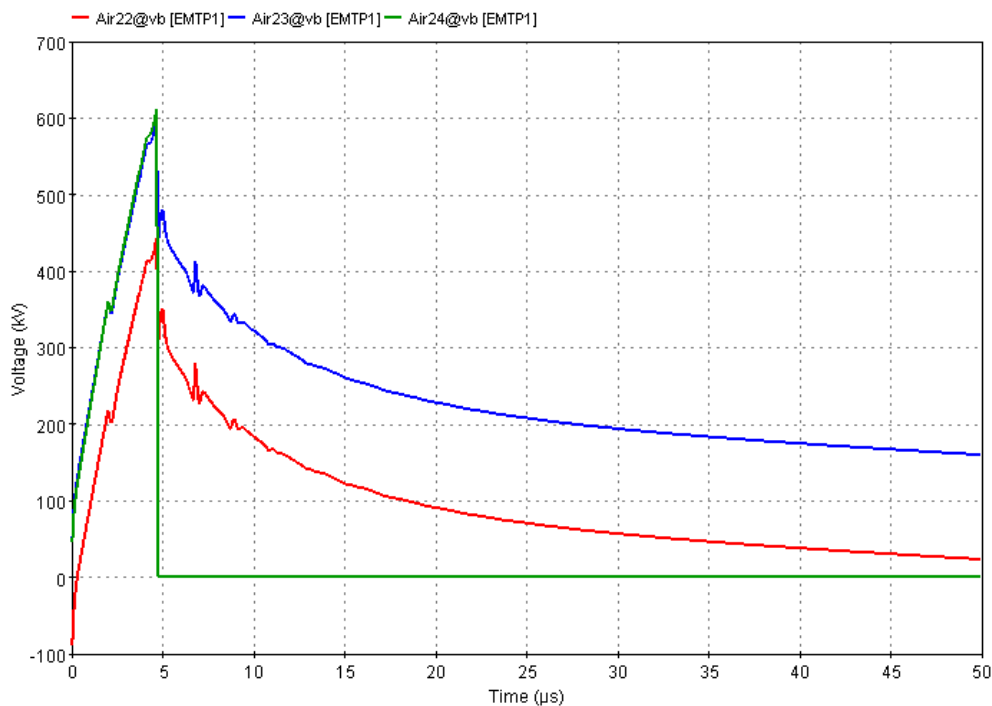


Рис. 3.6 Напряжение на ВИП ЛР на опоре 2 при токе молнии 30 кА

Из рис. 3.6 видно, что поначалу напряжение на искровом промежутке возрастает аналогично напряжению на подвеске, но в момент времени $t = 4,71$ мкс напряжение падает до нуля – произошло перекрытие ВИП.

Из параграфа 3.2 известно, что при фронте грозового импульса 5 мкс и сопротивлении заземления 30 Ом перекрытие изоляции происходит при токе молнии 32 кА (см. рис. 3.3). На рисунке 3.7 приведено аналогичное воздействие на ВЛ с установленными ЛР. По осциллограммам на рис. 3.7 не наблюдается перекрытия изоляции, процесс аналогичен изображенному на рис. 3.5. Таким образом, с помощью линейного разрядника была защищена не только нижняя фаза, на которой установлен ЛР, но и нижняя фаза соседней цепи, предотвращено отключение сразу двух воздушных линий. Можно сделать вывод, что несмотря на то, что ЛР гарантировано защищает только цепь, где он установлен, аппарат оказывает положительное влияние и на соседнюю цепь, так как через ЛР отводится часть энергии, которая в случае его отсутствия прошла бы по второй цепи и привела к ее перекрытию.

