

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОКСИДНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Бржезицкий В. А., Троценко Е. А., Гаран Я. А.

1. Введение

Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) широко применяются для защиты изоляции оборудования электрических станций и подстанций от волн перенапряжений, набегающих с линий. Волны грозовых перенапряжений возникают и распространяются по проводам линий электропередач в результате ударов молнии. Для расчёта величины и формы перенапряжений, которым подвергается изоляция электрооборудования подстанций, используют различные программы аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных схем. В расчетах применяются различные схемы замещения и модели выпускаемых металлоксидных ОПН. Работа ОПН в режиме ограничения перенапряжения зависит от ряда факторов, в том числе от амплитуды и длительности фронта набегающего импульса перенапряжения. Предлагаемые схемы замещения ОПН должны максимально близко воспроизводить защитные свойства реальных аппаратов. Поэтому перед моделированием сложных схем подстанций проводят тестирование той или иной модели ОПН. При такой проверке целесообразно использовать модель ограничителя перенапряжений в схеме, наиболее близкой к условиям применения реального ограничителя в эксплуатации.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются: полная [1] и упрощённая [2] динамическая модель ОПН, а также модель ОПН в виде нелинейного резистора. Для моделирования вольт-амперной характеристики в последнем случае была использована аппроксимация [3], описывающая одним выражением, как область коммутационных, так и грозовых импульсов тока. Эти известные модели [1, 2] и модель [3] выбраны для демонстрации принципов, которые впоследствии можно применить и к другим моделям нелинейных ограничителей перенапряжений.

В данное время при исследовании моделей ОПН применяется в определённой степени установившийся следующий подход. Модель нелинейного ограничителя перенапряжений последовательно включается с источником тока заданной формы и амплитуды. Затем определяется остающееся напряжение на модели ОПН. Результаты моделирования сравниваются с паспортными значениями, которые указывают производитель и делается вывод о применимости данной модели.

Следует отметить, что такой подход не полностью отображает применение реальных ОПН в эксплуатации. На практике ОПН подключается параллельно с защищаемым оборудованием. В результате грозовой деятельности ОПН подвергаются воздействию импульсных волн напряжения различного происхожде-

ния. Использование именно импульсов напряжения при сравнении моделей металлоксидных ограничителей перенапряжений изучено не достаточно.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка рекомендаций по усовершенствованию метода сравнения моделей металлоксидных ОПН. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Сопоставление результатов многовариантного анализа при воздействии на модели ОПН грозовых импульсов тока.
2. Сопоставление результатов многовариантного анализа при воздействии на модели ОПН грозовых импульсов напряжения.
3. Сравнение погрешности результатов моделирования и формулировка окончательных рекомендаций.

4. Исследование существующих решений проблемы

Анализ работ [1, 2, 4–10], опубликованных в различные годы показывает, что в основном при сравнении различных моделей металлоксидных ОПН используется вышеупомянутый подход с последовательным соединением источника тока и модели ОПН. В большей степени производится определение остающегося напряжения при воздействии грозовых импульсов тока, а также крутого импульса тока. Так, в работах [2, 5, 7–10] были использованы именно грозовые импульсы тока и крутые импульсы тока. В работах [1, 4, 6] помимо этого для определения остающегося напряжения были использованы коммутационные импульсы тока. В работе [6] также выполнено упрощенное моделирование схемы защиты силового трансформатора с помощью ОПН. Приведены графики переходного процесса на изоляции трансформатора и на ОПН при воздействии коммутационного импульса тока.

В работе [10] также использовался треугольный, то есть кусочно-линейный, импульс напряжения для быстрого определения максимума остающегося напряжения.

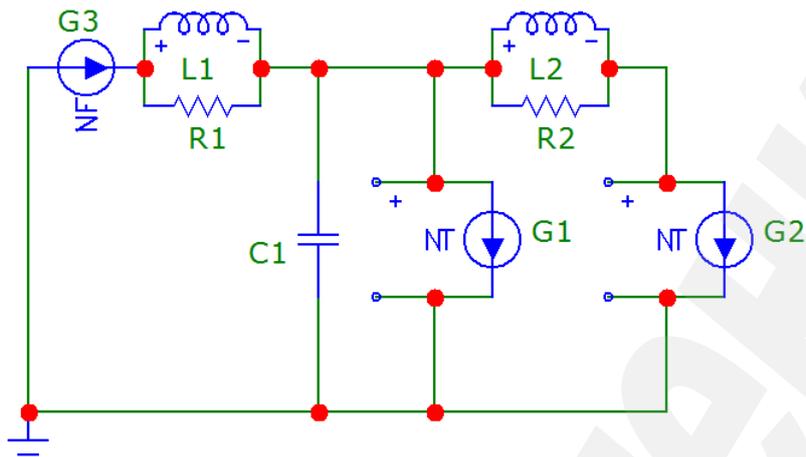
В работе [11] приведены результаты сравнения двух моделей при воздействии грозового импульса напряжения (полного и срезанного), а также коммутационного импульса напряжения. Однако воздействие нескольких импульсов напряжения различной амплитуды не исследовалось.

5. Методы исследований

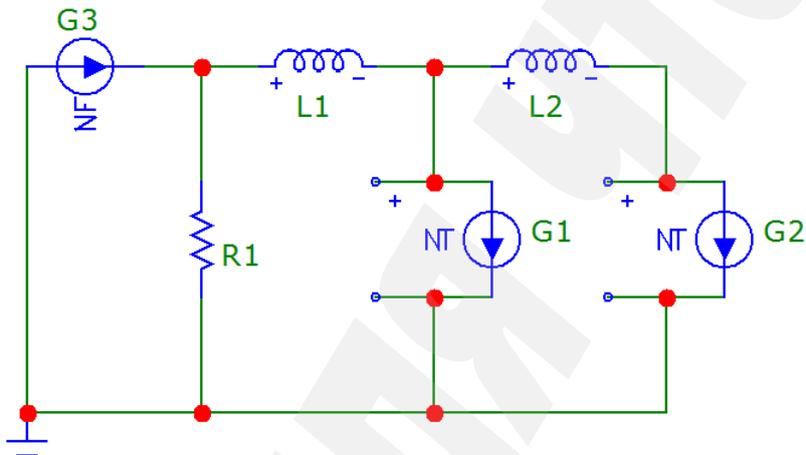
Для решения поставленных задач были использованы методы: эквивалентного генератора, многовариантного анализа, а также схематехнического моделирования на персональном компьютере. Основным материалом исследований являются полная и упрощенная динамические модели металлоксидного ОПН, а также упрощенная модель в виде отдельного нелинейного резистора.

