

А.Ю. Киселев, П.С. Пинчуков

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧАСТКА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗРЯДОВ МОЛНИЙ

Аннотация. *Снижение числа отключений высоковольтных воздушных линий электропередачи (ЛЭП, ВЛ) является важной задачей современной электроэнергетики. Значительная доля отключений ЛЭП (до 60%) спровоцирована ударами молний [1, 2]. Как известно, надёжность электрической системы, в том числе схем внешнего электроснабжения как электрифицированной железной дороги, так и нефтеперекачивающих станций, в целом зависит от надёжности её компонентов. Наиболее уязвимыми являются линии электропередачи, поскольку вследствие большой протяжённости они более всего подвержены различным атмосферным воздействиям.*

В целях рассмотрения различного рода переходных процессов, возникающих при грозовых воздействиях на элементы ЛЭП, в программном продукте Simulink Matlab разработана компьютерная модель. В статье дано описание основных возможностей созданной компьютерной модели ЛЭП, состоящей из шести опор, с заземляющими устройствами, и учитывающей результаты исследований [1, 3, 4].

Ключевые слова: *грозовые воздействия, линии электропередачи, компьютерная модель.*

A.Y. Kiselev, P.S. Pinchukov

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

THE COMPUTER SIMULATION OF A SECTION OF AN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE UNDER THE INFLUENCE OF LIGHTNING DISCHARGES

Abstract. *Reducing the number of disconnections of high-voltage overhead power lines (power lines, overhead lines) is an important task of the modern electric power industry. A significant proportion of power line outages (up to 60%) are triggered by lightning strikes [1, 2]. As you know, the reliability of the electrical system, including the external power supply schemes of the catenary of an electrified railway and oil pumping stations, generally depends on the reliability of its components. Power transmission lines are the most vulnerable, since due to their long length they are most susceptible to various atmospheric influences.*

A computer model has been developed in the Simulink Matlab software product in order to consider various types of transients that occur during thunderstorms on power transmission elements. The article describes the main features of the created computer model of a power line consisting of six supports, with grounding devices, and taking into account the results of research [1, 3, 4].

Keywords: *thunderstorms, power lines, computer model.*

Введение

Основными источниками грозовых перенапряжений на изоляции ЛЭП, как это показано на рис.1, являются следующие воздействия молнии: прямые разряды в ЛЭП (в фазный провод – 1, в опору – 2, в трос – 3); разряды вблизи от ВЛ (в землю или в объекты – 4).

В случаях 1, 2, 3 говорят, что на изоляции ЛЭП имеют место перенапряжения прямого разряда молнии, а в случае 4 – индуктированные перенапряжения. Физике молнии лучше соответствует «разряд», однако, зачастую используется «удар».

При заданных параметрах молнии перенапряжения прямого разряда опаснее для изоляции, нежели индуктированные перенапряжения. Однако вероятность прямого разряда молнии зависит от многих факторов, и может получиться так, что вовсе не прямые разряды молнии являются основной причиной перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях, а индуктированные [5].

В случае прямого удара молнии в заземленную опору ЛЭП после многократных отражений волны от заземлителей и вершины опоры начинается процесс протекания через опору импульсных токов. Проходящий через опору ток создает падение напряжения в сопротивлении заземления. Это напряжение считается полностью приложенным к изоляции ВЛ, так как напряженность электрического поля по мере удаления от места прямого удара

резко уменьшается и потенциал на проводе даже в непосредственной близости от опоры будет близок к нулю [5].

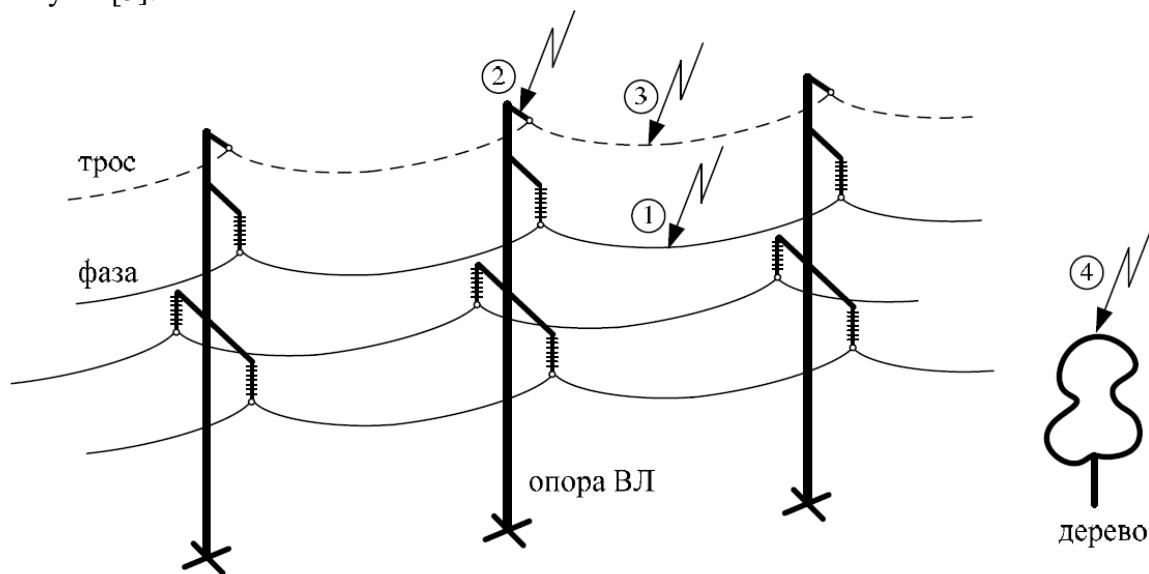


Рис.1. Разряды молнии – причины грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ

При ударе молнии в опору ЛЭП или грозотрос (заземлённые части) в результате повышения импульсного потенциала на траверсе в месте крепления изолирующей подвески фазного провода к опоре может произойти так называемое «обратное перекрытие» – перекрытие с заземлённой части электроустановки на токоведущую [2, 5].

