

УДК 621.311

**МОЛНИЕЗАЩИТА КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
LIGHTNING PROTECTION OF COMPACT TRANSMISSION LINES**

Д.С. Лялюк, А.И. Мисюля

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

D. Lyalyuk, A. Misyulya

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: *определение молниезащиты компактных линий электропередач. Представлены компьютерные модели опор, грозозащитных тросов и проводников, системы заземления. Анализ чувствительности относительно формы волны тока молнии, места удара, удельного сопротивления земли, типа опоры и рельефа местности.*

Abstract: *determination of the lightning performance of compact transmission lines is described. Computer models of towers, ground wires and conductors, and the earthing system are presented. Computer simulations include a sensitivity analysis relative to the waveform of the lightning current, stroke location, earth resistivity, type of tower and terrain profile.*

Ключевые слова: *грозовые переходные процессы, компактные линии электропередач, моделирование EMTP.*

Keywords: *Lightning Transients, Compact Transmission Lines, EMTP Modeling.*

Введение

Были проведены технико-экономические исследования для определения затрат и экономических ограничений, связанных с проектом. Одним из следствий этих исследований было то, что использование компактных линий электропередач дадут несколько преимуществ, в том числе, более длительные периоды времени между обновлениями, сокращение параллельной и последовательной реактивной компенсации, а также увеличение пропускной способности существующих линий.

Недавно в нескольких странах был введен в эксплуатацию новый тип компактной линии передачи, названный линией передачи с высоким импульсным сопротивлением (HSIL), с более высоким уровнем компактности. HSIL – это новая концепция проектирования линий электропередач, поскольку она использует комбинацию таких функций, как сокращение расстояния между проводниками, принадлежащими к разным фазам, и увеличение как количества, так и относительных расстояний между подпроводниками одной фазы. Целью данной работы является анализ производительности молнии компактных линий, включая линии HSIL.

Основная часть

Исследования, связанные с влиянием ударов молнии на линии электропередач, имеют принципиальное значение на этапе проектирования

опор, так как неправильный выбор электрических параметров опоры может привести к высокой частоте отключений.

В зависимости от расположения разряда относительно проводов, составляющих линию передачи, могут возникнуть две ситуации. Первая, называемая прямым ударом, происходит при прямом ударе по фазному проводу, что, в свою очередь, приводит к увеличению напряжения в этой фазе.

Вторая ситуация, называемая непрямым ударом, и возникает при попадании разряда в заземляющий провод. В отличие от первой ситуации, очень трудно полностью исключить отключения. В случае не прямых ударов в месте разряда генерируются бегущие волны напряжения и тока, которые затем распространяются по проводам, пока не достигнут соседних опор. Это, в свою очередь, приводит к возникновению отраженных волн. Если разница напряжений между проводником и опорой превышает изолирующую силу, происходит разряд. Это явление называется обратная вспышка.

Волна напряжения на мачте называется переходным напряжением на вершине мачты и зависит от тока молнии и связанной с ней формы волны, места удара и параметров линии передачи. Применительно к гирлянде изолятора она определяется как [1]:

$$V_s(t) = (1 - k)V_t + V_n(t), \quad (1)$$

где $V_s(t)$ - разность потенциалов между концами изолятора;

k - коэффициент связи между проводником и заземляющим проводом;

V_t - переходное максимальное напряжение на вершине опоры;

$V_n(t)$ – мгновенное напряжение на проводнике.

Используемый в данной работе подход к определению производительности компактных линий основан на электрогеометрической модели, которая учитывает тип молнии и образование проводящего канала в конце разряда. Схематическое изображение дистанции поражения относительно проводов ЛЭП показано на рисунке 1. Согласно этой модели, разряд возникает, когда концентрация электрического заряда облака превышает силу воздуха.