6. Результаты исследований

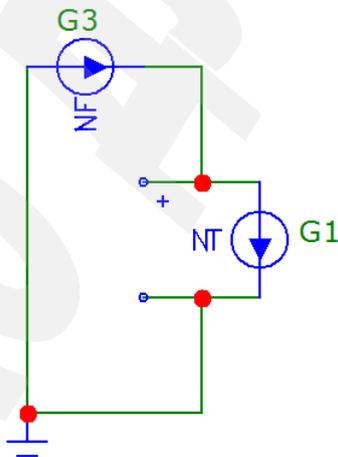
Схемы для определения остающегося напряжения на ОПН при воздействии на него импульсов тока показаны на рис. 1.



a



б



в

Рис. 1. Воздействие импульсов тока на модель ограничителя перенапряжений нелинейного при использовании: *a* – полной динамической модели [1]; *б* – упрощённой динамической модели [2]; *в* – нелинейного резистора, с вольт-амперной характеристикой по [3]

На рис. 1 R_1 , R_2 , L_1 , L_2 и C_1 – линейные, а G_1 и G_2 – нелинейные элементы моделей ОПН. Процедуры определения параметров этих моделей существенно отличаются и описаны, соответственно, в работах [1–3].

Моделирование ОПН выполнено в демонстрационной версии Micro-Cap Evaluation/Student Version [12]. Все нелинейные элементы в схемах на рис. 1 выполнены с помощью моделей источников тока G_1 и G_2 , управляемых напряжением (NTIofV), в соответствии методикой, изложенной в [13, 14].

Схемы на рис. 1 отображают общепринятый подход к сравнению моделей ОПН: последовательное включение модели ОПН и источника тока заданной формы и амплитуды с последующим измерением падения напряжения между выводами ОПН.

Для исследования был выбран типовой ОПН с такими параметрами: номинальное напряжение – 108,0 кВ (среднеквадратическое значение): остающееся напряжение при номинальном разрядном токе амплитудой 10,0 кА и формой 8/20 мкс – 285 кВ (пиковое значение).

В соответствии с методикой расчета [1], для модели на рис. 1, а: $L_1 = 0.219$ мкГн, $L_2 = 8.210$ мкГн, $R_1 = 109.47$ Ом, $R_2 = 71.158$ Ом, $C_1 = 94.346$ пФ. Аналогично, в соответствии с методикой расчета [2], было получено, что для модели на рис. 1, б: $L_1 = 0.947$ мкГн, $L_2 = 2.842$ мкГн, $R_1 = 1000$ МОм.

Вольт-амперная характеристика нелинейного резистора в модели на рис. 1, в во всем диапазоне как коммутационных, так и грозовых импульсов тока согласно [3] была описана выражением (1).

$$U(I) = a + b \cdot (\log_{10}(I))^k. \quad (1)$$

Согласно [3] значения параметров a , b и k являются индивидуальными для каждого отдельного ОПН и должны быть определены из системы уравнений (2).

$$\begin{cases} a \cdot m_1 + b \cdot \sum_{i=1}^{m_1} (\log_{10}(I_i))^k = \sum_{i=1}^{m_1} U_i, \\ a \cdot (m_2 - m_1) + b \cdot \sum_{i=m_1+1}^{m_2} (\log_{10}(I_i))^k = \sum_{i=m_1+1}^{m_2} U_i, \\ a \cdot (n - m_2) + b \cdot \sum_{i=m_2+1}^n (\log_{10}(I_i))^k = \sum_{i=m_2+1}^n U_i, \end{cases} \quad (2)$$

где I_i , U_i – значения токов и напряжений из каталога нелинейных ограничителей перенапряжений; n – общее количество пар значений «ток-напряжение»; m_1 , m_2 – границы промежуточных интервалов.

Решая систему уравнений (2) было получено, что для указанного ОПН его вольт-амперная характеристика может быть описана выражением:

$$U(I) = 183.320782 + 1.349608 \cdot (\log_{10}(I))^{3.129625}, \quad (3)$$

где ток I выражается в амперах, а напряжение U в киловольтах.

Сравнение трёх моделей ОПН проводилось с использованием многовариантного анализа (Stepping). Для определения и сравнения остающегося напряжения во всех моделях амплитуда грозового импульса тока в схемах на рис. 1 изменялась от 2,0 до 20,0 кА (рис. 2).

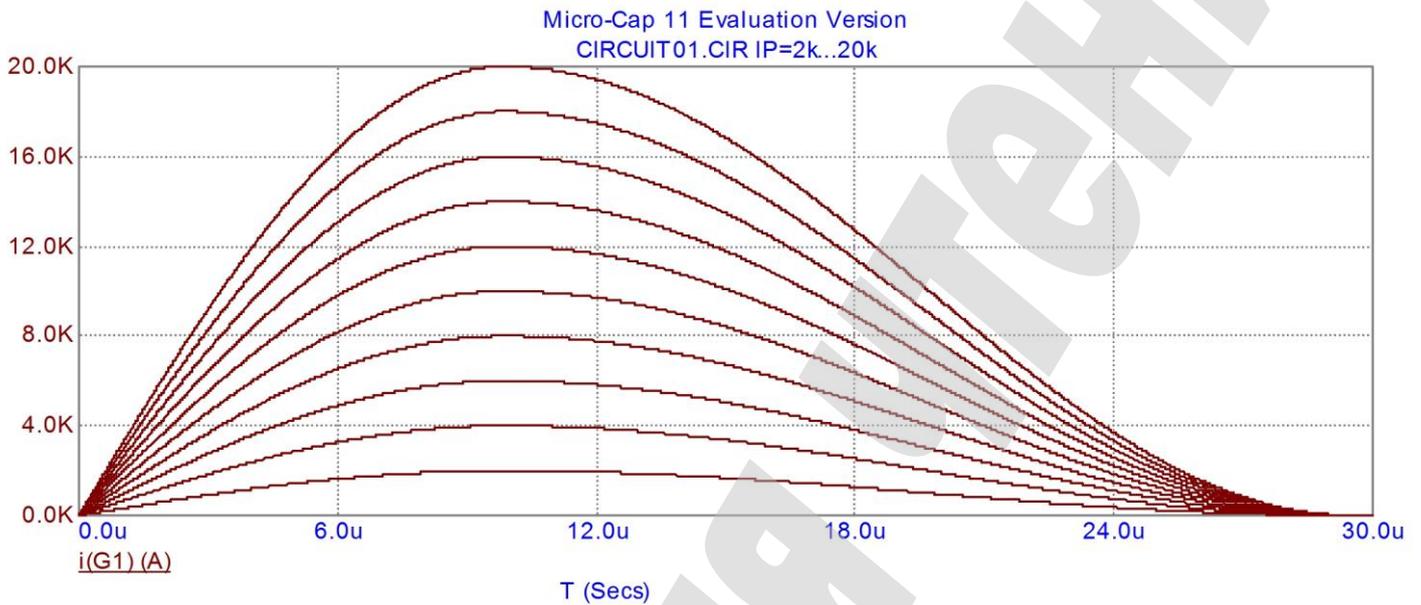


Рис. 2. Семейство токов формой 8/20 мкс, протекающих во всех моделях ограничителей перенапряжений нелинейных

