

ВЛИЯНИЕ ТОКОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ НА ОСТАЮЩЕЕСЯ НАПРЯЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Троценко Е. А., Бржезицкий В. А., Маслюченко И. Н.

1. Введение

При решении задач грозозащиты для аппроксимации тока в канале молнии используются различные аналитические выражения. Несомненно, что правильный выбор вида аппроксимации волны тока молнии в канале разряда является одним из слагаемых достоверности получаемых результатов. Вместе с тем, аппроксимации волны тока молнии, которые не всегда точно описывают реальный ток в канале молнии, могут давать достаточно приемлемые результаты. Таким примером может быть общеизвестный двухэкспоненциальный импульс, уже много лет используемый для аппроксимации волн, как тока, так и напряжения. Двухэкспоненциальный импульс имеет производную, отличную от нуля в начальный момент времени. В то же время, из натуральных осциллограмм токов молнии известно, что волна тока молнии характеризуется нулевым значением производной по времени в начальный момент времени. Тем не менее, использование двухэкспоненциального импульса дает приемлемые результаты. Например, в работе [1] показано, что независимо от того, имеет волна тока нулевую производную по времени в начальный момент времени или нет, на остающееся напряжение на нелинейном ограничителе перенапряжений (ОПН) это не влияет. Для того чтобы аналитическую форму тока можно было использовать на практике, вначале необходимо вычислить амплитудно-временные параметры импульсной волны по заданным длительностям фронта и импульса. Например, для вышеупомянутой двухэкспоненциальной волны таких параметров три: нормирующий множитель для амплитуды волны и два коэффициента затухания экспонент. С усложнением аналитического описания волны тока молнии усложняется и определение её амплитудно-временных параметров [2]. При использовании кусочно-линейных функций задача значительно упрощается. Считается, что волна тока линейно возрастает до своего максимального значения, а затем также линейно уменьшается до половины своего амплитудного значения. Это несомненно является упрощением, так как становится возможным задавать импульсы с любым соотношением длительности фронта и длительности импульса без сложных вычислений. Предполагается, что ток в канале молнии можно аппроксимировать треугольным импульсом, поскольку длительность фронта меньше длительности импульса. В частности треугольные импульсы часто используются при оценке энергетических нагрузок на ОПН [3].

В связи с этим актуальными являются исследования возможности применения кусочно-линейных импульсов тока и напряжения также и для оценки возможных значений грозовых и коммутационных перенапряжений.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования является величина и форма остающегося напряжения, которое возникает между выводами моделей ОПН, при воздействии на них импульсов тока и напряжения кусочно-линейной формы. Одним из наиболее проблемных мест в данной задаче является аппроксимация коммутационных импульсов тока малой длительности. С помощью хорошо известного двухэкспоненциального импульса невозможно описать импульс, у которого длительность импульса T_2 вдвое больше длительности фронта T_1 . В то же время коммутационные импульсы тока в каталогах фирм-производителей ОПН имеют именно такое соотношение (30/60 или 45/90 мкс). Также может встречаться значение остающегося напряжения при крутом импульсе тока формой 1/2 мкс с таким же соотношением. Достаточно сложное выражение было применено в работе [4] для аппроксимации импульса формой 45/90 мкс. С помощью кусочно-линейной аппроксимации можно, минуя сложные вычисления, описать импульсы практически любой формы, в том числе коммутационные импульсы тока и срезанные импульсы напряжения.

В каталогах своей продукции производители ОПН указывают несколько значений остающегося напряжения на ОПН при коммутационных и грозовых импульсах тока разной формы и амплитуды. В той или иной программе схемотехнического моделирования можно определить остающееся напряжение на ОПН при протекании сквозь него коммутационных и грозовых импульсов тока кусочно-линейной формы. Последующее сопоставление полученных результатов со значениями, указанными в каталоге, позволит оценить применимость импульсов такой формы.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является оценка погрешности вычисления остающегося напряжения на нелинейном ограничителе перенапряжений при использовании кусочно-линейных функций для описания формы волн тока и напряжения, воздействующих на аппарат при ударах молнии. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определение остающегося напряжения и соответствующей погрешности расчета при воздействии на модель нелинейного ограничителя перенапряжений коммутационных, грозовых и импульсов тока с крутым фронтом (кусочно-линейной формы).