Величина проходящего через опору ЛЭП тока зависит также от волнового сопротивления грозотросов, через которые часть тока молнии ответвляется в заземлители соседних опор. Падение напряжения в сопротивлении заземления опоры определяется по формуле [2]

$$\Delta U = I_{\text{молнии}} \cdot R_{\text{зу}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{молнии}}$ – ток молнии, $R_{\text{зу}}$ – сопротивление заземления опоры.

Согласно письму ПАО «Транснефть» [6] за первое полугодие 2021 года по причине неисправностей в магистральных электрических сетях ДФО произошла 31 аварийная остановка объектов магистральных нефтепроводов и нефтеперекачивающих станций (далее – НПС). Из них 18 (58 %) отключений произошло по причине грозовых перенапряжений на ЛЭП. В 10-ти случаях отключения в электрических сетях ДФО приводили к исчезновению питания на обоих взаиморезервируемых источниках с нарушением требований к обеспечению категории надежности электроснабжения. ПАО «Транснефть» отмечает, что аварийные отключения НПС приводят к возникновению рисков исполнения обязательств перед заказчиками по международным контрактам, влияют на безопасную работу объектов трубопроводного транспорта и могут привести к негативным экологическим последствиям. Кроме того, остановки нефтепроводов отрицательно сказываются на функционировании прилегающих энергорайонов. Так, отключения внешнего электроснабжения технологических участков трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан» приводили к значительным сбросам нагрузки и созданию аварийных ситуаций в целом в энергосистеме. Аналогичная ситуация и с тяговыми подстанциями ОАО «РЖД», которые относятся к потребителям первой категории и запитываются, как правило, от двух цепей ВЛ.

Приведенная информация подтверждает актуальность вопросов грозозащиты ЛЭП и в этой связи предложена компьютерная модель пакета программ Matlab, позволяющая изучить переходные процессы при воздействии грозовых перенапряжений.

Моделирование участка ЛЭП при прямых ударах молнии

При компьютерном моделировании участка воздушной ЛЭП учтены результаты научных исследований [1, 3, 4], а именно:

- в качестве схемы замещения опоры ЛЭП номинальным напряжением 220 кВ принята схема с рассредоточенной индуктивностью (рис.5), без учёта индуктивностей траверс, при этом имеется возможность включения последних в модель опоры при возникновении такой необходимости [1];
- для создания формы грозового импульса используется биэкспоненциальная аппроксимация Брюса-Голда [3];
- чем более крутой фронт разрядного тока, тем выше импульсное напряжение на гирлянде изоляторов, следовательно, в схеме приняты параметры грозового импульса 1,2/50 мкс (а не 8/40 мкс или 10/350 мкс) [3];
- для расчёта переходного процесса при ударе молнии в ВЛ используется модель, состоящая из шести опор, которая является вполне достаточной в части достоверности результатов моделирования [4].

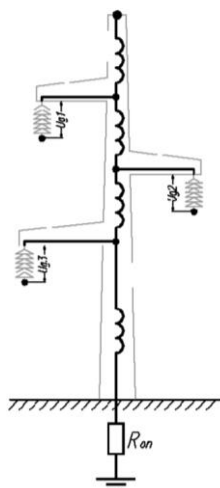


Рис.5. Схема опоры ЛЭП с рассредоточенной индуктивностью, без учёта индуктивностей траверс

Модель для анализа грозовых перенапряжений

Грозовые перенапряжения на линиях электропередачи возникают как при непосредственном поражении линии грозовыми разрядами (перенапряжения прямого удара молнии), так и при разрядах молнии в землю в окрестности линии (индуцированные перенапряжения). Перенапряжения прямого удара молнии (ПУМ) представляют наибольшую опасность, и грозозащита линий должна ориентироваться именно на этот вид перенапряжений. Далее, при анализе грозовых перенапряжений в ВЛ основными расчетными случаями будем рассматривать прямые удары молнии в фазные провода, в опору линии и в грозозащитный трос.

Для исследования грозовых перенапряжений выбран фрагмент ВЛ номинальным напряжением 220 кВ протяженностью 1 км, содержащий шесть опор. Каждый из данных фрагментов, в свою очередь, состоит из двух элементарных участков линии (трех фазных проводов и одного грозозащитного троса) длиной 100 м, созданием которых представляется возможность моделировать разряд тока молнии в середину фазного провода и грозозащитного троса.