Соответственно, было получено три семейства кривых остающегося напряжения, показанные на рис. 3–5.

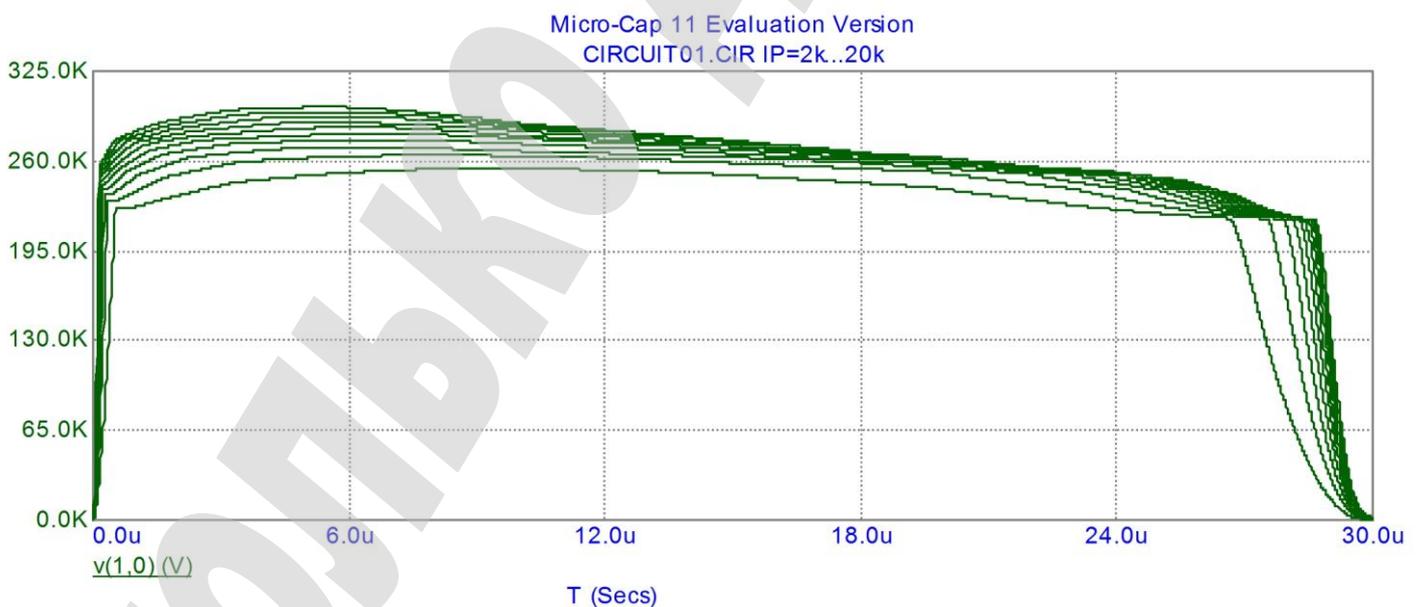


Рис. 3. Семейство кривых остающегося напряжения, полученные в схеме на рис. 1, а

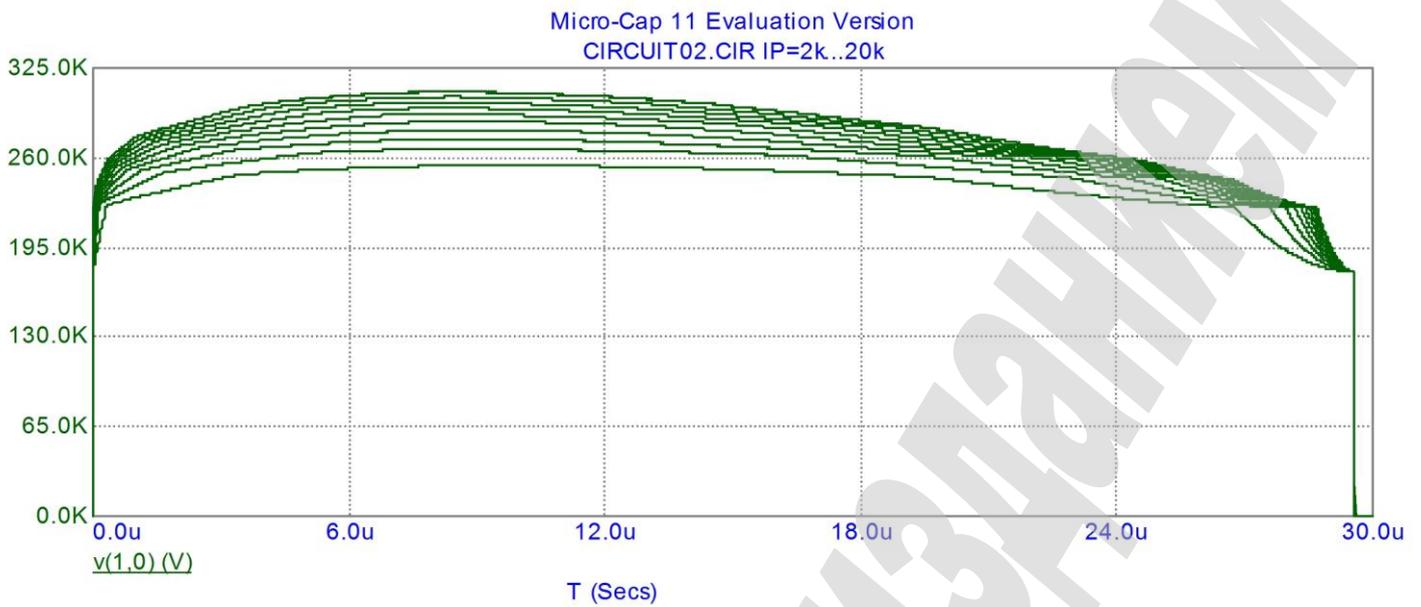


Рис. 4. Семейство кривых остающегося напряжения, полученные в схеме на рис. 1, б

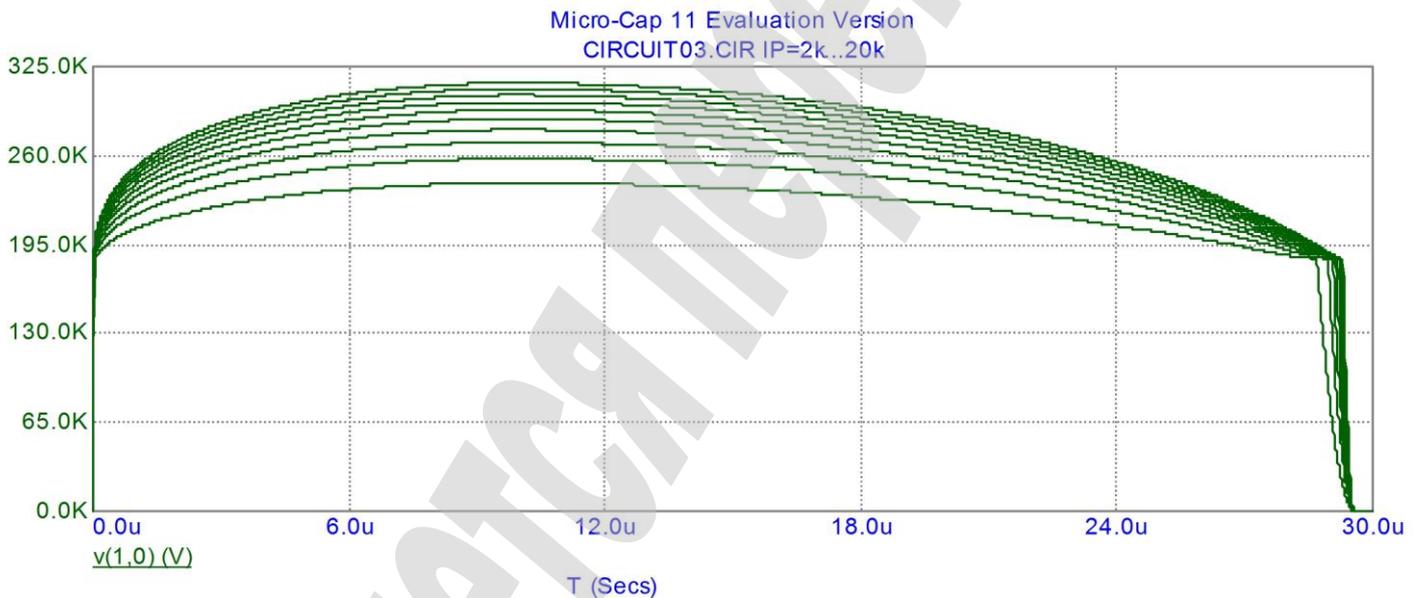


Рис. 5. Семейство кривых остающегося напряжения, полученные в схеме на рис. 1, в

Для описания импульсов тока формой 8/20 мкс, согласно [15] было использовано выражение (4).

$$i_{8/20}(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega} \\ I_p \cdot \frac{\sin(\omega t) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{3\pi}{2\omega} \\ 0, & \frac{3\pi}{2\omega} \leq t < \infty \end{cases} \quad (4)$$

где I_p – пиковое значение, А; $\omega = 159312,827162$ рад/с.

Сравнение кривых остающегося напряжения, показанных на рис. 3–5, показало следующее. Результаты с моделью [2] не отличаются от результатов с моделью [1] более чем на 2,89 %. Результаты с моделью [3] не отличаются от результатов с моделью [1] более чем на 5,74 %. Результаты с моделью [3] не отличаются от результатов с моделью [2] более чем на 5,67 %.

Таким образом, обе динамические модели [1] и [2] практически одинаково предсказывают максимальное значение остающегося напряжения. С другой стороны, заметно отличие в форме кривых остающегося напряжения, которое всё больше проявляется с