

Электротехника

УДК 621.316.91

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПУЩЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ В ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Н.И. Гумерова¹, Ф.Х. Халилов¹, Г.Г. Хохлов¹, И.А. Косорлуков²

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

² Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Сделана оценка степени влияния различных упрощений и допущений в физической модели ВЛ при моделировании переходного процесса от удара молнии.

Ключевые слова: *моделирование, молния, грозоупорность, количество грозовых отключений.*

Повышение грозоупорности воздушных линий электропередачи (ВЛ) в настоящее время является актуальной задачей, так как значительная часть суммарного числа отключений линии вызвана грозовой деятельностью. С развитием вычислительной техники для оценки эффективности различных мероприятий по молниезащите появилась возможность применения методик, основанных не только на применении аналитических формул, но и на непосредственном расчете переходных процессов в линиях при ударах в них молнии. При таком подходе к анализу грозовых перенапряжений в ВЛ и эффективности грозозащитных мероприятий невозможно обойтись без ряда допущений в модели линии.

В данной статье сделана попытка оценить степень влияния различных допущений на интегральный результат расчета грозоупорности ВЛ – суммарное количество грозовых отключений линии в год. То есть установить, какими элементами схемы расчета переходного процесса при ударах молний в линии можно пренебречь. Для этого в пакете визуального программирования Simulink был создан ряд моделей ВЛ, в котором присутствовали модели, реализующие различные схемы замещения ВЛ. По результатам расчетов в этих моделях можно судить о степени влияния принимаемых допущений.

Для выявления степени влияния того или иного фактора в качестве примера были проведены расчеты числа грозовых отключений в год $N_{ОТК}$ для ВЛ 150 кВ, выполненной из опор ПБ150-1 (длина пролета 300 м, один молниезащитный трос С70 на

Натэлла Идрисовна Гумерова – д.т.н., профессор.

Фирудин Халилович Халилов – к.т.н., доцент.

Григорий Григорьевич Хохлов – аспирант.

Игорь Андреевич Косорлуков – аспирант.

вершине опоры, провода АС120/19). Расчеты выполнялись для длины линии 100 км, 100 грозовых часов и без учета АПВ.

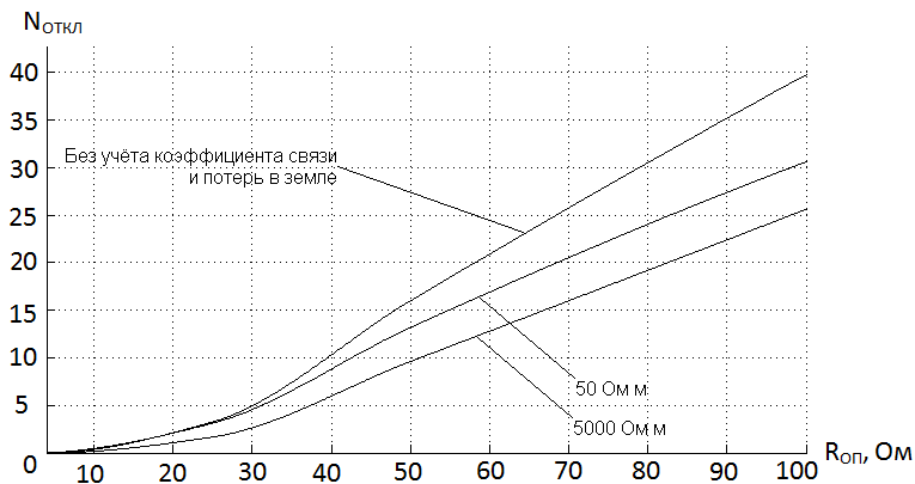
Для определения значения $N_{ОТК}$ в каждой расчетной модели находилась кривая опасных токов (КОТ): для ряда значений длин фронтов импульса тока молнии τ_ϕ находится минимальная величина амплитуды импульса I_{\max} , при которой происходит перекрытие хотя бы одной гирлянды изоляторов на любой из опор моделируемого участка линии. Из этих пар чисел вычислялись скорости нарастания токов молний I'_{\max} . Вероятность перекрытия линейной изоляции находилась путем вычисления двойного интеграла произведения плотностей вероятностей амплитуд и крутизны токов молнии. Эти распределения задавались законом Вейбулла [1]: $P(I > I_{\max}) = \exp\left(-\frac{1}{26} \cdot I_{\max}\right)$ и $P(I' > I'_{\max}) = \exp\left(-\frac{1}{15,7} \cdot I'_{\max}\right)$. Следует отметить, что при таком определении вероятностей для построения КОТ можно ограничиться с приемлемой точностью для оценки числа отключений тремя точками.