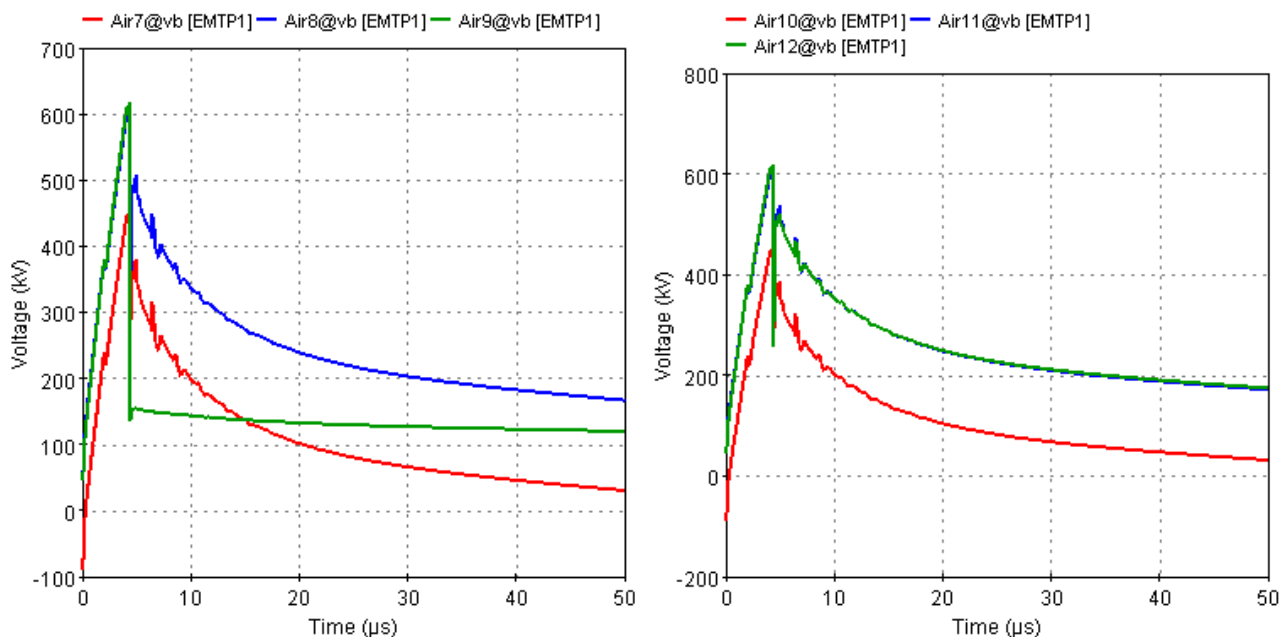


Рис. 3.7 Падение напряжения на изоляторах опоры 2 при ударе молнии в опору с амплитудой тока 32 кА

После серии расчетов была получена таблица 3.2. В ней представлены минимальные амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески, несмотря на защиту одной цепи ЛР. Расчеты проведены при разных фронтах импульса тока молнии (1, 5, 10 мкс) и сопротивлениях заземления опор (30, 50 и 100 Ом). Вероятности рассчитываются аналогично по формуле (1.2).

Таблица 3.2

Минимальные амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески с установкой ЛР на всех фазах одной цепи

R, Ом	τ_{ϕ} , мкс	I_M , кА	$P(I \geq I_M)$
30	1	47	0,241
	5	48	0,232
	10	54	0,186
50	1	35	0,381
	5	35	0,381
	10	40	0,314
100	1	22	0,628
	5	23	0,605
	10	27	0,52

На рисунке 3.8 изображены зависимости минимальной амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески, от длины фронта импульса тока молнии, как для ВЛ без ЛР, так и для полной защиты одной цепи.