увеличением амплитуды разрядного тока, протекающего через ОПН. При этом, использование модели [1] дает несколько меньшие значения остающегося напряжения, чем использование модели [2]. При этом, по сравнению с моделями [1] и [2], в области малых токов (примерно до 4,0 кА) использование модели [3] дает несколько заниженные значения, а в области больших токов – несколько завышенные.

Схемы для определения падения напряжения между выводами ОПН при воздействии на него импульсов напряжения показаны на рис. 6. Эти схемы составлены в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе (также известной, как теорема Тевенена) [16, 17]. Согласно теореме Тевенена, любая линейная электрическая цепь, состоящая из нескольких источников напряжения и резисторов относительно любых двух точек, к которым подключена некая нагрузка, может быть заменена эквивалентной цепью с одним источником напряжения и одним резистором, которые соединены последовательно и подключены к этой нагрузке.

Схемы на рис. 6 соответствуют случаю, когда к ОПН подключены две линии бесконечной длины. При этом по одной из них на ОПН набегают волны перенапряжения (формой 1,2/50 мкс). В схемах на рис. 6 ветвь с ОПН оставлена без изменений, а вся остальная часть схемы по отношению к ней заменена эквивалентным источником напряжения и эквивалентным резистором. Рассматриваемый в работе ОПН предназначен для сетей 110 кВ. Соответственно, для сетей 110 кВ волновое сопротивление линий составляет 450 Ом.