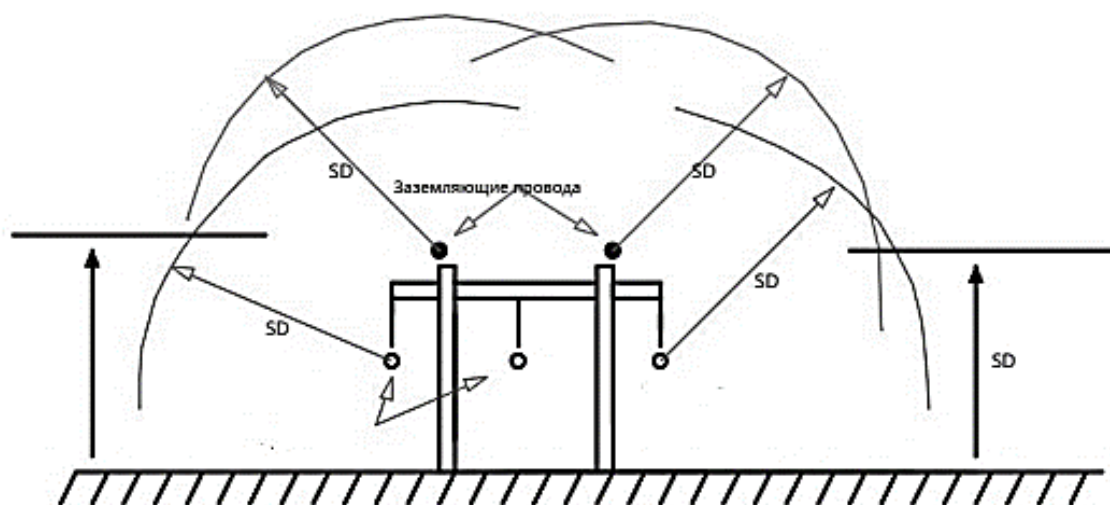


Рисунок 1 – Схематическое изображение дистанций удара относительно ЛЭП

Моделирование линии электропередачи. Элементы ЛЭП моделируются согласно рисунку 2, на котором показаны две принципиальные схемы с учетом сбросов, происходящих на опоре и в середине пролета, соответственно.

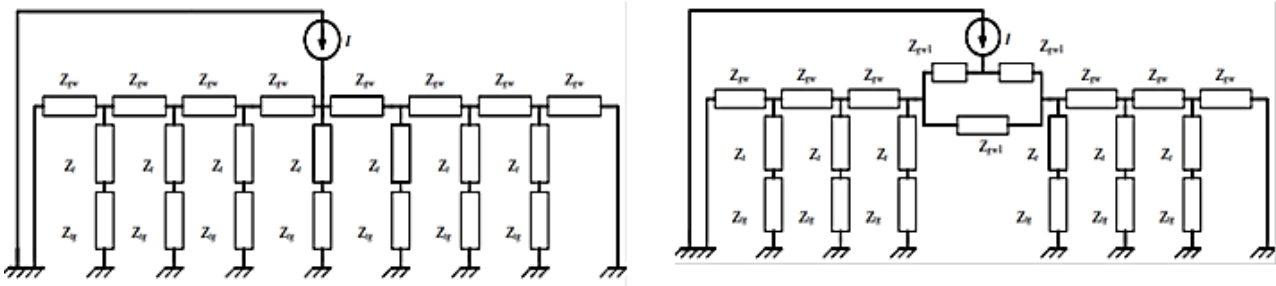


Рисунок 2 - Эквивалентные схемы для удара разряда молнии в башню или промежуточный пролет

Параметры, используемые для представления схем на рисунке 2, являются ток молнии I , эквивалентный перенапряжение заземляющего провода Z_{gw} , и заземляющий провод, опора и заземление опоры перенапряжения Z_{gw1} , Z_t и Z_{tg} соответственно. Стоит отметить, что $Z_{gw} = Z_{gw1}$, если на мачте имеется один заземляющий провод.

Моделирование земли башни. В эквивалентной схеме, когда единичное ступенчатое напряжение подается проводом под землей, представленный здесь проводом противовеса, показанного на рис.3, его импеданс изменяется во времени, согласно уравнению

$$Z_{tg}(t) = R_d + (Z_s - R_d) \frac{tv}{2l}, \quad (2)$$

где R_d и Z_s — значения Z_{tg} при $t \rightarrow \infty$ и при $t = 0$, соответственно. В уравнении v представляет текущую скорость волны на противовесе длиной l .