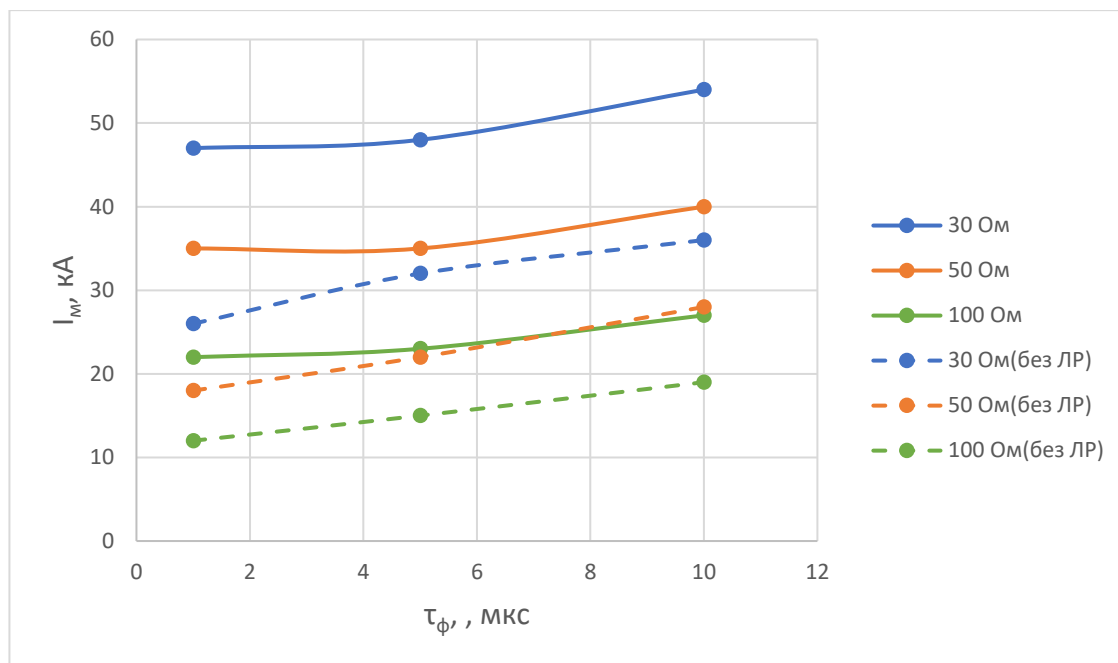


Рис. 3.8 Зависимости минимальной амплитуды токов молнии, при которых происходит перекрытие изолирующей подвески от длины фронта импульса тока молнии

По рис. 3.8 наглядно можно наблюдать положительное влияние ЛР на надежность работы ВЛ. В проведенных расчетах вероятность появления тока молнии, достаточного для перекрытия, в среднем уменьшилась в 1,7 раз после установки ЛР на трех фазах одной цепи. Анализируя результаты (см. табл. 3.1 и 3.2) можно заключить, что с увеличением сопротивления заземления установка ЛР становится менее эффективной. Так при $R=30$ Ом вероятность появления необходимого для перекрытия тока молнии в среднем уменьшилась в 2 раза, при $R=50$ Ом – в 1,72 раз, при $R=100$ Ом – в 1,36 раз.

При резком нарастании тока молнии (фронт 1 мкс) эффективность ЛР несколько выше, чем при плавном нарастании тока т.е. для малых фронтов вероятность появления тока, необходимого для перекрытия, при установке ЛР снижается больше.

3.4 Влияние фазного напряжения на импульсную прочность линейной изоляции при грозовых перенапряжениях

Выше уже упоминалось, что напряжение на изолирующей подвеске определяется как разность потенциалов на опоре и фазном проводе. Рассмотрим влияние рабочего фазного напряжения на импульсную прочность изоляции. Расчеты в параграфах 3.2 и 3.3 производились при фазовом угле $\theta = 0^\circ$ для фазы А, $\theta = -120^\circ$ для фазы В и $\theta = 120^\circ$ для фазы С. Оба источника включались одновременно. В этом случае наибольшие перенапряжения при ударе молнии в опору возникали на нижних фазах С (см. рис. 3.2), перекрытие также происходило на нижних фазах (см. рис. 3.3). Изменим фазовый угол: $\theta = 180^\circ$ для фазы А, $\theta = 60^\circ$ для фазы В и $\theta = 300^\circ$ для фазы С. На рисунке 3.9 представлены осциллограммы падения напряжения на опоре 2 при токе молнии 32 кА и длине фронта 5 мкс, сопротивление заземления опор 30 Ом (воздействие аналогично изображенному на рис. 3.3).

По рис. 3.9 видно, что наибольшие падения напряжения, как на правой, так и на левой цепи, происходят на верхних фазах А и достигают значений 704,8 кВ и 652,8 кВ соответственно. На нижних фазах С максимальные напряжения составляют 603,1 кВ и 604,4 кВ. При токе молнии 32 кА на рис. 3.3 наблюдалось двухцепное перекрытие на нижних фазах. После изменения фазового угла при токе 32 кА наблюдается уже одноцепное перекрытие на верхней фазе (см. рис. 3.9). Таким образом при изменении угла θ удалось избежать отключения сразу двух воздушных линий.