В соответствии с теоремой Тевенена, эквивалентный источник напряжения на рис. 6 определяется как:

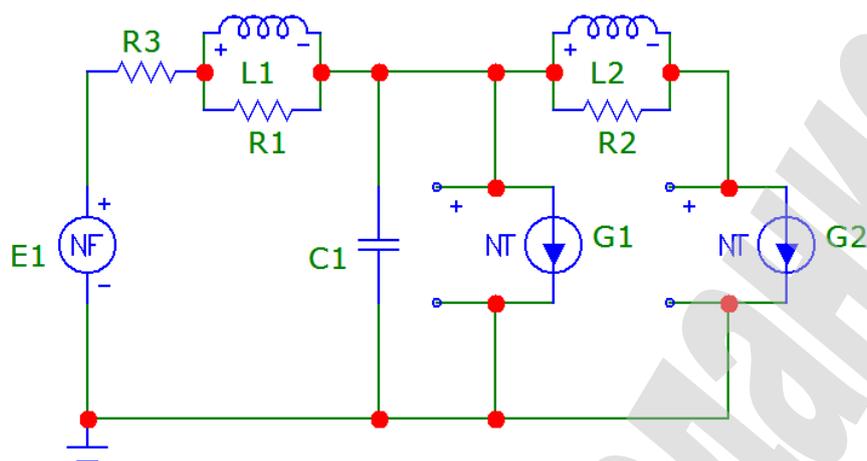
$$E_1 = \frac{2 \cdot 450}{450 + 450} \cdot 1,044 \cdot U_m \cdot (e^{-1.400 \cdot 10^4 \cdot t} - e^{-1.917 \cdot 10^6 \cdot t}) =$$

$$= 1,044 \cdot U_m \cdot (e^{-1.400 \cdot 10^4 \cdot t} - e^{-1.917 \cdot 10^6 \cdot t}),$$

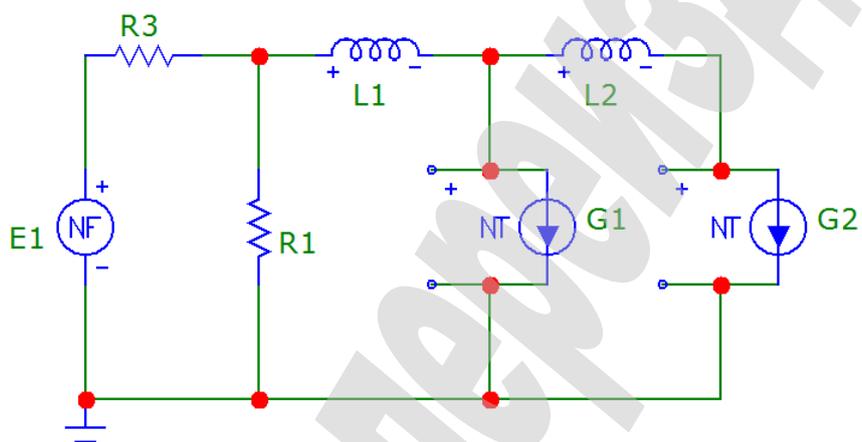
где U_m – пиковое значение воздействующего напряжения, В.

В свою очередь, сопротивление эквивалентного резистора на рис. 6 определяется как:

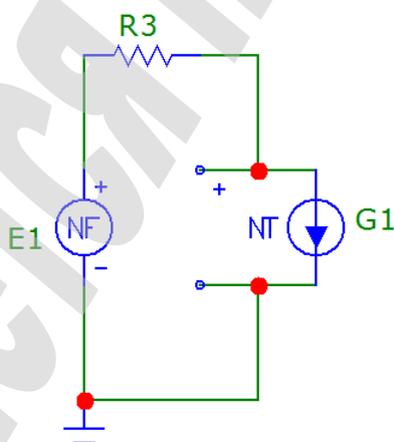
$$R_3 = \frac{450 \cdot 450}{450 + 450} = 225 \text{ Ом.}$$



a



б



в

Рис. 6. Воздействие импульсов напряжения на модель нелинейного ограничителя перенапряжений при использовании:

a – полной динамической модели [1]; *б* – упрощённой динамической модели [2]; *в* – нелинейного резистора, с вольт-амперной характеристикой по [3]

Сравнение трёх моделей ОПН аналогично проведено с использованием многовариантного анализа (Stepping). Для определения и сравнения падения напряжения между выводами обеих моделей амплитуда воздействующего напряжения в схемах на рис. 6 изменялась от 400,0 до 1600,0 кВ (рис. 7).

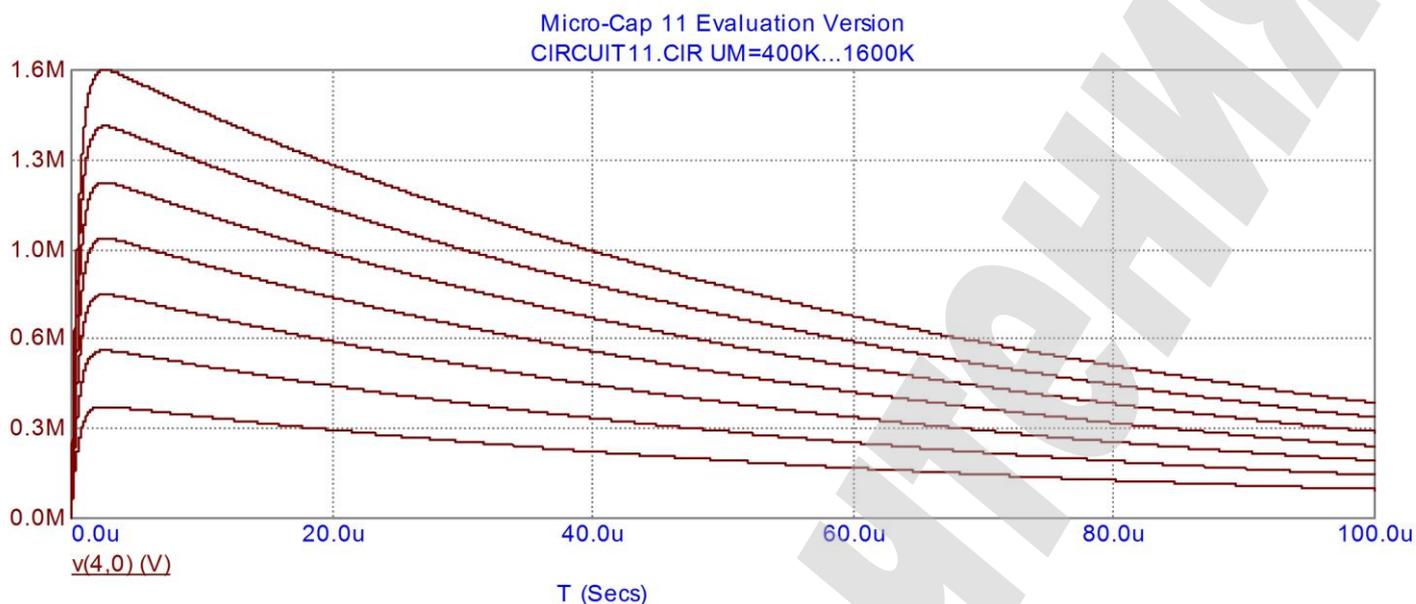


Рис. 7. Семейство импульсов напряжения формой 1,2/50 мкс, приложенных ко всем моделям ограничителей перенапряжений нелинейных

Соответственно, было получено три семейства кривых падения напряжения между выводами ОПН, показанные на рис. 8–10. Эти кривые представляют собой преломленную волну напряжения, которая будет распространяться во второй линии после прохождения мимо ОПН.