2. Сравнение результатов с полученными ранее в работе [4] значениями остающегося напряжения при воздействии на модель нелинейного ограничителя перенапряжений импульсов тока, описываемых гладкими (непрерывно дифференцируемыми) функциями.

4. Исследование существующих решений проблемы

Обзор различных аналитических выражений для импульса тока молнии в канале разряда дан в работах [2, 5]. Единой общепринятой для разных задач формулы не существует. Для определения энергетических нагрузок на ОПН, а также для оценки риска повреждения ОПН при ограничении грозовых перенапряжений в работах [3, 6–9] использовались волны тока, которые нарастают и затухают линейно. В работе [10] для определения напряжения на вершине опоры линии электропередачи при прямом ударе молнии также использовались волны тока, нарастающие и затухающие линейно. В работе [11] для расчета многократных отражений и преломлений электромагнитной волны в разветвленной кабельной сети использовался аналогичный треугольный импульс напряжения, нарастающий и затухающий линейно. В работах [12, 13] рекомендуется перед тем, как применять модель ОПН в схемах реальных электрических сетей, протестировать её с использованием треугольных, то есть кусочно-линейных, импульсов тока.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод, что влияние токов кусочно-линейной формы на остающееся напряжение ОПН остается недостаточно изученным.

5. Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы методы: кусочно-линейной аппроксимации и схемотехнического моделирования на персональном компьютере. Основными материалами исследований являются полная и упрощенная схема замещения ОПН.

6. Результаты исследований

Как и в своих предыдущих публикациях [1, 4], авторы продолжают работу по моделированию ОПН с помощью демонстрационной версии программы Micro-Cap 11, разрабатываемой компанией Spectrum Software (Соединенные Штаты Америки) [14]. Основная схема исследования показана на рис. 1. Эта схема соответствует упрощенной модели ОПН [15].

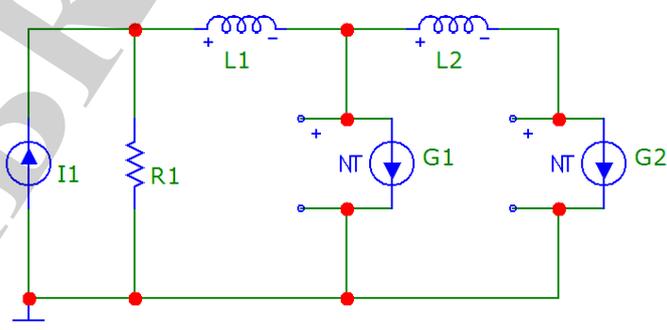


Рис. 1. Моделирование нелинейного ограничителя перенапряжений в демонстрационной версии Micro-Cap с помощью моделей источников тока G_1 и G_2 , управляемых напряжением (NTIofV)

На рис. 1 R_1 , L_1 и L_2 – линейные, а G_1 и G_2 – нелинейные элементы моделей ОПН. Методика определения этих параметров изложена, соответственно в [15]. В работах [1, 4] описаны два эквивалентных способа моделирования нелинейных элементов модели ОПН в демонстрационной версии программы Micro-Cap 11:

- 1) с помощью моделей источников тока, управляемых напряжением (NTIofV);
- 2) с помощью моделей источников напряжения, управляемых током (NTVofI).

Поскольку оба способа равнозначны, для исследования в этой работе выбран только один из них, в котором используются модели источников тока, управляемых напряжением (NTIofV). В данной работе была использована такая же модель ОПН с номинальным напряжением 108 кВ, как и в работе [4]. Индуктивные параметры модели равны, соответственно $L_1 = 0,947$ мкГн, $L_2 = 2,842$ мкГн [4]. Параллельный резистор R_1 имеет большое значение – от 1 МОм [1, 15] до 1000 МОм [4, 12] и помещен в схему для исключения ошибок вычисления [12, 15].

Источник тока I1 на рис. 1 – это источник кусочно-линейного сигнала, задаваемый таблично.

На рис. 2 показаны графики коммутационных импульсов тока формой 45/90 мкс и соответствующие им графики остающегося напряжения, полученные при моделировании.

Способы задания источников тока I1 в соответствии с синтаксисом Micro-Cap [14] показаны в табл. 1.