Импульс молнии моделируется косоугольным импульсом тока молнии с длиной фронта τ_f , временем полуспада волны τ_t и максимальным значением тока I_{\max} . На интегральный показатель числа грозовых отключений наибольшее влияние имеют τ_ϕ и I_{\max} . Стоит отметить, что в практических расчетах задач молниезащиты (за исключением расчета энергоемкости ОПН) моделируется только первый импульс молнии, так как вероятность перекрытия линейной изоляции при воздействии последующих импульсов на порядок меньше [2].

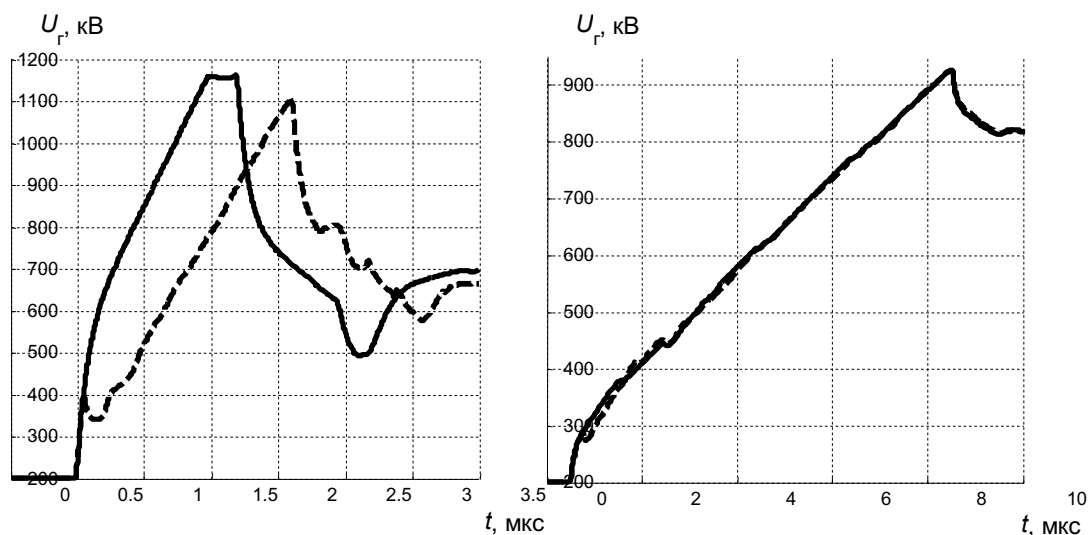
Участки ВЛ между пролетами моделировались многопроводными однородными линиями. Параметры таких многопроводных линий рассчитывались с учетом проникновения электромагнитного поля в землю посредством расчета глубины, на которой находится нулевой потенциал. Данная глубина зависит от удельной проводимости грунта и частоты импульса перенапряжения $h_E = f(\rho_g, f_{imp})$. Расчет h_E выполнялся на частоте, характерной для фронта импульса. Потери в земле, определяемые с учетом скин-эффекта, моделировались при помощи асимптотических приближений интеграла Карсона.

Данный способ моделирования участка ВЛ достаточно точно отражает связь между проводами и тросами. Отсутствие в методике учета связи между проводами и потерь в земле приводит к ощутимой погрешности в результатах (рис. 1).

Импульсная корона на проводах и тросах моделировалась представлением линии в виде последовательных отрезков длиной l_k . При превышении напряжения начала короны на каждом из таких участков включается дополнительная сосредоточенная динамическая емкость $C_d \cdot l_k$ [3]. Значение такой емкости зависит от напряжения на соответствующем участке линии $C_d = f(U)$. Длину участка линии C_d достаточно принять равной 50-70 м. Как только напряжение на фронте волны превосходит напряжение начала короны (200-300 кВ для нерасщепленных проводов), увеличивается сглаживание фронта волны. Таким образом, импульсная корона оказывает существенное влияние на результаты расчета грозоупорности ВЛ. Из рис. 2, а видно, что напряжение на гирлянде изоляторов существенно снижается за счет действия импульсной короны при ударе в ВЛ молнии с коротким фронтом. Однако влияние импульсной короны менее ощутимо при воздействии молний с более пологими фронтами (рис. 2, б).



