

УДК 621.315.1

**Александр Михайлович Гулов**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», аспирант высшей школы высоковольтной энергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: algu1ov@yandex.ru

**Александр Валерьевич Колычев**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, доцент высшей школы высоковольтной энергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: alkoly4ev@yandex.ru

## **Исследование влияния импульсной короны на проводах ВЛ 110 кВ, грозозащитном тросе на энергетические характеристики линейных ОПН во время грозовых перенапряжений**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Импульсная корона имеет существенное влияние на расчеты молниезащиты воздушной линии. Эффектом импульсной короны при расчете переходного процесса во время удара молнии в ВЛ часто пренебрегают из-за сложности ее моделирования. Вопрос влияния импульсной короны на работу нелинейных ограничителей перенапряжения, устанавливаемых на ВЛ, недостаточно изучен. Целью исследования является оценка энергетических характеристик линейных ограничителей перенапряжения с учетом в расчетах импульсной короны на ВЛ.

**Материалы и методы.** Моделирование переходного процесса на ВЛ при ударе молнии в фазный провод (трос) проводится в программном комплексе EMTP-ATP. Среди базовых моделей в EMTP-ATP отсутствует модель импульсной короны, в связи с этим разрабатывается модель импульсной короны на проводах ВЛ при помощи динамических емкостей.

**Результаты.** Получена модель импульсной короны на проводах ВЛ, реализованная с помощью динамических емкостей. Произведены расчеты энергетических характеристик линейных ограничителей перенапряжения на модели ВЛ с учетом импульсной короны и без учета импульсной короны. Проведено сравнение полученных энергетических характеристик.

**Выводы.** Импульсная корона имеет существенное влияние на выделяемую в ограничителях перенапряжения энергию при ударах молнии в трос, если длина фронта импульса тока молнии имеет величину около 1 мкс. При прорыве молнии на фазный провод энергия, выделяемая в ограничителях перенапряжения, столь велика, что влияние импульсной короны незначительно. Применяемая в расчетах модель импульсной короны в EMTP-ATP имеет ряд ограничений, поэтому в перспективе дальнейших исследований целесообразно улучшить модель и упростить ее применение в расчетах молниезащиты ВЛ.

**Ключевые слова:** модель импульсной короны, воздушная линия, энергетические характеристики, линейные ОПН, грозовые перенапряжения

**Aleksandr Mikhailovich Gulov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Postgraduate student of Higher School of High Voltage Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: algu1ov@yandex.ru

**Aleksandr Valeryevich Kolychev**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Higher School of High Voltage Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: alkoly4ev@yandex.ru

## **Study of influence of corona effect on 110 kV overhead line, lightning protection cable on energy characteristics of linear surge arresters during lightning overvoltages**

### **Abstract**

**Background.** The corona effect has a significant impact on calculations of lightning protection of the high-voltage overhead transmission line. The corona effect in the calculation of the transient process during a lightning overvoltages is often neglected due to the complexity of modeling the corona effect. The issue of the corona effect influence on the operation of non-linear surge suppressors installed on overhead lines hasn't been sufficiently studied. The aim of the research is to evaluate the energy characteristics of linear surge arresters considering the corona effect on the overhead line.

**Materials and methods.** Simulation of the transient process on the overhead line during lightning overvoltages is carried out in the EMTP-ATP software. There is no corona model among the basic models in EMTP-ATP software. Thus, the corona model on overhead line wires using dynamic capacitances is under consideration.

**Results.** A model of corona on overhead line wires in EMTP-ATP is developed. Calculations of energy characteristics of linear surge arresters on an overhead line model considering the corona and without corona effect are carried out. The comparison of the obtained energy characteristics is carried out.

**Conclusions.** The corona has a significant effect on the energy absorbed by the linear surge arresters during lightning strikes to the ground-wire if the front time of the lightning current impulse has a value near 1  $\mu$ s. When lightning strikes to the phase wire, the energy absorbed by the linear surge arresters is so great that the influence of the corona effect is insignificant. The corona model used in calculations in EMTP-ATP software has several limitations. Therefore, in future research it's advisable to improve the model and simplify it, when calculating lightning protection of overhead lines.