На рис. 3 и показаны графики грозовых импульсов тока формой 8/20 мкс и соответствующие им графики остающегося напряжения, полученные при моделировании.

Остающееся напряжение на ОПН достигает максимальных значений при протекании через него импульса 20 кА, 8/20 мкс (рис. 4, а) и импульса 10 кА, 1/20 мкс (рис. 4, б).



a



б



в



г

Рис. 2. Остающееся напряжение (внизу) при протекании через нелинейный ограничитель перенапряжений коммутационных импульсов тока (вверху) формой 45/90 мкс разной амплитуды: *a* – 0,25 кА; *б* – 0,50 кА; *в* – 1,0 кА; *г* – 2,0 кА

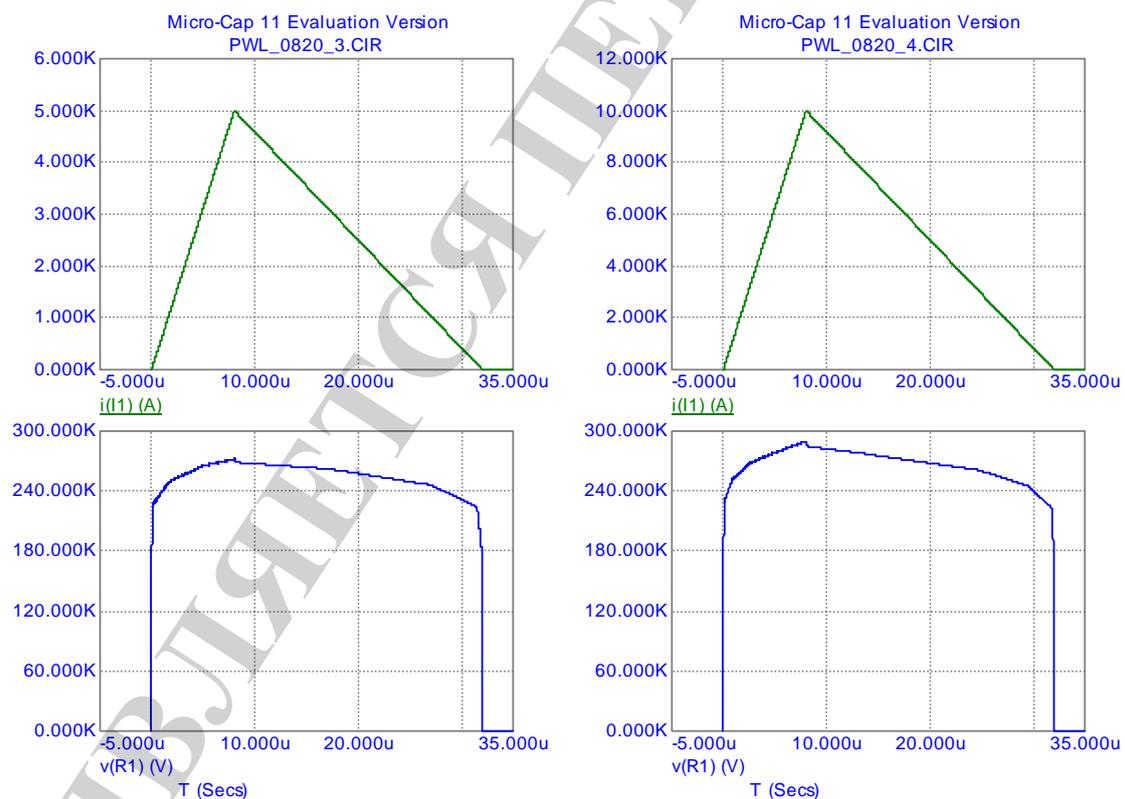
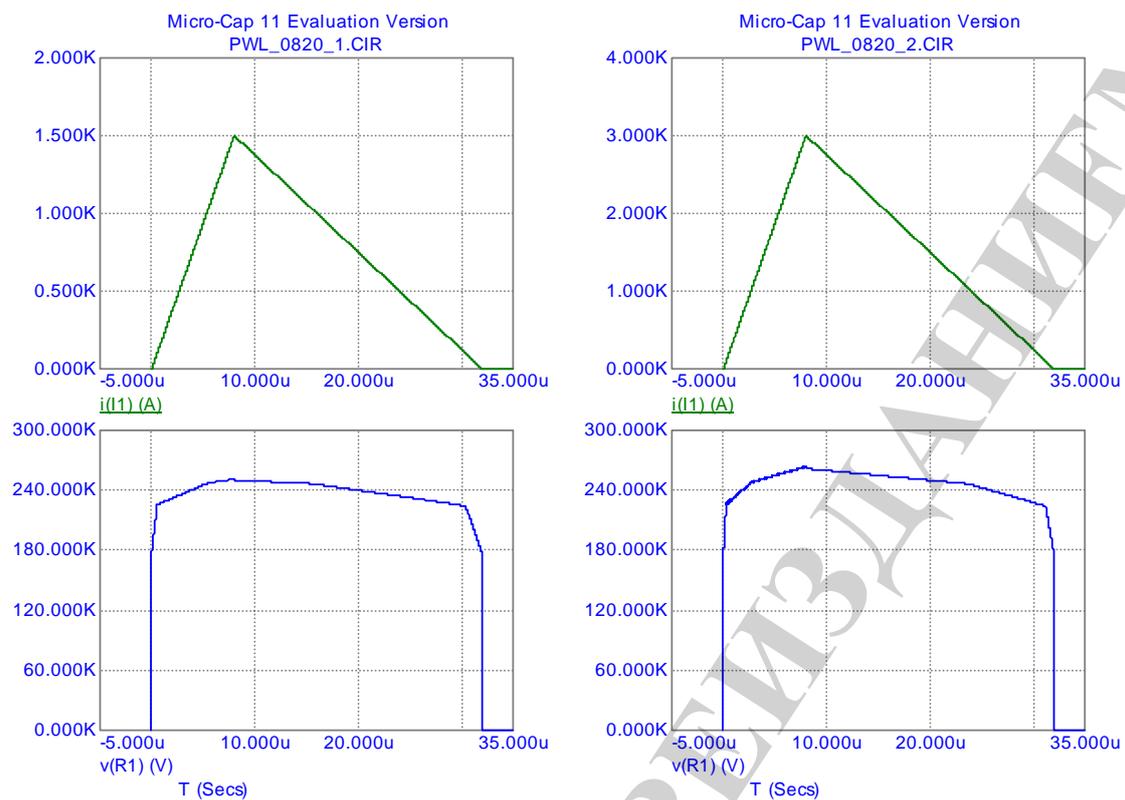