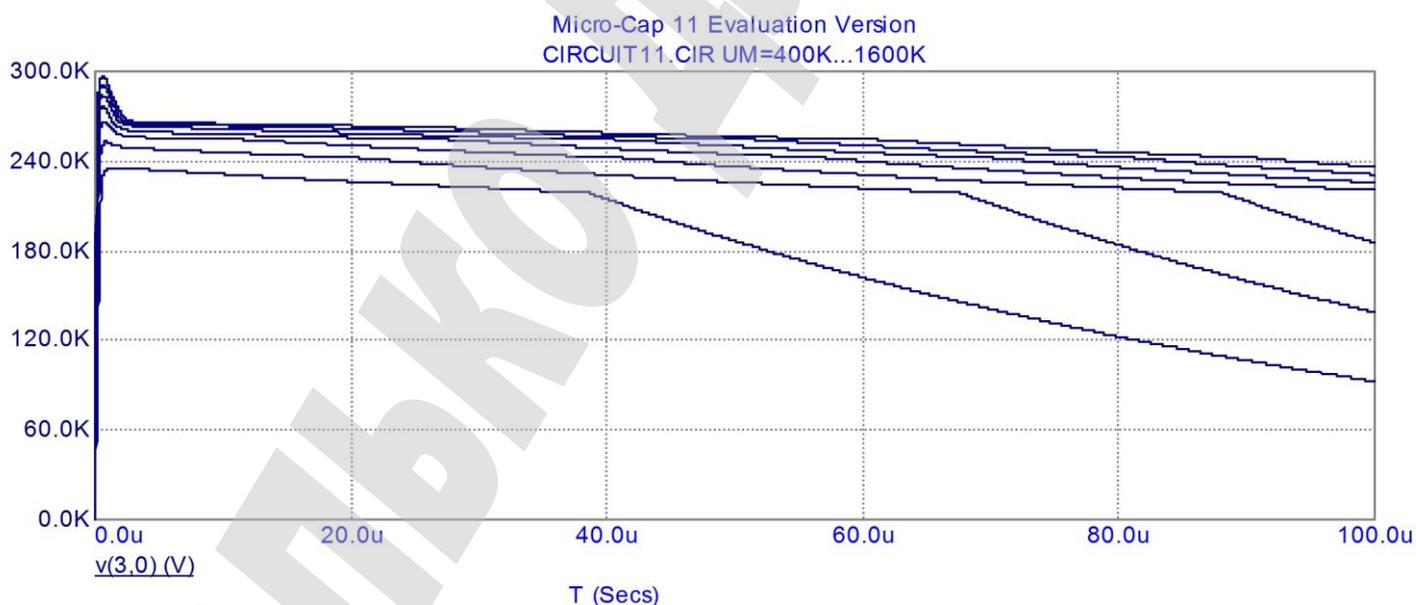


Рис. 8. Семейство кривых падения напряжения между выводами ограничителя перенапряжений нелинейного, полученные в схеме на рис. 6, а

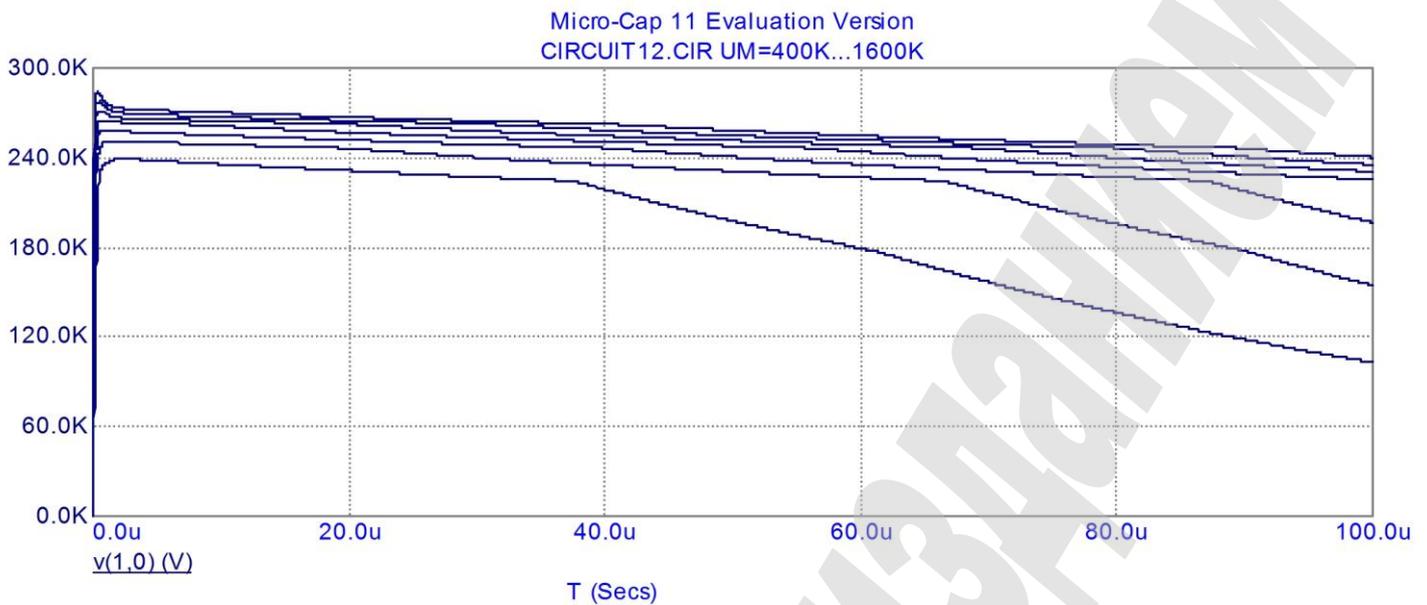


Рис. 9. Семейство кривых падения напряжения между выводами ограничителя перенапряжений нелинейного, полученные в схеме на рис. 6, б