**Key words:** corona model, overhead transmission line, energy characteristics, linear surge arresters, lightning overvoltages

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.1.060-065

**Введение.** Исследования импульсной короны на проводах ВЛ показывают, что как только напряжение на фронте волны превосходит напряжение начала короны, существенно сглаживается фронт волны [1]. По этой причине корона оказывает существенное влияние на результат расчета грозоупорности ВЛ.

Эффектом импульсной короны при расчете переходного процесса во время удара молнии в ВЛ часто пренебрегают из-за сложности моделирования импульсной короны. Одной из целей исследования является моделирование импульсной короны в EMTP-ATP. Основной же целью исследования является изучение влияния импульсной короны на работу нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН), устанавливаемых на ВЛ. Необходимо изучить, как добавление эффекта импульсной короны в расчеты влияет на энергию, рассеиваемую ОПН, во время грозовых перенапряжений.

**Методы исследования.** На сегодняшний день разработано множество моделей импульсной короны, которые имеют свои преимущества и недостатки. Подробный обзор моделей короны на воздушной линии приводится в [2]. В [3] разбираются, в том числе, и отечественные модели короны.

Модели короны можно разделить на три группы:

1) «физические» модели, основанные на упрощенном описании физики процесса короны. Основным недостатком таких моделей является их сложность, что неудобно для решения инженерных задач;

2) эмпирические модели, описывающие корону как функцию от приложенного напряжения, чтобы аппроксимировать измеренные вольт-кулоновые характеристики. Главным преимуществом таких моделей является легкость их применения. К недостаткам можно отнести сложность с выбором некоторых входных параметров;

3) цепные модели, которые удобно применять в программах для расчета переходных процессов. Недостатком этих моделей является то, что они вычисляют затухание волны из-за короны только в выбранных узлах цепи, имитируя явление как сосредоточенное, которое на самом деле является распределенным вдоль всей линии.

Коронный разряд на проводах ВЛ возникает, когда напряженность электрического поля провода превысит некоторую критическую напряженность. Начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению общей короны на одиночном проводе, впервые была подробно изучена в начале прошлого века Ф. Пиком [4].

В расчетах воспользуемся эмпирической формулой [5], кВ/см:

$$E_0 = 23,8 m \left(1 + 0,67 / r_{\text{пр}}^{0,4}\right), \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент негладкости провода (далее  $m = 0,82$ );  $r_{\text{пр}}$  – радиус провода, см.

Напряжение начала короны, кВ, вычисляется по формуле

$$U_0 = E_0 r_{\text{пр}} \ln \left( \frac{2h}{r_{\text{пр}}} \right). \quad (2)$$

До возникновения коронного разряда емкостной ток пропорционален статической (геометрической) емкости  $C_0$  провода:

$$i = \frac{dq}{dt} = C_0 \frac{du}{dt}. \quad (3)$$

При коронном разряде заряд провода (включая объемный заряд короны) нелинейно зависит от напряжения, тогда

$$i = \frac{dq(u)}{dt} = \frac{dq(u)}{du} \frac{du}{dt} = C_d \frac{du}{dt}. \quad (4)$$

Таким образом, при коронном разряде геометрическая емкость провода заменяется динамической емкостью, которая зависит от приложенного к проводу напряжения:

$$C_d = \frac{dq(u)}{du}. \quad (5)$$

Именно на вычислении динамической емкости и впоследствии емкостного тока при воздействии коронного разряда основывается большинство моделей короны.

В программе ATP-EMTP модель динамической емкости отсутствует, но есть возможность создать ее самостоятельно. Созданию подобной модели посвящен ряд работ [6–8], однако подробное описание создания модели в ATP-EMTP нигде не приводится. Используем для этого встроенную в ATP-EMTP модель Type-94 Thevenin, подробнее с которой можно

ознакомиться в руководстве.<sup>1</sup> Модель Type-94 Thevenin представляет собой элемент цепи, которая работает без задержки, одновременно с остальной сетью. Type-94 Thevenin включает в себя источник напряжения и эквивалентное сопротивление (рис. 1), которые вычисляются на каждом шаге. Таким образом, выходными данными модели на каждом временном шаге является протекающий через нее ток  $i(t)$ , вычисленный с использованием эквивалентных напряжения и сопротивления в качестве входных данных.