Компьютерная модель участка ЛЭП, выполненная программными средствами Matlab/Simulink/SimPowerSystems, показана на рис.6, в которую входят: 10 элементарных участков линии длиной 100 м каждый; 6 опор; эквивалентные сопротивления заземления 6-ти опор; импульсный генератор разрядного тока молнии; эквивалентное сопротивление нагрузки; средства измерения токов и напряжений.

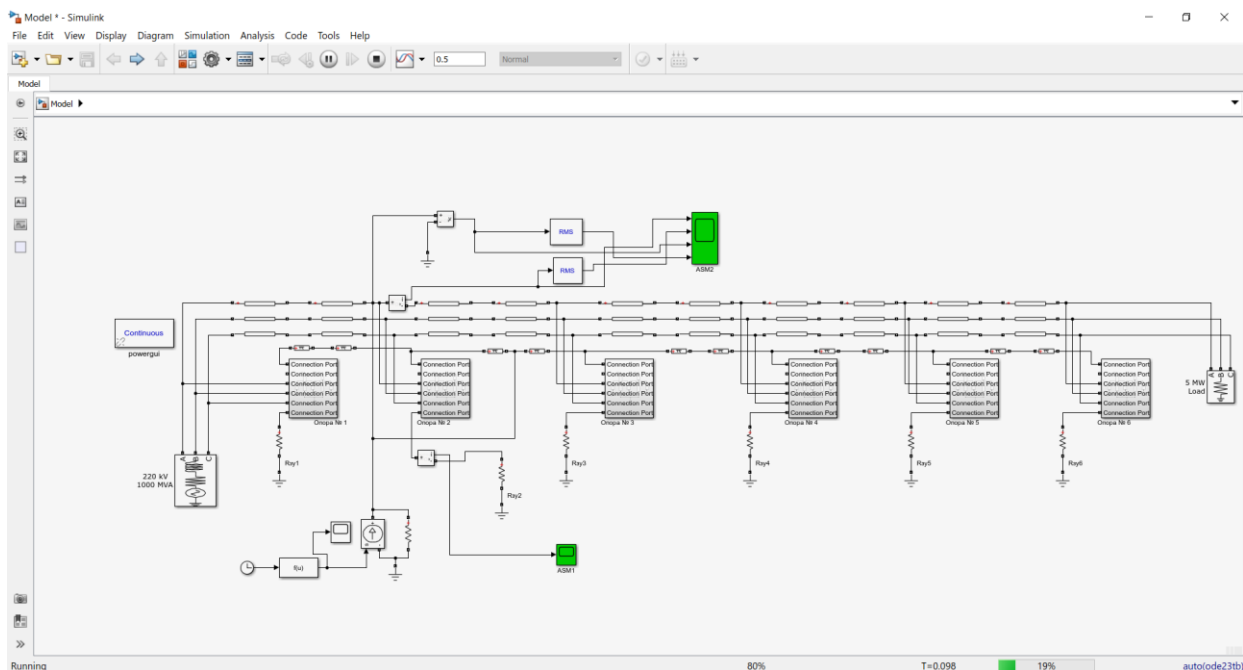


Рис.6. Компьютерная модель участка ЛЭП номинальным напряжением 220 кВ

Основными элементами этой модели являются следующие:

1. Элементарный участок линии длиной 1 км, схема замещения которого представляет эквивалентную модель, состоящую из трех фазных проводов и одного грозозащитного троса (при необходимости имеется возможность введения в схему второго грозотроса подключением концевых клемм к свободным входам шестиполюсников, являющихся эквивалентом схемы замещения опоры ЛЭП). Между всеми пятью проводниками этого участка линии, а также землей существуют взаимные индуктивные и емкостные связи, для определения значений которых в работе использовалась специализированная программа, входящая в состав пакета Simulink/ SimPowerSystems.

2. Эквивалентная схема замещения опоры ВЛ согласно [3] содержит набор индуктивностей, вычисленных для каждого участка опоры по значению погонной индуктивности. Модель опоры включает также гирлянду изоляторов, представленную в виде эквивалентной емкости, значение которой определялось по [7].

3. Заземление опоры моделируется в виде активного сопротивления, значение которого может варьироваться в широких пределах. При необходимости в схему замещения сложного заземляющего устройства можно ввести присущую ему индуктивность, а в грунтах с высоким удельным сопротивлением и емкостью [8].

4. Импульсный генератор тока, моделирующий разряд молнии амплитудой 100 кА [8].

5. Сопротивление нагрузки, подключенное на конце участка линии и равное волновому сопротивлению линии 300 Ом [3].

6. Виртуальные осциллографы как средство отображения кривых напряжений и токов в элементах линии.

Уникальность данной схемы обусловлена следующим: во-первых, схема является оптимальной (не перегружена большим количеством опор ЛЭП, которое в практике для одной ЛЭП класса напряжения 220 кВ может составлять 500-600 опор), при этом позволяет моделировать разряды молний и получать данные переходных процессов в любом элементе ЛЭП с минимальным временем компьютерных итераций.

Во-вторых, позволяет моделировать прямые удары молний со стандартной амплитудой тока 100 кА (или произвольно заданной) в фазные провода и грозозащитный трос в середине пролета опор ЛЭП, а также в опору ЛЭП. Генератор тока имитирует разряд молнии отрицательной полярности, что реализуется на практике в большинстве случаев, при этом имеется возможность внести изменения в расчетную зависимость кривой тока молнии (2),

чтобы получить грозовой импульс положительной полярности (при необходимости) или другой формы.