Рис. 3. Остающееся напряжение (внизу) при протекании через нелинейный ограничитель перенапряжений грозовых импульсов тока (вверху) формой 8/20 мкс разной амплитуды: *a* – 1,5 кА; *б* – 3,0 кА; *в* – 5,0 кА; *г* – 10,0 кА



a

б

Рис. 4. Остающееся напряжение (внизу) при протекании через нелинейный ограничитель перенапряжений импульсов тока (вверху) разной амплитуды и формы: *a* – 20 кА, 8/20 мкс; *б* – 10 кА, 1/20 мкс

Таблица 1

Треугольные импульсы в исследовании

№	Импульс (амплитуда, форма)	Определение в Micro-Cap
Импульсы тока (для схемы на рис. 1)		
1	0,25 кА, 45/90 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 45e-6, 0.25e3, 1.35e-4, 0
2	0,5 кА, 45/90 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 45e-6, 0.50e3, 1.35e-4, 0
3	1,0 кА, 45/90 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 45e-6, 1.0e3, 1.35e-4, 0
4	2,0 кА, 45/90 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 45e-6, 2.0e3, 1.35e-4, 0
5	1,5 кА, 8/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 8e-6, 1.5e3, 3.2e-5, 0
6	3,0 кА, 8/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 8e-6, 3.0e3, 3.2e-5, 0
7	5,0 кА, 8/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 8e-6, 5.0e3, 3.2e-5, 0
8	10,0 кА, 8/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 8e-6, 10.0e3, 3.2e-5, 0
9	20,0 кА, 8/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 8e-6, 20.0e3, 3.2e-5, 0
10	10,0 кА, 1/20 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 1e-6, 10e3, 3.9e-5, 0
Импульс напряжения (для схемы на рис. 6)		
11	400,0 кВ, 1,2/50 мкс	DC 0 AC 1 0 PWL 0, 0, 1.2e-6, 400e3, 9.88e-5, 0

Максимальные значения кривых остающегося напряжения на рис. 2–4, при протекании через ОПН треугольных импульсов тока приведены в табл. 2.