Проведем серию расчетов перенапряжений, изменяя угол θ для одной из фаз от 0 до 360 градусов, с неизменным воздействием (ток молнии 32 кА, длина фронта 5 мкс, сопротивление заземления опор 30 Ом). Результаты сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

Различия последствий грозовых перенапряжений для ВЛ при изменении угла сдвига фаз рабочего напряжения

Интервал изменения фазного угла θ	Результат воздействия грозового перенапряжения на ВЛ
$0^\circ - 130^\circ$	перекрытие нижних фаз
$131^\circ - 224^\circ$	перекрытие верхней фазы
$225^\circ - 240^\circ$	перекрытия отсутствуют
$241^\circ - 360^\circ$	перекрытие средней фазы

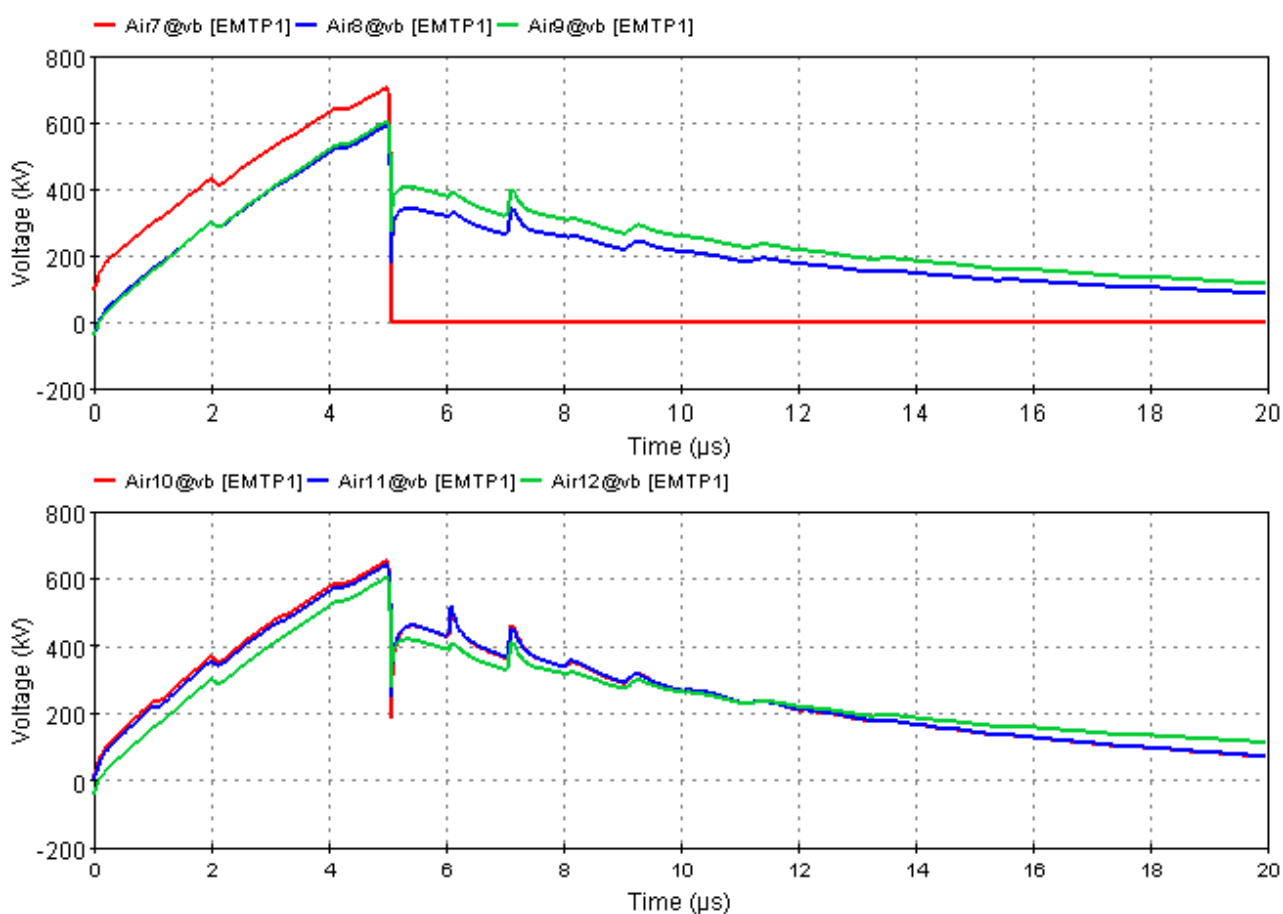


Рис. 3.9 Падение напряжения на изоляторах опоры 2 при ударе молнии в опору с амплитудой тока 32 кА

Расчеты показали, что величина фазного напряжения на проводе, в момент удара молнии в опору, оказывает непосредственное влияние на возникающие грозовые перенапряжения. Может сложиться как благоприятная ситуация, когда

отключения ВЛ не происходит, так и наоборот, в неудачный момент тот же самый импульс тока молнии приводит к двухцепным перекрытиям.