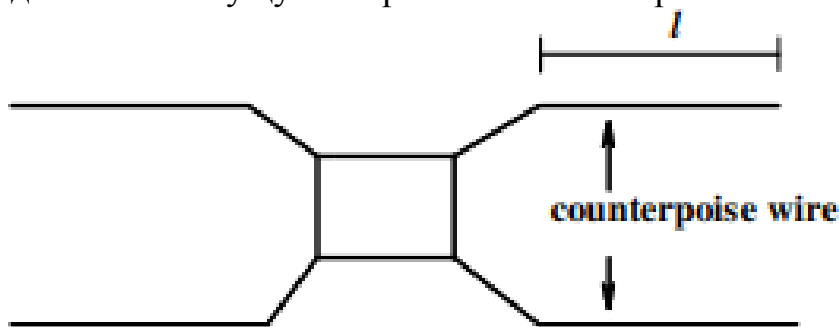


Рисунок 3 – Типовая конфигурация заземления ЛЭП

Параметр R_d получается из следующего выражения:

$$R_d = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{a} + \ln \frac{2l}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{l} + 0.645 \frac{s^2}{l^2} - 0.145 \frac{s^4}{l^4} \right), \quad (3)$$

где a - диаметр проволоки;

s - удвоенная глубина противовеса;

ρ – удельное сопротивление грунта.

Волна тока молнии. Две линейные функции используются для представления, текущей формы волны, как показано на рисунке 4. Параметр T_d – время, необходимое, для снижения амплитуды тока до половины своего максимального значения, T_f – время нарастания.

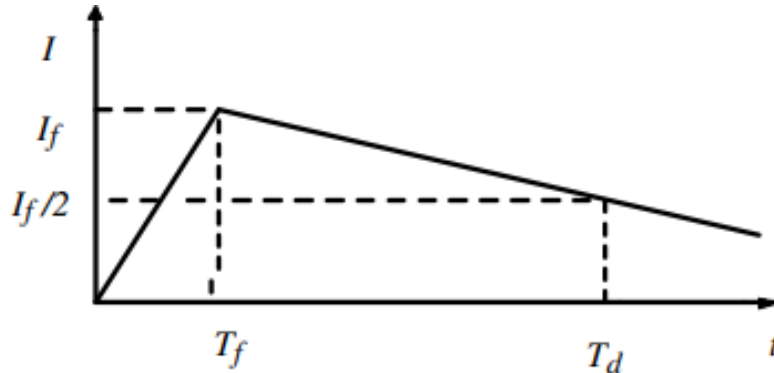
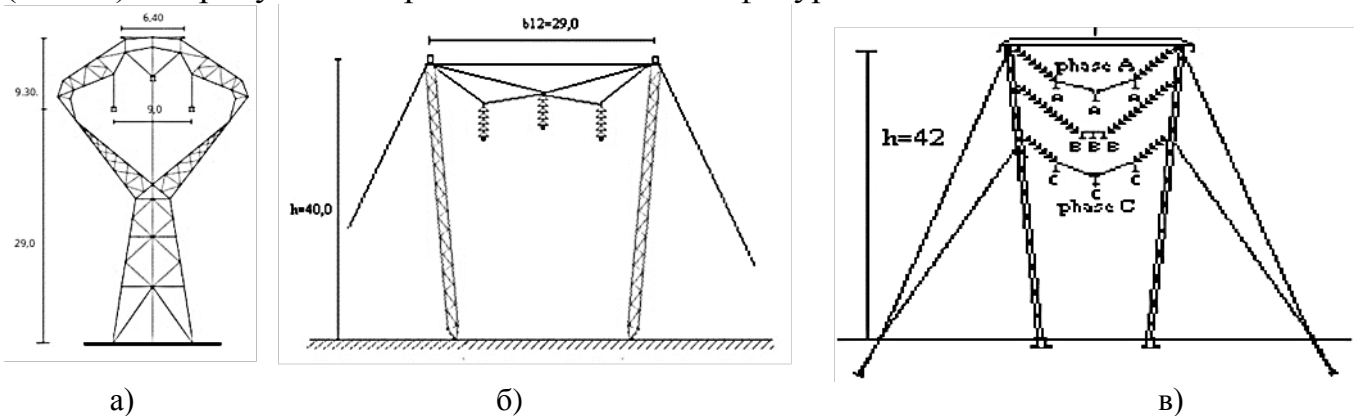


Рисунок 4 – Модельная функция, описывающая волну тока молнии

Экспериментальные наблюдения показывают, что параметры характеризующие ток молнии, обычно составляют $T_d \approx 50$ мкс и $T_f < 5$ мкс [2].