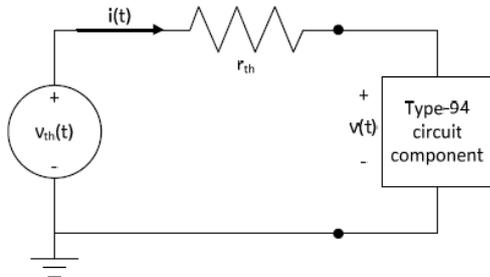


Рис. 1. Схема элемента цепи Thevenin type-94

Записав в Thevenin type-94 вычисление динамической емкости и затем емкостного тока, получим модель импульсной короны на проводе ВЛ. Чтобы моделировать корону более точно, модель линии в АТР-ЕМТР необходимо дробить на короткие элементы длиной несколько десятков метров, что делает задачу моделирования короны довольно неудобной и трудоемкой.

Рассмотрим «цепную» модель Хара и Умото [9], которая основывается на расчетах потерь на корону по квадратичной частотно зависимой формуле, впервые предложенной Пиком [4]. Данная модель также подробно разбирается в [10]. Модель короны представляет собой цепь (рис. 2) из двух сосредоточенных параллельно соединенных элементов – динамической емкости и проводимости, которые нелинейно зависят от напряжения. Емкость моделирует объемный заряд короны, а проводимость – дополнительные потери на корону. Выражения для динамической емкости и проводимости имеют следующий вид:

$$C_d = 2k_C [1 - U_0 / u(t)] \Delta l; \quad (6)$$

$$G_c = k_G [1 - U_0 / u(t)]^2 \Delta l, \quad (7)$$

где  $\Delta l$  – длина участка ВЛ; коэффициенты  $k_C$  и  $k_G$  вычисляются по формуле

$$k_{C,G} = \sigma_{C,G} B \sqrt{\frac{r}{2h}} 10^{-11}; \quad (8)$$

где  $\sigma_{C,G}$  – константы потерь на корону (эти константы зависят от конфигурации рассматриваемой системы и лежат в пределах 15–35 Ф/м и  $5 \times 10^6$ – $20 \times 10^6$  См/м соответственно [2]).

В выборе данных констант заключается недостаток модели, так как точно подобрать их можно только сравнивая расчеты с реальными измерениями на ВЛ.

Таким образом, токи, протекающие по ветвям цепи, вычисляются по формулам:

$$i_C = C_d \frac{du(t)}{dt} = 2k_C [1 - U_0 / u(t)] \frac{du(t)}{dt} \Delta l; \quad (9)$$

$$i_G = C_d u(t) = k_G [1 - U_0 / u(t)]^2 u(t) \Delta l. \quad (10)$$

В [10] принимают  $\Delta l = 70$  м, так как такое значение хорошо согласуется с измеренными величинами.

В расчетах с данной моделью далее примем:  $\Delta l = 50$  м,  $\sigma_C = 20$  Ф/м,  $\sigma_G = 10 \times 10^6$  См/м.

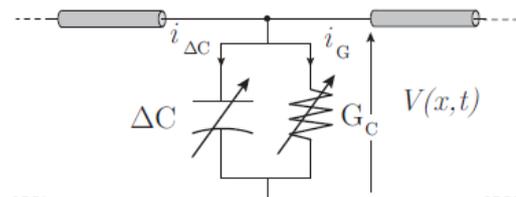


Рис. 2. Модель импульсной короны

На рис. 3 приведена осциллограмма тока короны на фазном проводе.

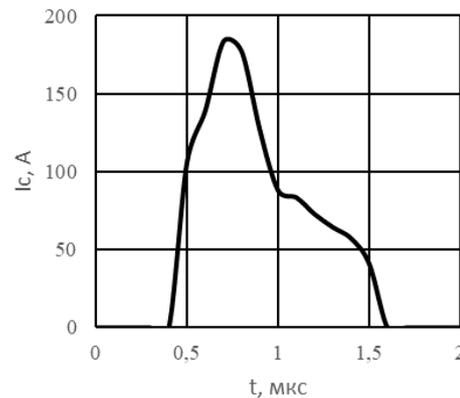


Рис. 3. Ток в землю через динамическую емкость и проводимость на 50 м длины коронирующей линии

Для проверки правильности моделирования импульсной короны выполним сопоставление форм расчетных и экспериментальных [11] волн грозовых перенапряжений, деформированных импульсной короной. В экспериментах участок линии был выполнен различными проводами с радиусами от 11,5 до 25 мм. Осциллограммы искаженной короной волны снимались на расстояниях 658, 1298 и 2158 м.