3.5 Расчеты перенапряжений при различных параметрах импульса

Для оценки влияния параметров импульса тока молнии и сопротивления заземления опор на импульсную прочность линейной изоляции и эффективности применения ЛР в качестве защиты ВЛ от грозовых перенапряжений были произведены расчеты, результаты которых сведены в таблицу 3.4. Всего в расчетной схеме было установлено 18 изолирующих подвесок и 9 ЛР, в табл. 3.4 приводится процент от общего числа гирлянд изоляторов или ЛР, на которых произошло перекрытие при данных условиях.

Статистика из таблицы 3.4 подтверждает, что установка ЛР на все три фазы одной цепи не дает абсолютной защиты. Изоляция незащищенной цепи может выдерживать только воздействия около 30 кА, но при высоком сопротивлении заземления эта цифра становится еще ниже. Цепь с установленными разрядниками выходит из строя только при очень больших амплитудах тока молнии (100 и 200 кА) с резкой крутизной нарастания тока (фронты около 1 мкс). Согласно рис. 1.1 вероятность появления тока молнии с амплитудой 100 кА и более составляет меньше 5%. Сопротивление заземления также оказывает влияние на надежную работу ЛР. Так при сопротивлении заземления 30 Ом даже при воздействии в 100 кА перекрытия происходят только на незащищенной цепи.

Таблица 3.4

Сопротивление заземления, Ом	Амплитуда тока молнии, кА	Длина фронта, мкс	Сработавшие ЛР, %	Перекрытых изоляторов, %	Перекрытий гирлянд без установки ЛР, %
30	30	1	22,2	0,0	5,6
		5	22,2	0,0	0,0
		10	11,1	0,0	0,0
	50	1	77,8	5,6	5,6
		5	22,2	5,6	11,1
		10	22,2	0,0	11,1
	100	1	100,0	38,9	38,9
		5	100,0	33,3	33,3
		10	55,6	27,8	22,2
	200	1	88,9	55,6	94,4
		5	100,0	50,0	77,8
		10	100,0	38,9	50,0
50	30	1	33,3	0,0	5,6
		5	22,2	0,0	5,6
		10	22,2	0,0	5,6
	50	1	77,8	22,2	22,2
		5	22,2	22,2	11,1
		10	22,2	5,6	11,1
	100	1	77,8	55,6	66,7
		5	77,8	38,9	44,4
		10	33,3	22,2	27,8
	200	1	100,0	66,7	94,4
		5	100,0	50,0	72,2
		10	77,8	38,9	61,1
100	30	1	55,6	11,1	22,2
		5	22,2	11,1	11,1
		10	22,2	5,6	5,6
	50	1	33,3	38,9	44,4
		5	33,3	27,8	22,2
		10	22,2	11,1	16,7
	100	1	77,8	38,9	77,8
		5	77,8	27,8	66,7
		10	33,3	27,8	33,3
	200	1	100,0	72,2	100,0
		5	100,0	50,0	72,2
		10	77,8	27,8	66,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проведены исследования молниезащиты воздушной линии 110 кВ с применением грозозащитного троса и ОПН с внешним искровым промежутком. Для этого использовались экспериментальные данные и расчеты, произведенные с помощью программных комплексов EMTPWorks и ATPDraw.

В программном комплексе EMTPWorks создана расчетная схема двухцепной воздушной линии с грозозащитным тросом, в которую входят модели опоры, линейной изоляции и линейных разрядников. Канал молнии замещался источником тока с эквивалентным волновым сопротивлением. Для расчетов использовалась косоугольная модель импульса тока молнии.

При помощи созданной схемы имитировался удар молнии в опору или трос вблизи опоры. В этом случае наибольшую опасность представляют обратные перекрытия с заземленных частей на изоляцию ВЛ. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Расчеты показали, что количество обратных перекрытий напрямую зависит от сопротивления заземления опор. В связи с этим в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов рекомендуется применять дополнительные средства защиты ВЛ. Применение ОПН с внешним искровым промежутком обосновано для повышения грозоупорности ВЛ 110 кВ в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов.

