

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОКСИДНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

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

1. Введение

Моделирование металлоксидного нелинейного ограничителя перенапряжений необходимо для расчётов грозовых и коммутационных перенапряжений с использованием персональных компьютеров. На данный момент существует несколько похожих динамических (т. е. частотно-зависимых) моделей металлоксидного нелинейного ограничителя перенапряжений [1, 2]. Как правило, эти модели состоят из двух нелинейных сопротивлений, соединенных друг с другом с помощью нескольких линейных элементов: индуктивностей, резисторов, емкости. Нелинейные ограничители перенапряжений имеют несколько основных характеристик. Среди прочих, к ним относится остающееся напряжение ограничителя, которое представляет собой максимальное значение напряжения на ограничителе при протекании через него импульсного тока с заданной формой и амплитудой. Выделяют остающиеся напряжения при номинальном разрядном токе (грозовом импульсе тока), при коммутационном импульсе тока и крутом импульсе тока. Модель нелинейного ограничителя перенапряжений должна воспроизводить в виртуальном эксперименте на компьютере именно эти вышеперечисленные характеристики реального ограничителя. Чтобы сделать вывод о том, насколько хорошо та или иная модель воспроизводит поведение реального ограничителя, нужно сравнить результаты моделирования с соответствующими значениями, которые приводят производители в каталогах своей продукции. Для моделирования на компьютере необходима формула для описания зависимости разрядного тока от времени. Аналитическое описание номинального разрядного тока (грозового импульса тока) и крутого импульса тока не представляет таких трудностей, как описание коммутационного импульса тока. Как правило, производители указывают остающиеся напряжения при нескольких амплитудах грозового импульса тока и при нескольких амплитудах коммутационного импульса тока. Для того, чтобы можно было протестировать модель при как можно большем количестве контрольных точек необходимо рассмотреть вопросы, связанные с аналитическим описанием коммутационных импульсов тока ограничителей.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования является аналитическое выражение для описания коммутационного импульса тока нелинейного ограничителя перенапряжений. Любой импульс тока (как грозовой, так и коммутационный) характеризуется

такими параметрами, как условная длительность фронта T_1 и условная длительность импульса T_2 . Тем не менее, есть различия в требованиях к точности параметров грозовых и коммутационных импульсов нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

Грозовой импульс тока ОПН стандарт IEC 60099-4:2014 определяет следующим образом. Грозовой импульс тока – это импульс разрядного тока 8/20 мкс при длительности фронта импульса от 7 до 9 мкс и длительности импульса в диапазоне от 18 до 22 мкс. То есть, допустимая погрешность определения как T_1 , так и T_2 , составляет $\pm 10\%$.

Относительно коммутационного импульса тока ОПН стандарт IEC 60099-4:2014 устанавливает следующее. У коммутационного импульса условная длительность фронта составляет не менее 30 мкс (но не более 100 мкс), а условная длительность импульса примерно равна удвоенному времени условного фронта импульса.

Именно последнее требование ($T_2 \cong 2 \cdot T_1$) представляет некоторую сложность для математического описания коммутационных импульсов тока. Существующие подходы, применяемые для описания грозовых импульсов тока не подходят в этом случае, поскольку у этих импульсов $T_2 = 2,5 \cdot T_1$. В данной работе авторы предлагают решать поставленную задачу с помощью аналитических кусочных функций.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является аналитическое представление коммутационных импульсов тока ОПН согласно требованиям стандарта IEC 60099-4:2014. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Подбор кусочно-непрерывной функции для описания коммутационных импульсов тока ОПН, удовлетворяющей требованиям стандарта IEC 60099-4:2014 относительно условной длительности фронта и импульса.
2. Анализ влияния предложенного выражения для коммутационного импульса тока на остающееся напряжение ОПН.

4. Исследование существующих решений проблемы

При грозовых перенапряжениях через ОПН протекают токи имеющие значительно большую амплитуду и более крутой фронт, чем при коммутационных перенапряжениях. Это одна из причин того, почему исследование моделей нелинейных ограничителей перенапряжений ограничивается иногда только воздействием грозовых импульсов тока, а также крутого импульса тока [1–5]. Способы аналитического описания волн тока и напряжения, изложенные например, в [6–9], касаются, в основном, импульсов, у которых $T_2 \gg T_1$. По этой причине они не подходят для описания коммутационных импульсов тока.

На практике всегда необходимо определить связь между параметрами импульсной волны и её временными характеристиками – условной длительностью фронта T_1 и условной длительностью импульса T_2 .