Сравнение расчетных данных, полученных с помощью модели Хара [9], и экспериментальных данных проведем для пробега волны 658 м по ВЛ, так как это наиболее близкое значение к длине пролета ВЛ 110 кВ. Высота подвеса провода составляет 19 м, диаметр провода – 50,8 мм.

На рис. 4 представлено сравнение осциллограмм напряжения.

Таким образом, при использовании для моделирования импульсной короны в

<sup>1</sup> Dubé L. MODELS in ATP, language manual. – 1996.

АТР-EMTP элемента Thevenin type-94 модель Хара [9] показывает себя достаточно точно.

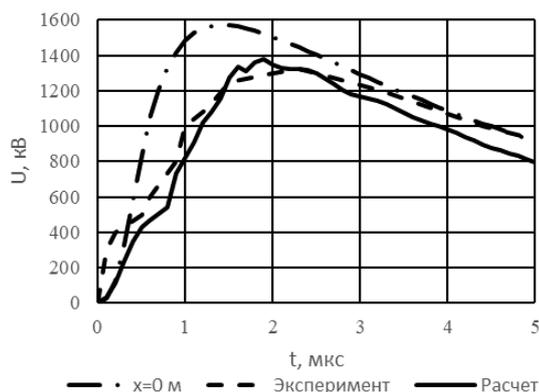


Рис. 4. Напряжение на конце линии после пробега волной 658 м при подаче импульса 1600 кВ

На рис. 5, 6 представлено напряжение на изоляции ВЛ 110 кВ без учета короны на проводе и с учетом короны при пробеге волны перенапряжения, равном 300 м.

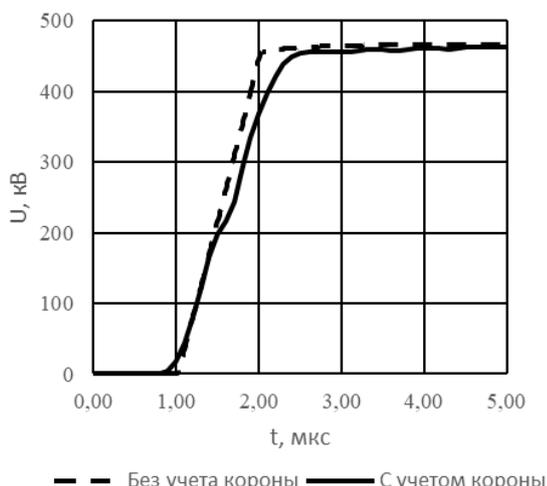


Рис. 5. Напряжение на гирлянде изоляторов при ударе молнии в провод. Длина фронта импульса тока молнии 1 мкс

В качестве опор ВЛ-110 кВ в расчетной модели выбраны промежуточные металлические опоры, которые моделируются с помощью индуктивности. Сопротивление заземляющего устройства опор замещается активным сопротивлением. Пролеты линии задаются при помощи частотно-зависимой модели JMarti. Так как целью исследования является изучение влияния импульсной короны на работу ОПН, то в качестве допущения задача рассматривается в однофазной постановке. Таким образом, возможные перекрытия на соседних фазах ВЛ не учитываются.

ОПН моделируются при помощи нелинейного резистора, в котором задается вольт-амперная характеристика (ВАХ). В качестве основы ВАХ взяты данные из каталога производителя для ОПН с рабочим напряжением 88 кВ. До-