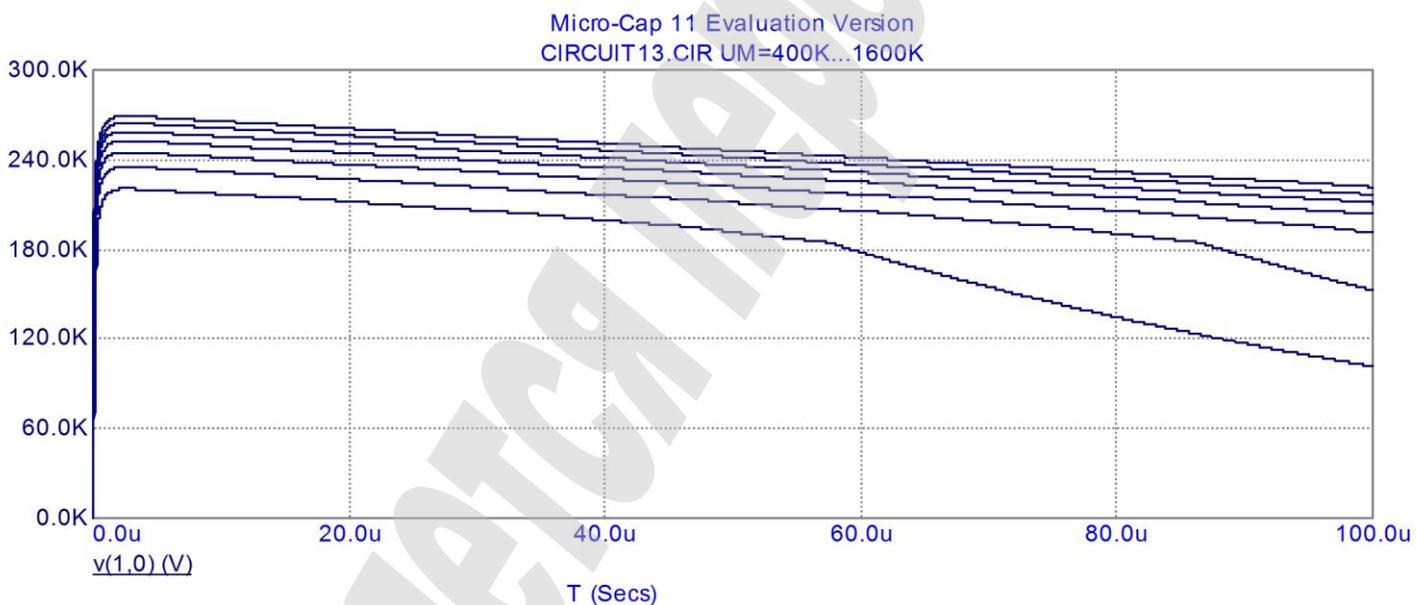


Рис. 10. Семейство кривых падения напряжения между выводами ограничителя перенапряжений нелинейного, полученные в схеме на рис. 6, в

Сравнение кривых падения напряжения, приведенных на рис. 8–10, показало следующее. Результаты с моделью [2] не отличаются от результатов с моделью [1] более чем на 4,53 %. Результаты с моделью [3] не отличаются от результатов с моделью [1] более чем на 9,41 %. Результаты с моделью [3] не отличаются от результатов с моделью [2] более чем на 7,85 %.

Таким образом, по сравнению с первым экспериментом (рис. 1), во втором эксперименте (рис. 6) различие в значениях остающегося напряжения возросло. Однако примечательно, что даже при моделировании ОПН в виде нелинейного резистора, что является сильным упрощением, результаты не выходят существ-

венно за пределы инженерной точности. Достигается это благодаря использованию выражения (1) для аппроксимации вольт-амперной характеристики ОПН. Известно, что в общем виде вольт-амперная характеристика ОПН [17] описывается выражением (5):

$$U(I) = K \cdot I^\alpha, \quad (5)$$

где α – коэффициент нелинейности материала варистора; K – постоянная, которая зависит от материала и размеров образца варистора.

Напомним, что в типовой вольт-амперной характеристике варисторов металлоксидного ОПН для всего диапазона значений тока в нормальных режимах и в режимах ограничения различных перенапряжений выделяют три участка, на которых коэффициент α принимает различные значения [17]. Преимущество формулы (1) по сравнению с формулой (5) состоит в том, что в областях коммутационных и грозовых перенапряжений вольт-амперную характеристику ОПН можно описать не двумя, а одним выражением.

Относительно всплесков напряжения на рис. 8, 9 следует отметить, что в реальности они будут сглажены. Это объясняется тем, что при продвижении волны перенапряжения вдоль линии фронт волны удлиняется (сглаживается) за счёт короны на проводах, потерь в земле и в самих проводах.

В заключение, можно отметить, что при окончательном выборе той или иной схемы замещения ОПН, предпочтительна из необходимости введения определённого коэффициента запаса та, которая даёт большие значения остающегося напряжения в схемах, сходных с рис. 6.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильными сторонами данного исследования являются:

- использование моделей, которые отображают самые разные подходы к моделированию нелинейных ограничителей перенапряжений;
- в отличие от других исследований, предложенный подход к сравнению моделей нелинейных ограничителей перенапряжений наиболее близко соответствует способу применения реальных ограничителей перенапряжений в эксплуатации.

Weaknesses. Слабая сторона данного исследования состоит в том, что предложенная процедура сравнения моделей нелинейных ограничителей перенапряжений требует больших затрат времени.

Opportunities. К дополнительным возможностям, которые предоставляет данное исследование, относятся:

- возможность использовать при сравнении различных моделей нелинейных ограничителей перенапряжений других нестандартных импульсов напряжения (в том числе оцифрованных осциллограмм реальных перенапряжений на подстанциях);
- возможность дальнейшего повышения точности аппроксимации вольт-амперной характеристики нелинейного ограничителя перенапряжений.

Threats. Полная и упрощённая динамическая модель, а также модель в виде отдельного нелинейного резистора не учитывают тепловой режим нелинейного ограничителя перенапряжений и, соответственно, нагрев его варисторов при ограничении перенапряжений. Для таких случаев необходимо использовать также термическую модель нелинейного ограничителя перенапряжений, например, согласно [18]. Исследования [19] показывают, что при оценке энергии, рассеиваемой в ОПН при перенапряжениях как динамические (частотно-зависимые) модели, так и нелинейный резистор (хотя и в меньшей степени) дают сильно заниженные результаты, особенно при импульсах тока с крутым фронтом. Заниженные значения опасны тем, что могут привести к ошибочному толкованию результатов моделирования. Поэтому задача расчёта перенапряжений и расчёта рассеиваемой энергии требуют разных подходов.