Общеизвестный двухэкспоненциальный импульс описывается выражением [10]:

$$i(t) = I_p \cdot k \cdot (\exp(-a \cdot t) - \exp(-b \cdot t)), \quad (1)$$

где a , b – коэффициенты затухания экспонент; k – нормирующий коэффициент для пикового значения импульса I_p . Связь между временными параметрами T_1 , T_2 и параметрами импульса k , a , b устанавливается приближенными выражениями. Выражение (1) хорошо описывает апериодические импульсы, у которых $T_2 \gg T_1$. Выражение (1) импульсы формой 8/20 мкс и 4/10 мкс описывает уже приближенно [10], соответственно, для описания импульсов формой 30/60 мкс и 45/90 мкс оно не пригодно.

Принципиально, коммутационные импульсы тока ОПН могут быть представлены колебательным импульсом с затуханием [10]:

$$i(t) = I_p \cdot k \cdot \exp(-a \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где a – коэффициент затухания экспоненты; ω – угловая частота; k – нормирующий коэффициент для пикового значения импульса I_p . Связь между временными параметрами T_1 , T_2 и параметрами импульса k , a , ω также определяется приближенно и достаточно сложным образом [10].

В [11] для описания коммутационного импульса тока было использовано выражение:

$$i(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega_1 t), & 0 \leq t \leq t_1, \\ I_p \cdot \sin(\omega_2 t + \phi), & t_1 \leq t \leq t_2, \\ 0, & t_2 \leq t < \infty, \end{cases} \quad (3)$$

где ω_1 , ω_2 , ϕ – параметры импульсной волны; моменты времени t_1 , t_2 определяют границы, на которых заданы подфункции общей кусочной функции (3). Одним из преимуществ выражения (3) является отсутствие нормирующего коэффициента для пикового значения импульса. В [11] не показано, как рассчитать параметры ω_1 , ω_2 , ϕ в зависимости от заданной формы импульса T_1/T_2 . Исследования, проведенные авторами показывают, что выражение (3) можно использовать для получения нового выражения, описываемого только одним параметром.

5. Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы методы: математического анализа, а также схемотехнического моделирования на

персональном компьютере. Основным материалом исследований является модель металлоксидного нелинейного ограничителя перенапряжений.

6. Результаты исследований

Предварительные исследования, проведенные авторами показывают, что для описания коммутационного импульса тока ОПН можно использовать следующее выражение:

$$i_1(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega}, \\ I_p \cdot \frac{\sin(\omega t) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{3\pi}{2\omega}, \\ 0, & \frac{3\pi}{2\omega} \leq t < \infty. \end{cases} \quad (4)$$

Несмотря на то, что функция (4) является кусочной, в точке $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$ первая производная непрерывна и равна нулю. В точке $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$ функция (4) достигает своего пикового значения I_p , а в точке $t_2 = \frac{3\pi}{2\omega}$ обращается в ноль. От выбора угловой частоты зависит условная длительность фронта T_1 и условная длительность импульса T_2 .

Перейдем к тому как стандарт IEC 60099-4:2014 определяет условное время (длительность) фронта импульса T_1 . Условная длительность фронта импульса это время, выраженное в микросекундах и определяемое умножением на 1,25 времени в микросекундах, необходимого для увеличения максимального (амплитудного) значения импульса от 10 % до 90 %.

Обозначив моменты времени соответствующие 10 % и 90 % максимального (амплитудного) значения импульса, через $t_{10\%}$ и $t_{90\%}$, можно записать, что:

$$T_1 = 1.25 \cdot (t_{90\%} - t_{10\%}). \quad (5)$$

Ключевые моменты времени можно определить из выражения (4) как:

$$t_{10\%} = \frac{\arcsin(0.1)}{\omega}, \quad (6)$$

$$t_{90\%} = \frac{\arcsin(0.9)}{\omega}. \quad (7)$$

Используя выражения (5)–(7) путем несложных преобразований можно определить угловую частоту ω в выражении (4), при заданном значении T_1 :

$$\omega = 1.25 \cdot \frac{\arcsin(0.9) - \arcsin(0.1)}{T_1}. \quad (8)$$

Условная длительность импульса T_2 определяется из выражения [10]:

$$T_2 = t_{50\%} + 0.125 \cdot (t_{90\%} - 9t_{10\%}), \quad (9)$$

где $t_{50\%}$ – время на хвосте импульса, соответствующее 50 % максимального (амплитудного) значения импульса. Выражение (9) можно получить из простых геометрических соотношений [10]. Например, выражение (9) может быть записано и в таком виде:

$$T_2 = t_{50\%} + \frac{T_1}{10} - t_{10\%}. \quad (10)$$

Выражение (10) можно получить из выражения (9), с учётом выражения (5) следующим образом:

$$\begin{aligned} T_2 &= t_{50\%} + 0.125 \cdot (t_{90\%} - 9t_{10\%}) = t_{50\%} + 0.125t_{90\%} - 1.125t_{10\%} = \\ &= t_{50\%} + 0.125t_{90\%} - 0.125t_{10\%} - t_{10\%} = t_{50\%} + 0.125 \cdot (t_{90\%} - t_{10\%}) - \\ &- t_{10\%} = t_{50\%} + \frac{T_1}{10} - t_{10\%}. \end{aligned}$$

Отметим, что для импульса, описываемого выражением (4):

$$t_{50\%} = \frac{2\pi}{2\omega}. \quad (11)$$

Таким образом, определение формы коммутационного импульса тока происходит следующим образом. Для заданного по условию того или иного задания значения T_1 определить по формуле (8) угловую частоту ω . Затем по формуле (11) определить $t_{50\%}$. Потом, зная $t_{50\%}$, рассчитать получаемое значение T_2 по формуле (9) или (10).