Р и с. 1. Влияние учета потерь в земле и связи между проводами на зависимость $N_{откл}$ от импульсного сопротивления опор при различных значениях удельного сопротивления грунта

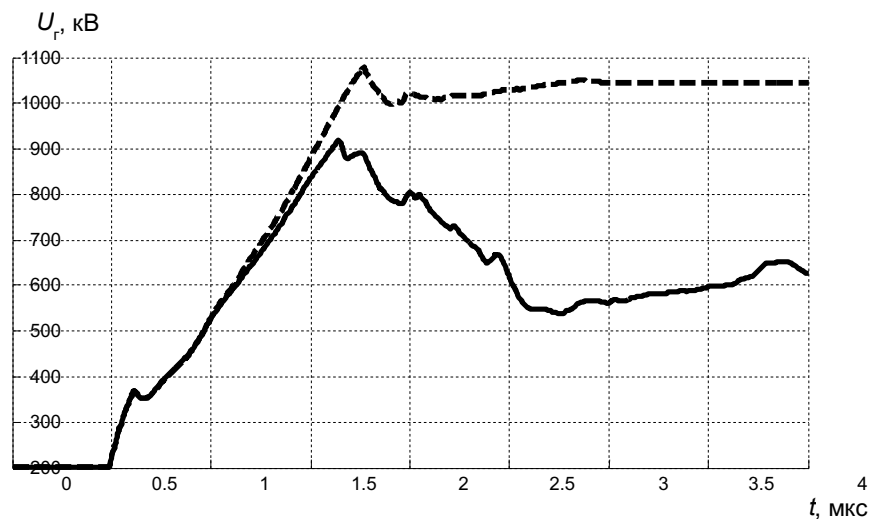


Р и с. 2. Напряжения на нижней гирлянде изоляторов опоры:
а – длина фронта импульса молнии 1,2 мкс; б – длина фронта импульса молнии 8 мкс
— — — с учетом импульсной короны; ————— без учета импульсной короны

Напряжение на проводе складывается из напряжения, вызванного ударом молнии, и рабочего напряжения. Удар молнии в линию может произойти при любом мгновенном значении фазного напряжения. Переходные процессы, вызванные ударом молнии, почти полностью заканчиваются за время, приблизительно равное $100 \div 200$ мкс, поэтому рабочее напряжение можно рассматривать как постоянное во времени $u_p(t) = const$. Расчеты при разных мгновенных значениях рабочего напряжения показали, что мгновенное значение рабочего напряжения изменяет величину $N_{откл}$ на 10-20% (в зависимости от сопротивления заземления опоры). Наибольшее количество

отключений происходит, когда на проводе нижней фазы мгновенное значение напряжения имеет полярность, противоположную полярности молнии ($\varphi_0 = 30^\circ$).

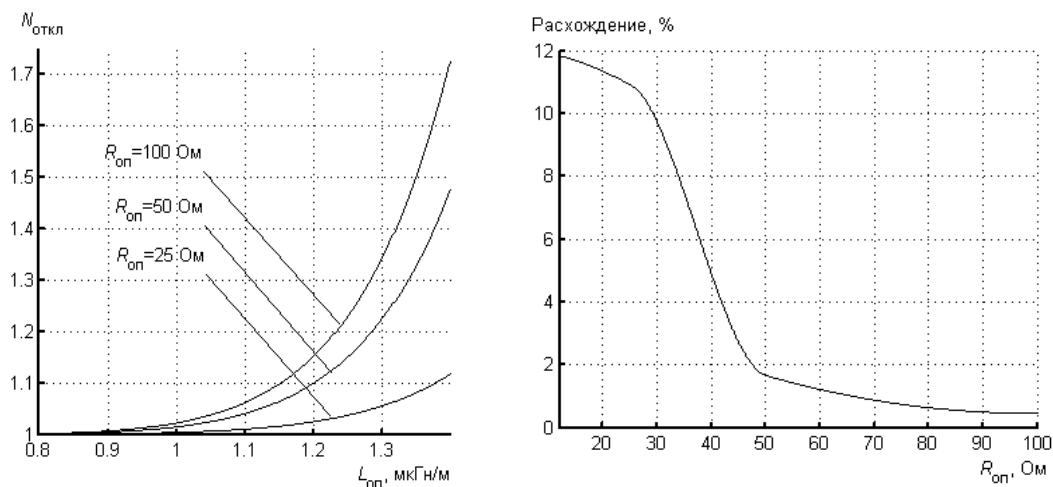
При разработке методики расчета важным вопросом является минимальное количество опор в модели, позволяющее произвести корректный расчет переходного процесса. Отраженные волны от соседних опор существенно снижают величину напряжения на гирляндах изоляторов пораженной опоры (рис. 3), поэтому количество, рассчитанное с учетом только одной опоры, будет завышенным. С другой стороны, за счет стекания тока в землю на соседних опорах и потерь при распространении волн перенапряжений за счет импульсной короны и конечного сопротивления проводов и грунта напряжение на гирляндах изоляторов опор, удаленных от места удара молнии, будет существенно ниже, чем в месте удара. Расчет в моделях с разным количеством опор показал, что глубину распространения грозового перенапряжения в ВЛ можно оценить участком в 4-6 опор. Увеличение количества опор в модели линии сверх шести дает уточнение конечного результата не более чем на 2%.