2. В работе рассматривалась установка линейных разрядников на все три фазы одной цепи. Результатом стало повышение эффективности молниезащиты двухцепной ВЛ 110 кВ:

- для сопротивления заземления опоры 30 Ом вероятность появления тока молнии, достаточного для перекрытия, снижается в 2 раза;
- для сопротивления заземления опоры 50 Ом вероятность появления тока молнии, достаточного для перекрытия, снижается в 1,72 раз;

- для сопротивления заземления опоры 100 Ом вероятность появления тока молнии, достаточного для перекрытия, снижается в 1,36 раз;
- перекрытия на защищенной цепи могут произойти только при токах молнии более 100 кА, вероятность появления которых составляет 5% и менее.

3. Обзорно был затронут вопрос о влиянии рабочего фазного напряжения на импульсную электрическую прочность линейной изоляции при грозовых перенапряжениях. В ходе расчетов было установлено, что при разном фазовом угле воздействие одного и того же импульса тока молнии может привести к противоположным результатам.

Построенная схема позволяет воссоздать процесс перекрытия линейной изоляции опор при ударе молнии в верхушку опоры или трос. Для более точного расчета молниезащиты ВЛ в дальнейшем в схему нужно ввести ряд усовершенствований. Необходимо учесть и смоделировать взаимную индуктивную связь между каналом молнии и опорой, корону на проводах, потери в грунте и проводах. В целом эти процессы оказывают разнонаправленное влияние, но в определенных ситуациях могут быть решающими.

Таким образом, при проектировании новых или реконструкции старых ВЛ должна рассматриваться возможность и экономическая целесообразность применения защитных аппаратов, как в сочетании с грозозащитным тросом, так и без него.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. / Под научной ред. Н.Н. Тиходеева. – СПб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
- 2 Гумерова Н. И. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения: учеб. пособие / Н. И. Гумерова, А. В. Колычев, Ф. Х. Халилов. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2011. -369 с.
- 3 Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов/ Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
- 4 Техника высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иманов и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
- 5 Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Минэнерго СССР. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 928 с.
- 6 Гайворонский А.С, Заболотников А.П. Технологии грозозащиты ВЛ высших классов напряжения на основе применения линейных ОПН и разрядников с внешним искровым промежутком. Труды IV Международной конференции по молниезащите. Санкт-Петербург, 2014.

Приложение. Линейные разрядники класса напряжения 110 кВ

№ п.п	Наименование характеристики	Значение
1	Номинальное напряжение сети, кВ	110
2	Номинальная частота, Гц	50
3	Способ заземления нейтрали	эффективно заземленная
Номинальные параметры и характеристики РВЛ		
4	Номинальный разрядный ток, кА	10
5	Класс пропускной способности (по ГОСТ 52725)	2
6	Номинальное напряжение РВЛ, кВ	75
7	Классификационное напряжение РВЛ при классификационном токе 2 мА, кВ, не менее	70
8	Остающееся напряжение, кВ, не более, при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс амплитудой: - 250 А; - 500 А; - 1000 А.	135 140 145
9	Остающееся напряжение, кВ, не более, при грозовом импульсе тока 8/20 мкс амплитудой: - 5 кА; - 10 кА; - 20 кА.	170 180 205
10	Остающееся напряжение кВ, не более при импульсе тока с крутым фронтом 1/20 мкс амплитудой 10 кА	190
11	Удельная энергоемкость при воздействии одного прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс амплитудой не менее 680 А (по ГОСТ 52725), кДж/кВ $U_{нр}$, не менее	3,7
12	Амплитуда импульс тока большой длительности 2000 мкс (ток пропускной способности), А	680
13	Амплитуда грозового импульса тока синусоидальной формы длительностью 210 мкс, кА	9,2
14	Амплитуда импульса большого тока 4/10 мкс, кА	100
15	Среднее разрядное напряжение промышленной частоты в сухом состоянии и под дождем, кВ, не менее	200
16	Пятидесятипроцентное разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности, кВ, не более	450
17	Разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности при времени до разряда 1 мкс, кВ, не более	950