В-третьих, в модели имеется возможность изменения параметров ЛЭП, таких как: сопротивление заземляющего устройства опор, сопротивление и емкость проводов и грозозащитных тросов (число тросов – до двух), емкость гирлянды изоляторов, взаимная индуктивность проводов и грозотросов, длина пролетов ЛЭП.

Анализ литературных источников показал, что для класса напряжения 220 кВ в среде Matlab моделирование разрядов молнии в воздушные ЛЭП не производилось, хотя данный программный продукт является вполне доступным для любого компьютерного пользователя. В этой связи модель может быть полезна для анализа переходных процессов при разрядах в разные элементы ЛЭП, например, позволяет установить зависимость скорости снижения тока молнии и величины падения напряжения на опоре ЛЭП от индуктивного сопротивления опоры и эквивалентного сопротивления заземляющего устройства.

Рассмотрим более подробно схемы замещения и параметры элементов расчетной модели.

Модель воздушной ЛЭП

Каждый участок моделировался в виде эквивалентного шестиполюсника, включающего три фазных провода, имитируемые элементом «Distributed Parameters Line» (ЛЭП с распределенными параметрами), имеющего отсюда 3 входа и 3 выхода, и один/два грозозащитных троса. Последние вследствие отсутствия функции моделирования их совместно с трехфазной системой в элементе «Distributed Parameters Line» имитируются элементом «Pi Section Line».

Математическое описание модели многопроводной линии с распределенными параметрами изложено в [9]. Для расчета эквивалентных электрических параметров исследуемой линии в работе использовался блок Powergui (инструмент Compute RLC Line Parameters), входящий в пакет программ SimPower Systems, подробное описание которого приведено в [10, 11]. При задании геометрических размеров линии использовались размеры для промежуточной опоры типа ПБ220-3.

Модель опоры и гирлянды изоляторов

Электрическая схема замещения опоры выбиралась в виде набора индуктивностей и показана на рис.7. Для расчета значений индуктивности использовалось известное значение погонной индуктивности для такого типа опор, равной 0,7 мкГн/м [1].

Гирлянда изоляторов в схеме замещения опоры представлялась в виде эквивалентной емкости и параллельно включенного резистора, моделирующего токи утечки. Для определения величины емкости использовалась электрическая схема замещения гирлянды из 13 изоляторов, $C_{экв} = 17$ пФ, которое и использовалось в модели опоры для моделирования гирлянды изоляторов [3].

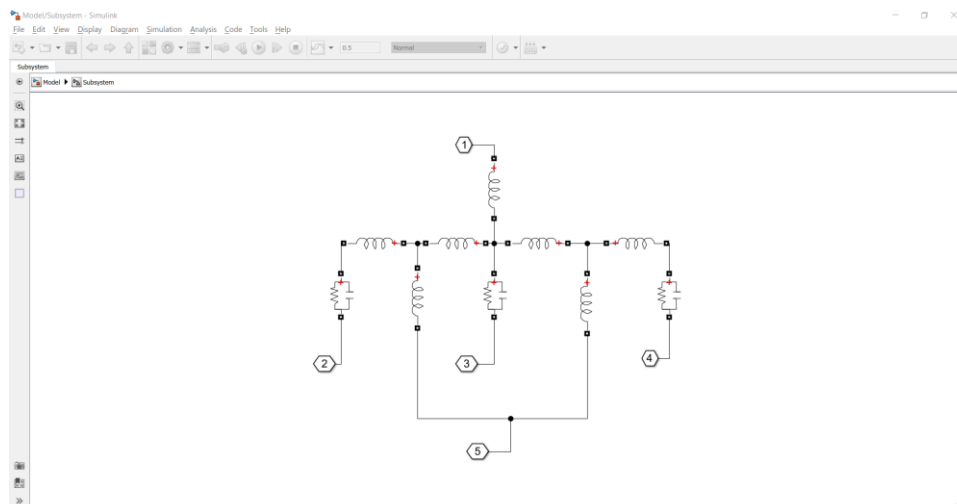


Рис.7. Эквивалентная схема замещения опоры ЛЭП и изоляторов

Модель разрядного тока молнии

На протяжении долгих лет ведется мониторинг разрядов молнии во многих странах мира. Например, лаборатория для исследования молнии оборудована на небоскребе Эмпайр Стейт Билдинг в Нью-Йорке высотой около 400 м, в которой было получено большое количество осциллограмм токов молнии.

Еще один из примеров - национальная сеть обнаружения молний США (NLDN) компании Vaisala - это наиболее точная с научной точки зрения и надежная информационная система о молниях, отслеживающая общую грозовую активность на всей территории США 24 часа в сутки, 365 дней в году. Доказано, что она обеспечивает непревзойденную производительность с превосходной точностью определения местоположения грозового фронта и эффективностью обнаружения разрядов молнии и является единственной сетью в США, способной как обнаруживать облака, так и молнии между облаками и землей, и в то же время правильно различать их.

Имеющиеся данные показывают, что ток молнии изменяется во времени так, как в стилизованном виде показано на рис. 8 [7].