Для сравнения в табл. 2 в скобках приведены аналогичные значения, но при использовании гладких (непрерывно дифференцируемых) функций для описания разрядного тока эти данные взяты из работы [4].

В табл. 1, 2 относительная погрешность моделирования была вычислена по формуле:

$$\xi = \frac{V'_{rT_1/T_2} - V_{rT_1/T_2}}{V_{rT_1/T_2}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

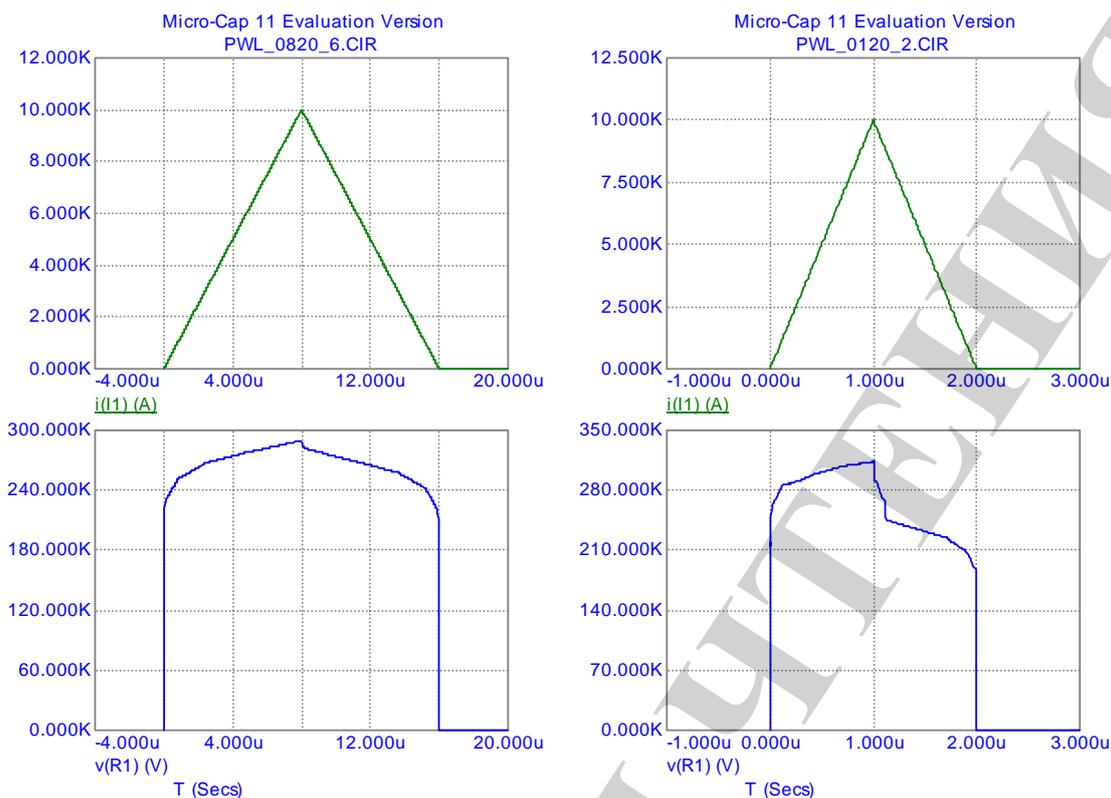
где V'_{rT_1/T_2} – значение остающегося напряжения при протекании сквозь ОПН треугольного импульса тока формы T_1/T_2 , полученные при схемотехническом моделировании; V_{rT_1/T_2} – соответствующие значения остающегося напряжения из каталога ОПН.