Были выбраны три типа компактных опор, а именно: самонесущие 500кВ (с одним и двумя грозозащитными тросами) и поперечная цепочка (500кВ) и HSIL (230кВ). На рисунках 5 представлены эти конфигурации башни.



а) самонесущая 500 кВ (один и два провода заземления), б) цепочка с поперечным сечением 500кВ, в) цепочка с поперечным сечением HSIL 230кВ

Рисунок 5 – Конфигурации опор линий электропередачи

Для представления волнового сопротивления опоры необходимо учитывать время распространения волны тока вдоль конструкции опоры для каждой из конфигураций, показанных на рисунке 5. Выражение для импульсного сопротивления простой модели можно записать в виде:

$$Z_t = 60(\ln(2h \frac{\sqrt{2}}{r}) - 1) \tag{4}$$

В таблице 1 приведены расчетные значения волнового сопротивления опоры, рассмотренные в данной работе.

Эквивалентное волновое сопротивление заземляющего провода определяется по формуле:

$$Z_{gw} = 60 \ln\left(\frac{2h_{gw}}{r_{eq}}\right), \quad (5)$$

где h_{gw} -средняя высота заземляющего троса;

r_{eq} –эквивалентный радиус комбинации заземляющих тросов.

Таблица 1 - Расчетные значения сопротивлений

Тип опоры	Z_t	Z_{gw}
Самонесущая (1 провод заземления)	173	557
Самонесущая (2 провода заземления)	176	345
Цепочка с поперечным канатом (230 кВ)	100	304

Перед определением молниезащиты для различных типов опор, исследованных в этой работе, переходное напряжение на вершине изучалось при фиксированном значении пикового разрядного тока. Расчеты проводились путем установки пикового тока молнии при 10 кА.

Пиковая амплитуда тока молнии была связана с накопленной функцией вероятности:

$$P(I_f \geq I) = \frac{1}{1 + (I / 25)^2}, \quad (5)$$

где I_f -пиковый ток;

I - независимая переменная, оба выражены в кА.

Параметр T_d был установлен на 50 мкс, и время нарастания T_f был выбран случайным образом из множества значения (1 мкс, 3 мкс и 5 мкс).

В исследованиях учитывались эффекты короны. В модели радиус кабеля должен быть скорректирован с помощью выражения

$$R_c = k_1 v + k_2 v + r, \quad (6)$$

где R_c это скорректированный радиус кабеля;

k_1 и k_2 –коэффициенты, зависящие от высоты кабеля, v -напряжение, r - радиус кабеля.

Заключение

Результаты, полученные в данной работе, можно обобщить согласно следующим выводам:

- переходное напряжение на вершине опоры зависит от вариаций волнового фронта тока молнии, удельного сопротивления грунта и типа опоры;
- исследования переходных процессов молний показывают, что необходимо создать подходящее моделирование системы заземления,

- а также включить изменение удельного сопротивления грунта в исследования характеристик молний;
- Важно учитывать тип рельефа местности при исследованиях молниезащиты линий электропередач;
 - использование самонесущих опор с одним заземляющим проводом также технически возможны, и их использование может снизить затраты на установку ЛЭП.

Литература

1. Молниезащита воздушных линий напряжением до 1000В [Электронный ресурс]/ zandz.com – Режим доступа: https://zandz.com/ru/biblioteka/molniezashchita_vozdushnykh_linii_napryazheniem_do_1000_v/– Дата доступа: 06.11.2022.
2. Компактные воздушные линии электропередачи [Электронный ресурс]/ stroitelstvo-new.ru – Режим доступа: <http://www.stroitelstvo-new.ru/elektromonter/kompaktnye-vozdushnye-linii-elektroperedachi.shtml>– Дата доступа: 06.11.2022.