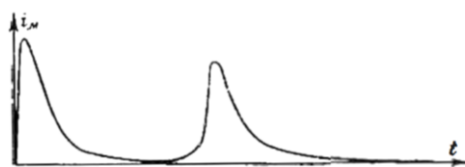


Рис.8. Стилизованный вид тока молнии

Всплески тока с большой амплитудой соответствуют обратным разрядам отдельных компонентов многократной молнии. Длительный ток меньшей амплитуды создается стеканием в землю заряда того центра в облаке, из которого развивался данный единичный разряд. Область медленного увеличения тока перед главным разрядом соответствует лидерной стадии следующего единичного разряда.

С точки зрения перенапряжений основной интерес представляет область больших токов, соответствующая обратному разряду и имеющая характер экспоненциального импульса [7]. Форму этого импульса можно приближенно установить с помощью двух параметров - длины фронта τ_ϕ и длины волны τ_β .

Наиболее распространенной интерпретацией формы волны тока молнии является биекспоненциальная аппроксимация Брюса-Голда [3]:

$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} \cdot [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}], \quad (2)$$

где I_m – максимальное значение волны тока молнии;

η – корректирующий коэффициент амплитуды волны [3]:

$$\eta = e^{\left(\frac{\tau_\phi}{\tau_1}\right)}, \quad (3)$$

τ_1 – постоянная времени, определяемая временем нарастания волны тока молнии и рассчитываемая по формуле [3]:

$$\tau_1 = \frac{\tau_\phi - \tau_\phi}{\ln(0,5)}, \quad (4)$$

α, β – декременты биекспоненциальной функции, определяемые выражениями [12]:

$$\alpha = \frac{0,7}{\tau_\beta - \tau_\phi}, \quad (5)$$

$$\beta = 5 \cdot \tau_\phi. \quad (6)$$

Результаты расчета коэффициентов по формулам (3)-(6) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов биекспоненциальной зависимости

Параметры импульса тока	I_m , А	η	τ_ϕ , мкс	τ_1 , мкс	α , с	β , мкс
1,2/50 мкс	10^5	$e^{-0,017}$	1,2	70,4	14300	6

В Simulink-модели, показанной на рис.9, генератор тока, моделирующий импульсный ток разряда молнии, представлен в виде управляемого источника тока. При этом форма тока задана биэкспоненциальной функцией (2), которая с учетом рассчитанных декрементов в Simulink имеет вид (рис.10):

$$100000/e^{-0,017} \cdot (e^{(-14300 \cdot u)} - e^{(-6 \cdot u)}).$$

Внутреннее сопротивление канала молнии принято равным 300 Ом [3]. Форма импульса разряда молнии принимается отрицательной (рис.10), что реализуется на практике в большинстве случаев [3].