полнительные точки для более гладкого построения ВАХ рассчитываются при помощи степенной зависимости:

$$U_{\text{ост}} = AI^\alpha. \tag{11}$$

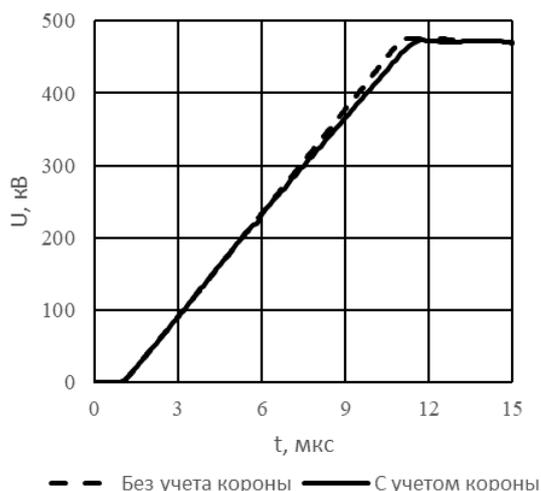


Рис. 6. Напряжение на гирлянде изоляторов при ударе молнии в провод. Длина фронта импульса тока молнии 10 мкс

Коэффициенты  $A$  и  $\alpha$  вычисляются по известным данным ВАХ от производителя, затем при заданном токе досчитывается остающееся напряжение.

Импульсная корона напрямую влияет на напряжение на изоляции во время грозовых перенапряжений. Соответственно, импульсная корона будет оказывать влияние и на работу защитных аппаратов. Далее работа ОПН будет подробно рассмотрена при расчетах схем с учетом импульсной короны и без.

**Результаты исследования.** Для оценки влияния импульсной короны на энергетические характеристики защитных аппаратов проведена серия расчетов для ВЛ с ОПН на верхней фазе. Рассмотрено два случая:

- 1) удар молнии в фазный провод на ВЛ 110 кВ без тросовой защиты;
- 2) удар молнии в трос в середину пролета на ВЛ 110 кВ.

Первая серия расчетов проводится при ударе молнии в фазный провод. Схема представляет собой ВЛ 110 кВ без троса с одной опорой, на верхней фазе которой установлен ОПН. Рассчитаем энергию, рассеиваемую ОПН, варьируя длину пробега волны до опоры, фронт и амплитуду импульса тока молнии. Все расчеты проводятся в схеме с моделью импульсной короны и без нее. Для каждой формы импульса перебирается амплитуда тока молнии от 5 до 150 кА и на каждом шаге рассчитывается разница между выделяемой в ОПН энергией в схеме с короной и без короны. Полученная таким образом  $\Delta W_{\text{опн}}$  усредняется и выражается в процентах для каждой формы импульса. Результаты расчета приведены в табл. 1.

В данном расчете сделано допущение об отсутствии перекрытий изоляции на ВЛ, а также не учтены соседние опоры. Однако даже при пробеге волной напряжения до опоры 600 метров импульсная корона уменьшает выделяемую в ОПН энергию приблизительно на 1 %. Прежде всего, это связано с крайне большими значениями перенапряжений и, соответственно, энергии, рассеиваемой ОПН, при ударе молнии в фазный провод.

Таблица 1. Дельта ( $\Delta W_{\text{ОПН}}$ ) между энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме без учета импульсной короны и энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме с учетом импульсной короны при ударе молнии в фазный провод

Длина пробега волны, м	Форма импульса, мкс		
	1/75	5/75	10/75
	$\Delta W_{\text{ОПН}}, \%$		
300	0,5	0,2	0,15
600	1,1	1,0	0,8

Наихудшим с точки зрения энерговыделения в ОПН расчетным случаем является ограниченное число защитных аппаратов на линии. Установка ограниченного числа ОПН на ВЛ регламентирована нормативными документами (РД п.7.4.12-7.4.14)<sup>2</sup> и практикой применения ограничителей перенапряжений. Например, для повышения грозоупорности отдельных участков ВЛ при демонтаже троса на отдельных пролетах при пересечениях ВЛ применяется ограниченное число ОПН.

Проведем аналогичные расчеты для схемы с двумя опорами и ударом молнии в фазный провод в середину пролета длиной 300 м. В данной схеме ОПН будет установлен на каждой опоре, т. е. будет действовать эффект распределения энергии между аппаратами. В такой расчетной конфигурации влияние импульсной короны будет еще меньше и значение  $\Delta W_{\text{ОПН}}$  практически равно 0.

Чем больше установлено ОПН на фазных проводах по ходу грозовой волны, тем более равномерно распределяется энергия на ограничителях перенапряжений. Но и в этом случае наибольшая энергия молниевых разрядов выделяется в ближайших к точке удара молнии в фазный провод или трос ограничителях.