Таблица 2

Остающееся напряжение на модели нелинейного ограничителя перенапряжений при воздействии импульсов тока разной формы и амплитуды (в скобках аналогичные данные из [4])

№	Ток (амплитуда, форма)	Максимальное остающееся напряжение, кВ		Относительная погрешность, %
		каталог	моделирование	
1	0,25 кА, 45/90 мкс	206,0	228,30 (228,29)	+10,83 (+10,82)
2	0,5 кА, 45/90 мкс	214,0	234,31 (234,29)	+9,49 (+9,48)
3	1,0 кА, 45/90 мкс	223,0	246,08 (246,02)	+10,35 (+10,32)
4	2,0 кА, 45/90 мкс	236,0	254,55 (254,39)	+7,86 (+7,79)
5	1,5 кА, 8/20 мкс	241,0	251,16 (250,56)	+4,22 (+3,97)
6	3,0 кА, 8/20 мкс	254,0	263,69 (262,45)	+3,81 (+3,33)
7	5,0 кА, 8/20 мкс	263,0	272,02 (269,78)	+3,43 (+2,58)
8	10,0 кА, 8/20 мкс	285,0	290,01 (286,33)	+1,76 (+0,47)
9	20,0 кА, 8/20 мкс	316,0	313,25 (307,69)	-0,87 (-2,63)
10	10,0 кА, 1/20 мкс	315,0	313,51 (319,11)	-0,47 (+1,30)

Как видно из табл. 2, упрощение формы описания волны разрядного тока не оказывает заметного влияния на погрешность вычисления остающегося напряжения на ОПН. На значение остающегося напряжения на ОПН определяющее влияние оказывает длительность фронта волны разрядного тока и её амплитуда, а не длительность волны до полуспада. Поэтому, если необходимо оценить только максимальное значение остающегося напряжения, можно использовать импульсы тока, которые будут иметь вид равнобедренного треугольника [12, 13]. У такого импульса время нарастания до максимума равно времени спадания до нуля и соответственно равно длительности фронта волны разрядного тока. Это показано на рис. 5.



a

б

Рис. 5. Остающееся напряжение (внизу) при протекании через нелинейный ограничитель перенапряжений импульсов тока (вверху) в форме равнобедренного треугольника: *a* – 10 кА, 8/12 мкс; *б* – 10 кА, 1/1,5 мкс

Максимум остающегося напряжения при грозовом импульсе 10 кА, 8/20 мкс (треугольник, рис. 3, *з*) составляет 290,01 кВ. При упрощенном импульсе 10 кА, 8/12 мкс (равнобедренный треугольник на рис. 5, *a*) получаем практически то же значение 289,92 кВ. Аналогично при крутом импульсе 10 кА, 1/20 мкс (треугольник, рис. 4, *б*) максимум составляет 313,51 кВ. При упрощенном импульсе 10 кА, 1/1,5 мкс (равнобедренный треугольник, рис. 5, *б*) мы снова получаем практически то же значение, равное 313,42 кВ.

Предметом дальнейших исследований является процесс набегания волны напряжения на ОПН. Упрощенная схема для определения остающегося напряжения при набегании волны напряжения на ОПН показана на рис. 6.

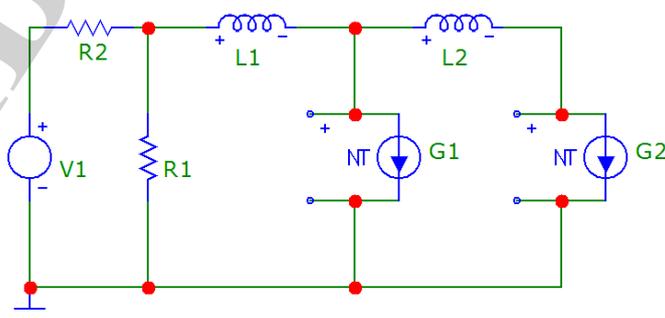


Рис. 6. Моделирование ограничения перенапряжений с помощью нелинейного ограничителя перенапряжений в демонстрационной версии Micro-Cap 11

На рис. 6 R_2 – резистор, представляющий волновое сопротивление воздушной линии электропередачи (принято равным 300 Ом); V_1 – источник напряжения кусочно-линейной формы (амплитудой 400 кВ формой 1,2/50 мкс). Кривые, полученные при моделировании, показаны на рис. 7.