8. Выводы

1. Проведен многовариантный анализ различных моделей ОПН при воздействии грозовых импульсов тока. Определено остающееся напряжение, которое возникает при этом на ОПН. Установлено, что результаты с упрощённой моделью [2] не отличаются от результатов с полной моделью [1] более чем на 2,89 %. Результаты с нелинейным резистором [3] не отличаются от результатов с полной моделью [1] более чем на 5,74 %. Результаты с нелинейным резистором [3] не отличаются от результатов с упрощённой моделью [2] более чем на 5,67 %.

2. Проведен многовариантный анализ тех же моделей ОПН при воздействии грозовых импульсов напряжения. Определено остающееся напряжение, которое возникает при этом между выводами ОПН. Установлено, что результаты с упрощённой моделью [2] не отличаются от результатов с полной моделью [1] более чем на 4,53 %. Результаты с нелинейным резистором [3] не отличаются от результатов с полной моделью [1] более чем на 9,41 %. Результаты с нелинейным резистором [3] не отличаются от результатов с моделью [2] более чем на 7,85 %.

3. По сравнению с первым, схемы, используемые во втором подходе более близко отображают способ применения реальных ОПН в эксплуатации. Как следствие, при окончательном выборе той или иной модели нелинейного ограничителя перенапряжений, предпочтительна из необходимости введения определённого коэффициента запаса та, которая даёт большие значения остающегося напряжения при воздействии импульсов напряжения. С другой стороны, установлено, что даже при моделировании ОПН в виде нелинейного резистора, но с учётом аппроксимации его вольт-амперной характеристики по [3], результаты не выходят за пределы инженерной точности.

Литература

1. Modeling of metal oxide surge arresters [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, No. 1. – P. 302–309. doi:[10.1109/61.108922](https://doi.org/10.1109/61.108922)

2. Pinceti, P. A simplified model for zinc oxide surge arresters [Text] / P. Pinceti, M. Giannettoni // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, No. 2. – P. 393–398. doi:[10.1109/61.754079](https://doi.org/10.1109/61.754079)
3. Brzhezitsky, V. Approximation of Volt-Ampere Characteristics of Metal-Oxide Surge Arresters [Text] / V. Brzhezitsky, I. Masluchenko, Y. Trotsenko, D. Krysenko // Scientific Works of National University of Food Technologies. – 2015. – Vol. 21, No. 1. – P. 169–176.
4. Saengsuwan, T. Lightning arrester modeling using ATP-EMTP [Text] / T. Saengsuwan, W. Thipprasert // 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004. – IEEE, 2004. – P. 377–380. doi:[10.1109/tencon.2004.1414786](https://doi.org/10.1109/tencon.2004.1414786)
5. Peppas, G. D. Surge arresters models for fast transients [Text] / G. D. Peppas, I. A. Naxakis, C. T. Vitsas, E. C. Pyrgioti // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – IEEE, 2012. – P. 1–6. doi:[10.1109/iclp.2012.6344285](https://doi.org/10.1109/iclp.2012.6344285)
6. Li, H. J. A parameter identification technique for metal-oxide surge arrester models [Text] / H. J. Li, S. Birlasekaran, S. S. Choi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, No. 3. – P. 736–741. doi:[10.1109/tpwrd.2002.1022797](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2002.1022797)
7. Magro, M. C. Validation of ZnO Surge Arresters Model for Overvoltage Studies [Text] / M. C. Magro, M. Giannettoni, P. Pinceti // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, No. 4. – P. 1692–1695. doi:[10.1109/tpwrd.2004.832354](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2004.832354)
8. Fernandez, F. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations [Text] / F. Fernandez, R. Diaz // Proceedings of 2001 International Conference on Power System Transients. – 2001. – P. 681–687.
9. Kim, I. Study of ZnO arrester model for steep front wave [Text] / I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, M. Kobayashi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 834–841. doi:[10.1109/61.489341](https://doi.org/10.1109/61.489341)
10. Martinez, J. A. Parameter Determination for Modeling Systems Transients – Part V: Surge Arresters IEEE PES Task Force on Data for Modeling System Transients of IEEE PES Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation (General Systems Subcommittee) [Text] / J. A. Martinez, D. W. Durbak // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, No. 3. – P. 2073–2078. doi:[10.1109/tpwrd.2005.848771](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2005.848771)
11. Miguel, P. M. Comparison of Surge Arrester Models [Text] / P. M. Miguel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – P. 21–28. doi:[10.1109/tpwrd.2013.2279835](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2279835)
12. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual [Electronic resource]. – Sunnyvale, CA: Spectrum Software, 2014. – 1040 p. – Available at: \www/URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/rm11.pdf>
13. Trotsenko, Y. Surge arrester modeling using Micro-Cap [Text] / Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2016. – Vol. 6, No. 1 (32). – P. 26–30. doi:[10.15587/2312-8372.2016.86137](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86137)
14. Trotsenko, Y. Study of surge arrester model under influence of various current pulses [Text] / Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – Vol. 1, No. 1 (33). – P. 44–48. doi:[10.15587/2312-8372.2017.92244](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.92244)
15. Trotsenko, Y. Analytical representation of switching current impulses for study of metal-oxide surge arrester models [Text] / Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko //

Technology audit and production reserves. – 2017. – Vol. 5, No. 1 (37). – P. 24–29. doi:[10.15587/2312-8372.2017.109662](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109662)

16. Brittain, J. E. Thevenin's theorem [Text] / J. E. Brittain // IEEE Spectrum. – 1990. – Vol. 27, No. 3. – P. 42. doi:[10.1109/6.48845](https://doi.org/10.1109/6.48845)

17. Martinez-Velasco, J. A. Power System Transients: Parameter Determination [Text] / ed. by J. A. Martinez-Velasco. – CRC Press LLC, 2009. – 644 p. doi:[10.1201/9781420065305](https://doi.org/10.1201/9781420065305)

18. Lat, M. V. Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters [Text] / M. V. Lat // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102, No. 7. – P. 2194–2202. doi:[10.1109/tpas.1983.318207](https://doi.org/10.1109/tpas.1983.318207)

19. He, Y. Experimental validation of MOA simulation models for energy absorption estimation under different impulse currents [Text] / Y. He, Z. Fu, J. Chen // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). – IEEE, 2016. – P. 1–5. doi:[10.1109/pesgm.2016.7741791](https://doi.org/10.1109/pesgm.2016.7741791)