Проведем аналогичную серию расчетов на участке ВЛ 110 кВ из 6 опор. На каждой опоре установлен ОПН. Эффект распределения энергии между аппаратами значительно снижает нагрузку на ближайшие к месту удара молнии ограничители. Однако и в этом случае подключение к расчетам модели импульсной короны

дает снижение выделяемой в ОПН энергии не более чем на 1,1 %.

Таким образом, при расчетах энергии, выделяемой в ОПН-110 кВ, применяемых на ВЛ-110 кВ без тросовой защиты, влиянием импульсной короны можно пренебречь.

Рассмотрим удар молнии в трос в середину пролета. Расчеты проводятся аналогично расчетам при ударе молнии в фазный провод с добавлением варьирования сопротивления заземления опор, так как этот параметр оказывает значительное влияние на напряжение на изоляции при ударе молнии в трос или опору. Рассчитаем наиболее тяжелый с точки зрения энерговыделения в ОПН случай, когда защитные аппараты установлены только на ближайших к месту удара молнии опорах. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2. Дельта ( $\Delta W_{\text{ОПН}}$ ) между энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме без учета импульсной короны и энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме с учетом импульсной короны при ударе молнии в трос в середину пролета

Сопротивление ЗУ опор, Ом	Форма импульса, мкс				
	0,5/75	1/75	1,5/75	5/75	10/75
	$\Delta W_{\text{ОПН}}, \%$				
10	74	63,9	32,4	35,7	34,6
50	60,3	30,6	11,9	1,8	1,2
100	45,6	13,6	4,8	0,9	0,6

Анализ данных (табл. 2) показывает, что импульсная корона имеет большое влияние на значения выделяемой в ОПН энергии при малом сопротивлении заземляющего устройства опор. С ростом сопротивления ЗУ опор влияние импульсной короны уменьшается. Стоит отметить, что при фронтах менее 1 мкс снижение выделяемой энергии из-за импульсной короны довольно велико, в том числе и при высоких сопротивлениях ЗУ опор.

Рассмотрим теперь схему, состоящую из 4 опор, на каждой из которых установлен ОПН на верхней фазе. Таким образом, в расчете будет учтен эффект распределения энергии между ОПН на опорах соседних пролетов. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3. Дельта ( $\Delta W_{\text{ОПН}}$ ) между энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме без учета импульсной короны и энергией, выделяемой в ОПН-110 кВ, в схеме с учетом импульсной короны при ударе молнии в трос в середину пролета (схема из 4 опор)

Сопротивление ЗУ опор, Ом	Форма импульса, мкс				
	0,5/75	1/75	1,5/75	5/75	10/75
	$\Delta W_{\text{ОПН}}, \%$				
10	66,1	57,2	24,1	49,3	24,4
50	51,3	37,3	10,4	3,5	0,6
100	40,1	26,2	7,3	2,2	0,4

<sup>2</sup> Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозowych и внутренних перенапряжений РД 153-34.3-35.125-99. СПб., 1999.

**Выводы.** Таким образом, при рассмотрении удара молнии в трос в середину пролета либо в точку, достаточно удаленную от обоих опор, импульсную корону необходимо учитывать при расчетах выделяемой в ОПН энергии для молний с короткими фронтами порядка 1 мкс и менее для любых значений сопротивления ЗУ опор. При пологих фронтах значения энергии, выделяемой в ОПН, слишком малы и смысла усложнять расчет моделями с импульсной короной нет.

При рассмотрении удара молнии в фазный провод энергия, выделяемая в ОПН, слишком велика и влияние импульсной короны на нее минимально. В случае удара молнии в фазный провод больший интерес представляет влияние импульсной короны на общее число перекрытий изоляции ВЛ. Однако при этом существует техническая трудность, связанная с тем, что элемент Thevenin type-94, в котором реализована модель импульсной короны, нельзя помещать в узел цепи более 1 раза. В связи с этим реализовать импульсную корону на всех проводах и тросах ВЛ в ATP-EMTP с помощью данного подхода нельзя.