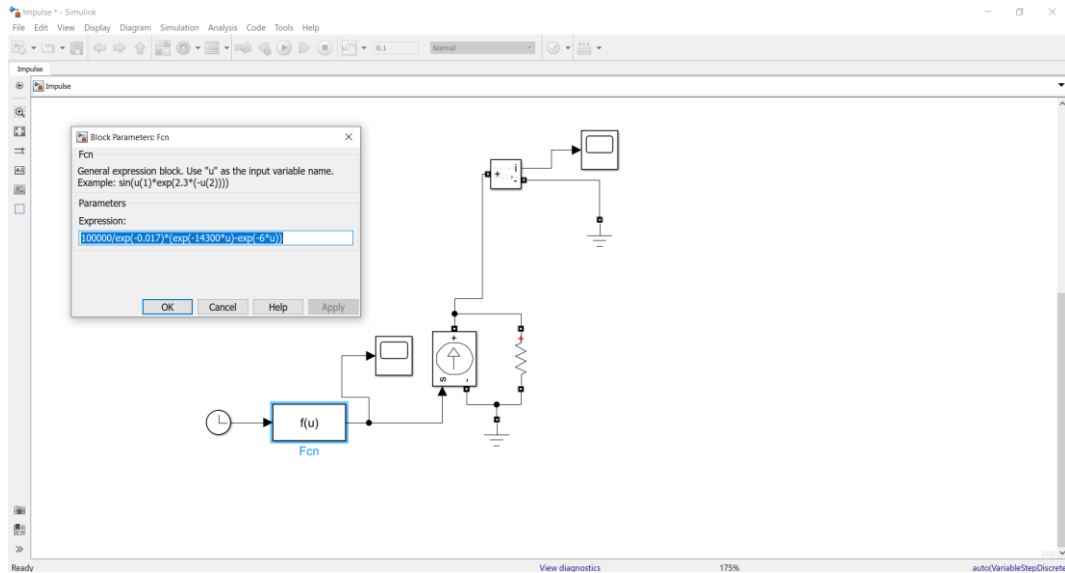


Рис. 9. Генератор импульса тока

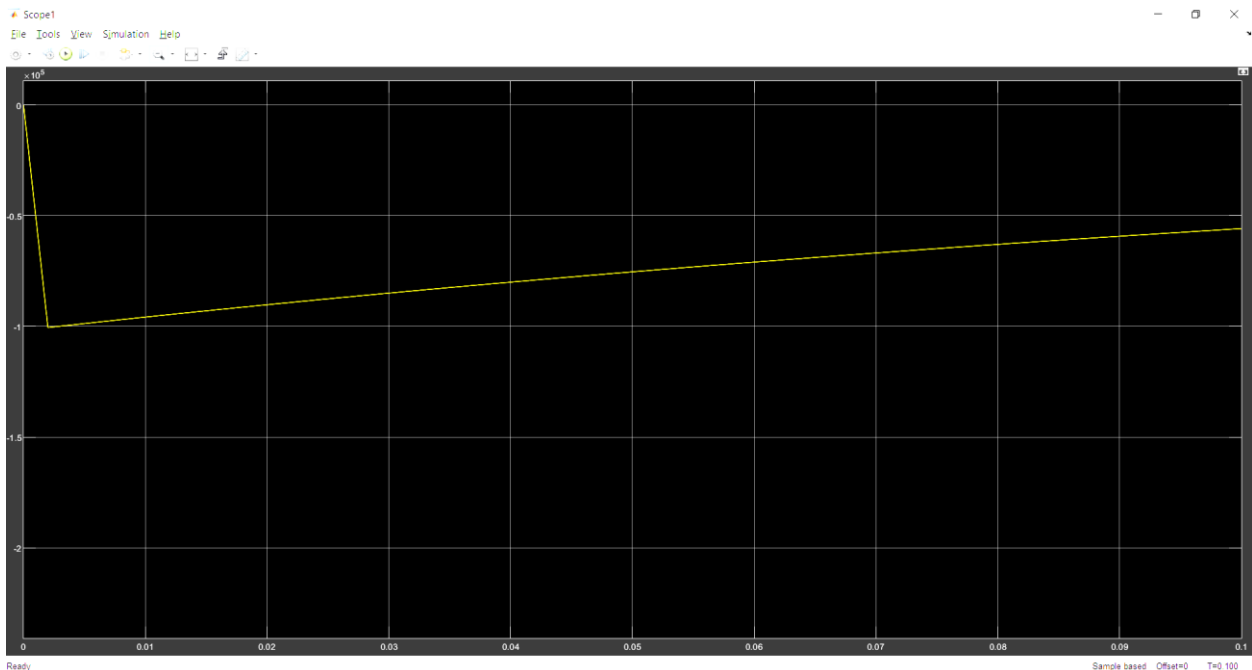


Рис. 10. Форма кривой тока молнии

Описанные математические модели и их программная реализация составили основу компьютерной модели для анализа грозовых перенапряжений в ЛЭП.

Комплекс включает такие элементы, как Simulink-модель воздушной линии, блок для расчета эквивалентных параметров воздушной линии номинальным напряжением 220 кВ, Simulink-модель опоры ВЛ, блок задания формы разрядного тока молнии, блоки измерения

импульсных напряжений в элементах линии. Он является открытой системой, которая после внесения необходимых изменений может использоваться для моделирования переходных процессов и различных видов перенапряжений в воздушных линиях электропередачи и других классов напряжений.

На рис.11, 12 представлены результаты моделирования переходных процессов (кривая мгновенного значения тока в фазном проводе «А», А; кривая действующего значения тока в фазном проводе «А», А; кривая мгновенного значения фазного напряжения А-0, А; кривая действующего значения фазного напряжения А-0, А) при ПУМ в фазный провод и грозозащитный трос в пролете опор ЛЭП № 2-3.