Р и с. 3. Напряжения на гирляндах изоляторов:
 — с учетом соседних опор; — — — без учета соседних опор

Расчеты в моделях с различными схемами замещения опор ВЛ показали, что без особой погрешности для результата достаточно использовать схему замещения опоры, учитывающую индуктивности тела опоры между траверсами. Учет индуктивностей траверс и емкости тела опоры на землю не дает значительного (более 5%) уточнения результатов.

Значение погонной индуктивности тела опоры L_{noz} зависит от типа опоры и лежит в пределах от 0,5 мкГн/м (металлическая опора с оттяжками) до 1,5 мкГн/м (портальная деревянная опора). Из графика (рис. 4, а) видно, что значение погонной индуктивности тела опоры начинает влиять на суммарное количество грозовых отключений, только если оно превышает 1,1 мкГн/м. Варьирование L_{noz} в меньших пределах не изменяет значения $N_{отк}$.



Р и с. 4. Влияние погонной индуктивности тела опоры и индуктивности между опорой и каналом молнии на количество грозových отключений:

а – увеличение числа отключений с увлечением индуктивности тела опоры;
б – расхождение в расчетах при учете и без такого учета

Напряжение на опоре, пораженной молнией, содержит, кроме падения напряжения на сопротивлении заземления и индуктивностях тела опоры, еще составляющую, вызванную индуктивной связью между каналом молнии и телом опоры. Коэффициент взаимной индукции вертикального участка тела опоры описывается выражением $M_{OM} = M'_{OM} \cdot h$. M'_{OM} принимается равным 0,2 мкГн/м. Вклад такого снижения напряжения в суммарное количество грозových отключений ВЛ составляет 12% при низких значениях сопротивления опоры (рис. 4, *б*) и быстро падает при увеличении сопротивления заземления.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- при использовании распределения амплитуд токов молнии и скоростей их нарастания, описанных законом Вейбулла, для построения КОТ можно ограничиться тремя точками с приемлемой точностью для оценки числа отключений;
- коэффициент связи и потери в земле за счет проникновения электромагнитного поля в грунт существенно снижают годовое количество грозových отключений линии;
- импульсная корона приводит к увеличению времени нарастания напряжения и снижению его максимального значения на гирляндах изоляторов при импульсах молнии с короткими фронтами;
- наибольшее количество отключений происходит при полярности рабочего напряжения нижней фазы на опоре, противоположной полярности молнии ($\varphi_0 = 30^\circ$);
- для расчета переходного процесса при ударе молнии в ВЛ достаточно использовать модель, состоящую из 6 опор;
- схема замещения опоры ВЛ, учитывающая индуктивности тела опоры только между траверсами, дает достаточно точный результат;
- варьирование значения погонной индуктивности тела опоры в пределах до 1,1 мкГн/м практически не влияет на годовое количество грозových отключений;
- учет взаимной индуктивности между телом опоры и каналом молнии изменяет конечное количество грозových отключений линии в год ориентировочно на 12% при малых сопротивлениях заземления опоры и снижается до 2% при увеличении сопротивления заземления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кадомская К.П., Костенко М.В., Левинштейн М.Л.* Теория вероятности и ее приложения к задачам электроэнергетики. – СПб.: Наука, 1992.
2. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под ред. Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
3. *Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И.* Анализ надежности грозозащиты подстанций. – Л.: Наука, 1981. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2011 г.

UDC 621.316.91

ASSESSING THE IMPACT OF ASSUMPTIONS ON THE RESULTS OF THE SIMULATION OF TRANSIENTS IN LIGHTNING STRIKES IN THE TRANSMISSION LINE

N.I. Gumerova¹, F.Ch. Chalilov¹, G.G. Hohlov¹, I.A. Kosorlukov²

¹ St. Petersburg State Polytechnical University
29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The article presents an assessment of the influence of various simplifications and assumptions in the physical model of transmission line in the modeling of the transition process of lightning strike in the calculation of the number of lightning outages.

Key words: *modeling, lightning, lightning proofness, number of lightning outages.*

*N.I. Gumerova – Doctor of Technical Sciences, Professor.
F.Ch. Chalilov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
G.G. Hohlov – Postgraduate student.
I.A. Kosorlukov – Postgraduate student.*