#### Список литературы

1. **Ефимов Б.В., Гумерова Н.И.** Моделирование деформации грозовых волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле // Труды КНЦ РАН. Энергетика. – 2013. – № 7(17). – С. 13–32.
2. **Stracqualursi E., Araneo R., Celozzi S.** The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 1–33.
3. **Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н.** Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий с импульсной короной в цепных схемах // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 47–56.
4. **Peek F.W.** The law of corona and the dielectric strength of air // *Proc. Am. Inst. Electr. Eng. The American Institute of Electrical Engineers*. – 1911. – Vol. 30, № 7. – P. 1485–1561.
5. **Waters R.T., Stark W.B.** Characteristics of the stabilized glow discharge in air // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 1975. – Vol. 8, № 4. – P. 416–426.
6. **Astinfeshan S., Gholami A., Mohajeri M.** Analysis of Corona Effect on Lightning Performance of HV Overhead Transmission Line Using ATP / EMTP // 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Tehran, Iran, 2012. – P. 485–488.
7. **Mohammadi B., Vahidi B.** Model of Corona for Transient Study // *TENCON 2005 – 2005 IEEE Region 10 Conference*. – 2005. – No. 4. – P. 13–16.
8. **Geri A., Lauria S., Maccioni M.** Effect of Corona and Non-Linear Tower Grounding System Modelling on Backflashover Simulation // *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. – Shanghai, 2014. – P. 220–225.

9. **Umoto J., Hara T.** Numerical analysis of surge propagation on single-conductor systems considering corona losses // *Electr. Eng. Japan*. – 1969. – Vol. 89.

10. **Lee K.C.** Nonlinear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP) // *IEEE Power Eng. Rev.* – 1983. – No. 9. – P. 2936–2942.

11. **Wagner C.F., Gross I.W., Lloyd B.L.** High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines // *Power Appar. Syst. Part III. Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* – 1954. – Vol. 73 – P. 196–210.

#### References

1. Efimov, B.V., Gumerova, N.I. Modelirovanie deformatsii grozovykh voln v vozduzhnykh liniyakh s uchetom sovmestnogo vliyaniya konstruksii opor, korony na provodakh i poter' v zemle [Modeling of deformation of lightning waves in overhead lines, taking into account the influence of the structure of towers, corona on wires and losses in the ground]. *Trudy KNTs RAN. Energetika*, 2013, no. 7(17), pp. 13–32.
2. Stracqualursi, E., Araneo, R., Celozzi, S. The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 1–33.
3. Shishigin, S.L., Shishigin, D.S., Smirnov, I.N. Raschet grozovykh perenapryazheniy vozduzhnykh liniy s impul'snoy koronoy v tsepnykh skhemakh [Calculation of lightning overvoltages of overhead lines with a impulse corona in chain circuits]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika*, 2022, no. 1, pp. 47–56.
4. Peek, F.W. The law of corona and the dielectric strength of air. *Proc. Am. Inst. Electr. Eng. The American Institute of Electrical Engineers*, 1911, vol. 30, no. 7, pp. 1485–1561.
5. Waters, R.T., Stark, W.B. Characteristics of the stabilized glow discharge in air. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 1975, vol. 8, no. 4, pp. 416–426.
6. Astinfeshan, S., Gholami, A., Mohajeri, M. Analysis of Corona Effect on Lightning Performance of HV Overhead Transmission Line Using ATP. EMTP. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Tehran, Iran, 2012, pp. 485–488.
7. Mohammadi, B., Vahidi, B. Model of Corona for Transient Study. *TENCON 2005 – 2005 IEEE Region 10 Conference*, 2005, no. 4, pp. 13–16.
8. Geri, A., Lauria, S., Maccioni, M. Effect of Corona and Non-Linear Tower Grounding System Modelling on Backflashover Simulation. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Shanghai: IEEE, 2014, pp. 220–225.
9. Umoto, J., Hara, T. Numerical analysis of surge propagation on single-conductor systems considering corona losses. *Electr. Eng. Japan*, 1969, vol. 89.
10. Lee, K.C. Nonlinear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP). *IEEE Power Eng. Rev.*, 1983, no. 9, pp. 2936–2942.
10. Lee, K.C. Nonlinear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP). *IEEE Power Eng. Rev.*, 1983, no. 9, pp. 2936–2942.
11. Wagner, C.F., Gross, I.W., Lloyd, B.L. High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines. *Power Appar. Syst. Part III. Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 1954, vol. 73, pp. 196–210.