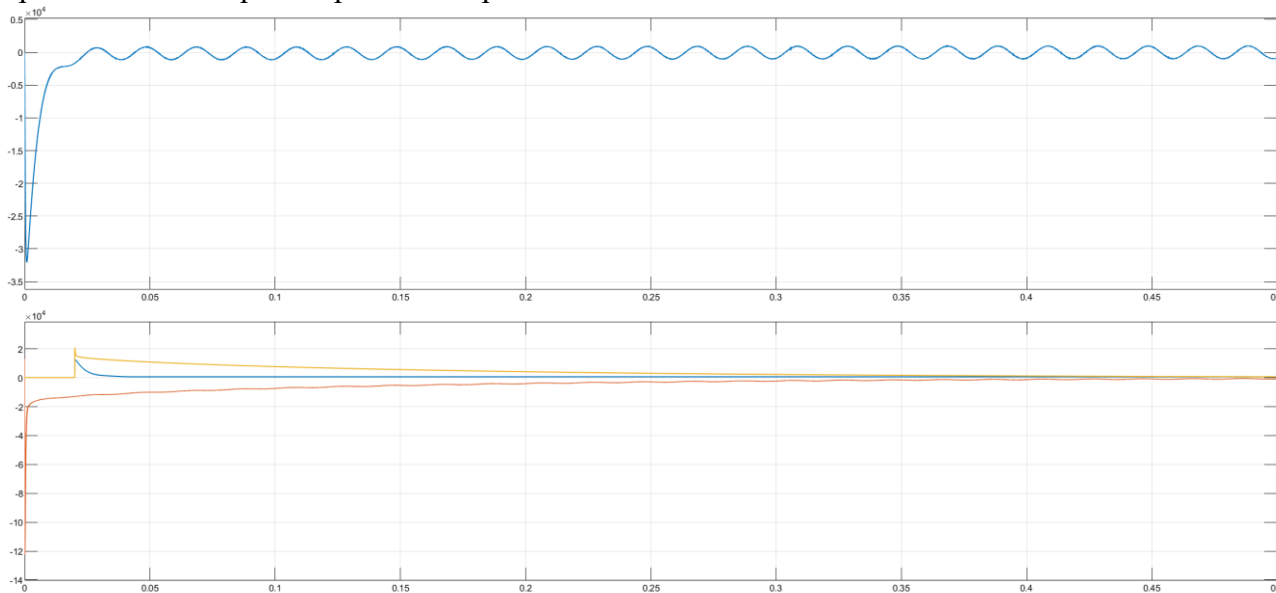


Рис. 11. Результаты моделирования переходных процессов

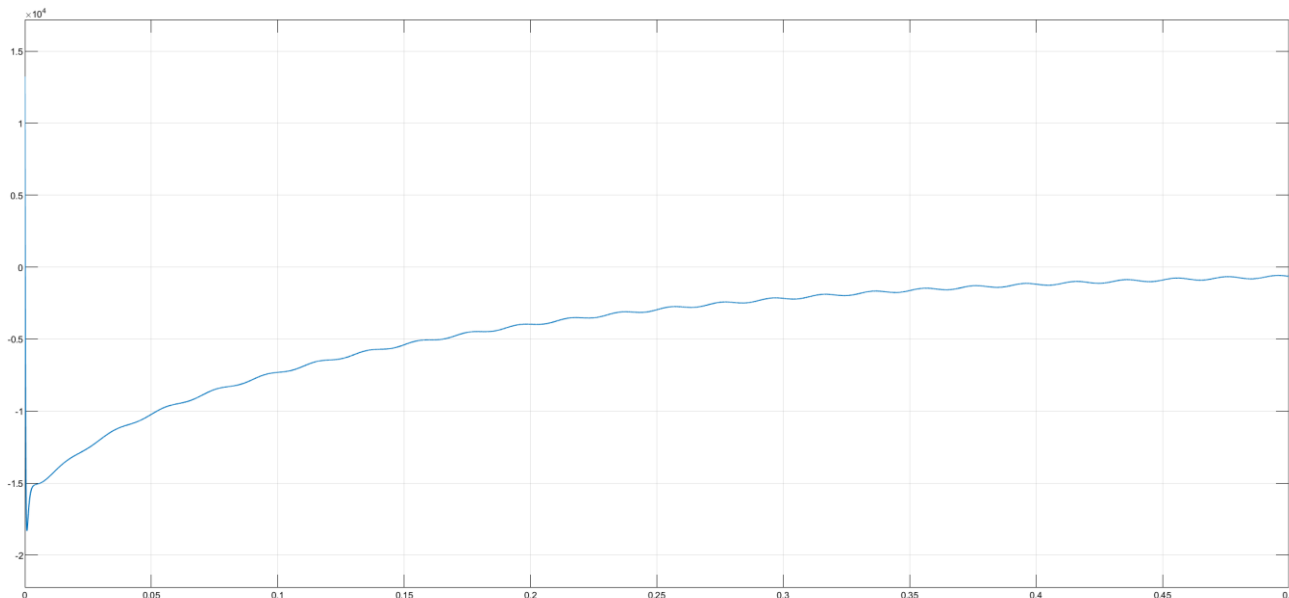


Рис.12. Кривая импульсного тока молнии, протекающего через заземляющее устройство опоры № 2 при ПУМ в грозотрос в середине пролета опор № 2-3

Заключение

Для оценки эффективности средств молниезащиты, в том числе и альтернативных средств (например, подвеска ограничителей перенапряжений на опорах ЛЭП), используемых в случае недостаточной грозоупорности линий, а также выявления особенностей различного рода переходных процессов широко применяются различные средства компьютерного моделирования, в частности, пакет программ Matlab [13].

В соответствии с поставленной задачей в программном продукте Simulink Matlab создана компьютерная модель ЛЭП, состоящая из шести опор, с заземляющими устройствами, и учитывающая результаты исследований [1-3]. Модель позволяет моделировать прямые удары молний со стандартной амплитудой тока 100 кА (или произвольно заданной) в фазные провода и грозозащитный трос в середине пролета опор ЛЭП, а также в опору ЛЭП. В модели имеется возможность изменения параметров ЛЭП, таких как: сопротивление заземляющего устройства опор, сопротивление и емкость проводов и грозозащитных тросов, емкость гирлянды изоляторов, взаимная индуктивность проводов и грозотросов, кроме того можно изменить форму, полярность и амплитуду грозового импульса. В работе показаны графики, полученные при моделировании нескольких аварийных событий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Выбор модели опоры ВЛ 35-220 кВ при анализе грозовых перенапряжений // труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – С.112-118. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17942105> (дата обращения – 05.05.2021).
2. Киселев А.Ю., Пинчуков П.С. Повышение грозоупорности магистральных линий электропередачи Объединенной энергосистемы Востока // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – 2021. – Том 2. С.23-28.
3. Подольцев А.Д. Компьютерное моделирование грозовых перенапряжений в высоковольтной воздушной линии электропередачи // труды Института электродинамики НАН Украины. – 2017. С.94-106. – вып.16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29077287> (дата обращения – 17.03.2021).
4. Халилов Ф.Х., Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г. Оценка степени влияния допущений на результаты моделирования переходных процессов при ударах молнии в воздушные линии электропередачи // вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2011. – С.133-138. – 2(30). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17993612> (дата обращения – 05.05.2021).
5. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 92 с.
6. Письмо ПАО «Транснефть» от 05.07.2021 № ПАО-03-00-06/26896 «О надежности электроснабжения объектов ПАО «Транснефть».
7. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений / Под редакцией Д.В. Разевига. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 472 с.
8. РД 153-34.3-35.125–99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. [Электронный ресурс] – URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rd_153-34_3-35_125-99.pdf (дата обращения: 09.03.2021).
9. Reynaldo Iracheta Cortez, Norberto Flores-Guzmán, Rogelio Hasimoto-Beltran. Efficient Simulation of Electromagnetic Transients in Power Networks. Proceedings of the 2015 IEEE thirty fifth central American and Panama convention (Concapan XXXV). – November 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/298671412_Efficient_Simulation_of_Electromagnetic_Transients_in_Power_Networks (дата обращения – 16.05.2021). DOI: 10.1109/CONCAPAN.2015.7428497.
10. МИИТ: материал к лекции №11: «Исследование трёхфазных линейных электрических цепей в среде MatLab/Simulink». [Электронный ресурс]. URL: http://dvandreev.ru/TLEC/LekciaN11_Three_Phase_TLEC.pdf (дата обращения – 05.05.2021).
11. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.: ил.
12. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных передачах высокого напряжения. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