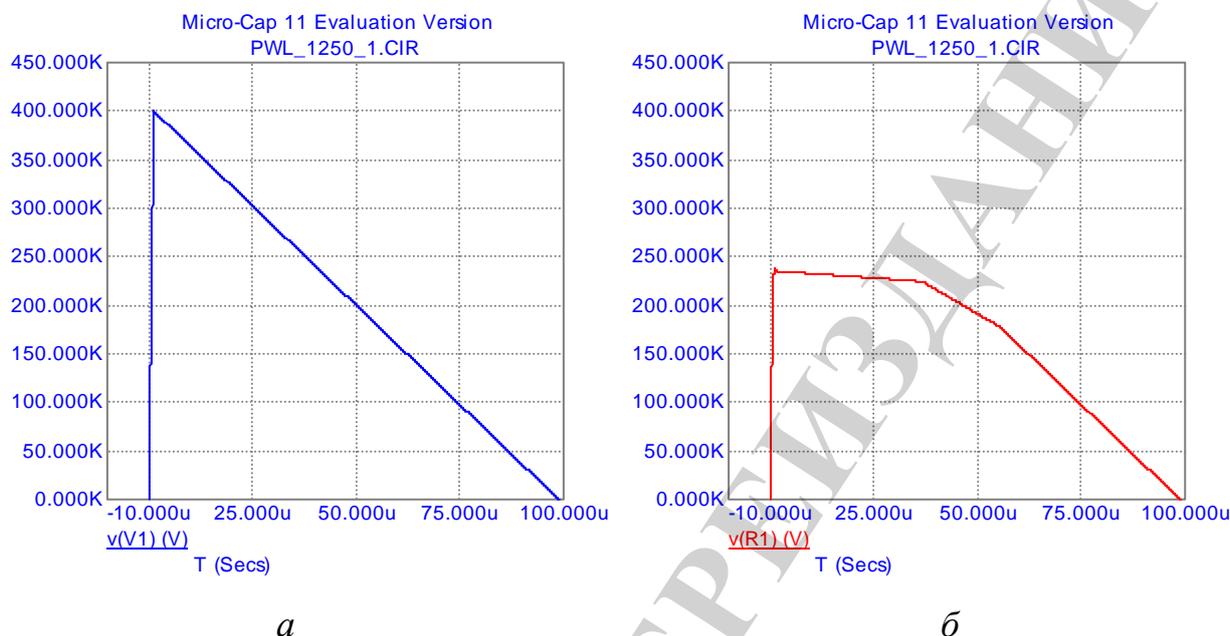


Рис. 7. Падение волны напряжения на нелинейный ограничитель перенапряжений: *а* – падающая волна 400 кВ, 1,2/50 мкс; *б* – остающееся (ограниченное) напряжение на ОПН

Как следует из рис. 7, ОПН снижает величину пикового значения переходного перенапряжения с 400 кВ до 238,77 кВ. Пиковое значение падения напряжения на резисторе, представляющем волновое сопротивление линии, составляет 161,23 кВ.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. К сильным сторонам предлагаемого подхода можно отнести:

- уменьшение потерь времени, затрачиваемых пользователем на определение амплитудно-временных параметров заданной волны тока молнии. При этом показано, что упрощение формы описания волны разрядного тока не оказывает заметного влияния на вычисление остающегося напряжения на ОПН;
- увеличение скорости вычисления на персональном компьютере. Программы схемотехнического моделирования быстрее обрабатывают схемы с простыми по форме источниками тока и напряжения.

Weaknesses. К слабым сторонам предлагаемого подхода можно отнести:

- отличие используемых функций от реальных осциллограмм токов молнии, характеризующихся нулевой производной в начальный момент времени;
- расчет выполнен в демонстрационной версии программы Micro-Cap. В профессиональной версии нет ограничения по максимальному количеству элементов в схеме, кроме того вычисления производятся несколько быстрее.

Opportunities. К дополнительным возможностям, которые предоставляет данный подход, можно отнести:

– простота описания одиночных импульсов тока и напряжения любой формы и амплитуды. Например, импульсов 1/2 мкс, 4/10 мкс, 2/70 мкс, 30/60 мкс, 10/350 мкс и других, которые используются на практике в задачах грозозащиты;

– моделирование тока молнии, состоящего из нескольких последовательных импульсов, с помощью только одного источника тока в расчетной схеме.

Threats. Предлагаемый подход не следует использовать для расчета перенапряжений в сетях сложной разветвленной структуры. Предлагаемый подход позиционируется только как вспомогательный, а не основной способ расчёта. Тем не менее, для его реализации необходим сотрудник со знанием как основ теории линейных и нелинейных электрических цепей, так и навыков схемотехнического моделирования.