13. Гнедин П.В. Power System Blockset For Use With Simulink / User's Guide (перевод). – Version 2. – 488 с. URL: [https://777russia.ru/book/uploads/ /ОСНОВЫ%20РОБОТОТЕХНИКИ/Гнедин/Гнедин%20П.%20-%20Power%20System%20Blockset.pdf](https://777russia.ru/book/uploads/ОСНОВЫ%20РОБОТОТЕХНИКИ/Гнедин/Гнедин%20П.%20-%20Power%20System%20Blockset.pdf) (дата обращения – 16.05.2021).

REFERENCES

1. Khalil, F. H., G. G. Khokhlov model Selection of support 35-220 kV in the analysis of lightning overvoltage //proceedings of the Kola scientific center of RAS. – 2011. – С. 112-118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17942105> (date of circulation 05.05.2021).

2. Kiselev, A., Pinchuk, P. S. Improving grotophorst transmission lines of the United energy system of Ukraine // Scientific-technical and economic cooperation of the countries of the Asia-Pacific region in the twenty-first century / far East state University of Railways. - 2021. - Volume 2. pp. 23-28.

3. Podoltsev A.D. Computer modeling of lightning overvoltages in a high-voltage overhead power transmission line // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. - 2017. С. 94-106. - issue 16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29077287> (accessed 17.03.2021).

4. Khalilov F. H., Gumerova N. I., Khokhlov G. G. Assessment of the degree of influence of assumptions on the results of modeling transient processes during lightning strikes in overhead power lines // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences. - 2011. - С. 133-138. –2(30). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17993612> (date of application-05.05.2021).

5. Dmitriev M. V. Application of OPN for insulation protection of 6-750 kV overhead lines. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. un-ta, 2009 – - 92 p.

6. Letter of PJSC "Transneft" dated 05.07.2021 No. PAO-03-00-06/26896 " On the reliability of power supply to the facilities of Transneft, PJSC.

7. Razevig D. V. High voltage technology / Edited by D. V. Razevig. M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. - 472 p.

8. RD 153-34. 3-35.125-99. "Guidelines for the protection of electrical networks 6-1150 kV from thunderstorms and internal overvoltages".

9. Reynaldo Iracheta Cortez, Norberto Flores-Guzmán, Rogelio Hasimoto-Beltran. Efficient Simulation of Electromagnetic Transients in Power Networks. Proceedings of the 2015 IEEE thirty-fifth central American and Panama convention (Sopsarap XXXV). - November 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/298671412_Efficient_Simulation_of_Electromagnetic_Transients_in_Power_Networks (accessed 16.05.2021). DOI: 10.1109/CONCAPAN.2015.7428497.

10. МИТ: material for lecture No. 11: "Research of three-phase linear electrical circuits in the MatLab/Simulink environment". [electronic resource]. URL: http://dvandreev.ru/TLEC/LekciaN11_Three_Phase_TLEC.pdf (accessed 05.05.2021).

11. Chernykh I. V. Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink. - Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Peter, 2008. - 288 p.: il.

12. Kostenko M. V., Kadomskaya K. P., Levinstein M. L., Efremov I. A. Overvoltages and protection against them in high-voltage air and cable transmissions. - L.: Nauka, 1988 – - 302 p.

13. Gnedin P. V. Power System Blockset For Use With Simulink / User's Guide (translation). - Version 2 – - 488 p. URL: <https://777russia.ru/book/uploads // FUNDAMENTALS OF%20ROBOTONICS/Gnedin/Gnedin%20P.%20-%20Power%20System%20Blockset.pdf> (accessed 16.05.2021).

Информация об авторах

Киселев Артем Юрьевич – магистрант, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: rs_art@mail.ru

Пинчуков Павел Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры «Системы электроснабжения», директор Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: dee@festu.khv.ru

Information about the author

Artem Yuryevich Kiselev – Master's degree student, Far Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk, e-mail: rs_art@mail.ru

Pavel Sergeevich Pinchukov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of "Power Supply Systems", Director of the Electric Power Institute, Far Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk, e-mail: dee@festu.khv.ru