8. Выводы

1. В демонстрационной версии программы Micro-Cap 11 рассчитано остающееся напряжение между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений при протекании через него разрядных токов разной формы, амплитуды и длительности. Используемые в данном исследовании модели источников тока представляют собой источники упрощенных по форме, треугольных импульсов.

2. Проведено сравнение полученных кривых остающегося напряжения с результатами, полученными ранее при использовании в аналогичной схеме гладких (непрерывно дифференцируемых) функций. Сопоставление позволяет заключить, что предлагаемое упрощение формы описания волны разрядного тока не оказывает существенного влияния на погрешность вычисления максимального значения остающегося напряжения на ОПН.

Литература

1. Trotsenko, Ye. Surge arrester modeling using Micro-Cap [Text] / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2016. – № 6/1 (32). – P. 26–30. doi:10.15587/2312-8372.2016.86137

2. Heidler, F. Calculation of lightning current parameters [Text] / F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 399–404. doi:10.1109/61.754080

3. Garcia-Gracia, M. Evaluation of the failure probability for gapless metal oxide arresters [Text] / M. Garcia-Gracia, S. Baldovinos, M. Sanz, L. Montanes // 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333). – 1999. – Vol. 2. – P. 700–705. doi:10.1109/tdc.1999.756136

4. Trotsenko, Ye. Study of surge arrester model under influence of various current pulses [Text] / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 1/1 (33). – P. 44–48. doi:10.15587/2312-8372.2017.92244

5. Gumerota, W. R. Current waveforms for lightning simulation [Text] / W. R. Gumerota, J. O. Elisme, M. A. Uman, V. A. Rakov // IEEE Transactions on

Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, № 4. – P. 880–888. doi:10.1109/temc.2011.2176131

6. Nakada, K. Energy absorption of surge arresters on power distribution lines due to direct lightning strokes-effects of an overhead ground wire and installation position of surge arresters [Text] / K. Nakada, T. Yokota, S. Yokoyama, A. Asakawa, M. Nakamura, H. Taniguchi, A. Hashimoto // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – Vol. 12, № 4. – P. 1779–1785. doi:10.1109/61.634205

7. Nakada, K. Analytical study on prevention methods for distribution arrester outages caused by winter lightning [Text] / K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa, T. Kawabata // IEEE Transactions on power delivery. – 1998. – Vol. 13, № 4. – P. 1399–1404. doi:10.1109/61.714514

8. Hassan, N. H. N. Analysis of arrester energy for 132 kV overhead transmission line due to back flashover and shielding failure [Text] / N. H. N. Hassan, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, H. A. Illias // 2012 IEEE International conference on power and energy (PECon). – 2012. – P. 683–688. doi:10.1109/pecon.2012.6450302

9. Annamalai, A. Sizing of surge arresters for 400 kV substation – A case study [Text] / A. Annamalai, A. Gulati, R. Koul // 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. – 2011. – P. 206–211. doi:10.1109/icetect.2011.5760117

10. Lantharthong, T. Effect of waveform and impulse resistance on lightning performance in distribution system [Text] / T. Lantharthong, N. Rugthaicharoencheep, K. Supanus, A. Phayomhom // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – 2014. – P. 1766–1769. doi:10.1109/iclp.2014.6973415

11. Hu, H. Modeling of lightning surge protection in branched cable distribution network [Text] / H. Hu, M. S. Mashikian // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1990. – Vol. 5, № 2. – P. 846–853. doi:10.1109/61.53092

12. Durbak, D. W. Surge arrester modeling [Text] / D. W. Durbak // 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194). – 2001. – P. 728–730. doi:10.1109/pesw.2001.916946

13. Martinez, J. A. Parameter Determination for Modeling Systems Transients – Part V: Surge Arresters [Text] / J. A. Martinez, D. W. Durbak // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, № 3. – P. 2073–2078. doi:10.1109/tpwrd.2005.848771

14. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual [Electronic resource]. – Ed. 11. – Sunnyvale, CA: Spectrum Software, 2014. – 1040 p. – Available at: \www/URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/rm11.pdf>

15. Pinceti, P. A simplified model for zinc oxide surge arresters [Text] / P. Pinceti, M. Giannettoni // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 393–398. doi:10.1109/61.754079