Например, для импульса 45/90 мкс, из формулы (5) получим, что $\omega = 28322.280$ рад/с. Для такого значения угловой частоты по формуле (11) получаем, что $t_{50\%} = 110.9$ мкс (результат переведен в микросекунды). Затем, по формуле (9) или (10) получим, что $T_2 = 111.9$ мкс. Таким образом, вместо

импульса формой 45/90 мкс получили импульс 45/111.9 мкс. То есть погрешность условной длительности импульса составляет +24,3 %.

Фактически, согласно определению коммутационного импульса тока ОПН, уже приведенного выше, ток, описываемый выражением (4) может использоваться для определения остающегося напряжения на ОПН при моделировании на персональном компьютере. Тем не менее, авторы предложили еще несколько выражений, в которых погрешность определения T_2 уменьшена. Эти импульсы описываются уравнениями (12), (14), (16), (18). Уменьшение длительности импульса T_2 обеспечено путем увеличения угловой частоты ω (умножением на некий коэффициент) только во второй подфункции, которая описывает ток после момента времени $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$. При этом авторы искали только те решения, где этот коэффициент преобразования аналитического выражения во второй подфункции представляет простую дробь, т. е. дробь у которой и числитель и знаменатель – целые числа.

$$i_2(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega}, \\ I_p \cdot \frac{\sin\left(\frac{5}{4}\omega t - \frac{\pi}{8}\right) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{13\pi}{10\omega}, \\ 0, & \frac{13\pi}{10\omega} \leq t < \infty, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$t_{50\%} = \frac{9\pi}{10\omega}, \quad (13)$$

$$i_3(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}, \\ I_p \cdot \frac{\sin\left(\frac{13}{10}\omega t - \frac{3\pi}{20}\right) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2} \leq t \leq \frac{33\pi}{26\omega}, \\ 0, & \frac{33\pi}{26\omega} \leq t < \infty, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$t_{50\%} = \frac{23\pi}{26\omega}, \quad (15)$$

$$i_4(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega}, \\ I_p \cdot \frac{\sin\left(\frac{4}{3}\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{10\pi}{8\omega}, \\ 0, & \frac{10\pi}{8\omega} \leq t < \infty, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$t_{50\%} = \frac{7\pi}{8\omega}, \quad (17)$$

$$i_5(t) = \begin{cases} I_p \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega}, \\ I_p \cdot \frac{\sin\left(\frac{3}{2}\omega t - \frac{\pi}{4}\right) + 1}{2}, & \frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{7\pi}{6\omega}, \\ 0, & \frac{7\pi}{6\omega} \leq t < \infty, \end{cases} \quad (18)$$

где

$$t_{50\%} = \frac{5\pi}{6\omega}. \quad (19)$$

Приведенный ранее порядок расчёта справедлив и для формул (12), (14), (16), (18), за исключением того, что $t_{50\%}$ рассчитывается, соответственно, по формулам (13), (15), (17), (19). Результаты всех проведенных расчётов для импульсов формой 45/90 мкс обобщены в табл. 1.

В табл. 1 относительная погрешность условной длительности импульса T_2 вычислялась по формуле:

$$\xi T_2 = \frac{T'_2 - T_2}{T_2} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где T_2' – фактическое значение условной длительности импульса;
 T_2 – требуемое значение условной длительности импульса.

Таблица 1

Формы импульсов, получаемые при использовании различных формул
(требуемая форма 45/90 мкс)

№	Формула	Получаемая форма импульса T_1'/T_2' , мкс	Погрешность определения ξT_2 , %
1	(4)	45/111.90	+24.32
2	(12)	45/100.80	+11.99
3	(14)	45/99.09	+10.10
4	(16)	45/98.02	+8.91
5	(18)	45/93.40	+3.78

Поскольку перечисленные импульсы тока аналитически точно связаны с T_1 через формулы (6)–(8), то получаемое значение фронта импульса равно требуемому ($T_1' = T_1$). Соответственно погрешность условной длительности фронта T_1' равна нулю.

Как видно из приведенных выше выражений, до момента времени $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$ токи (4), (12), (14), (16), (18) описываются одной и той же подфункцией, а после – разными. Также можно считать, что эти импульсы тока, зависят только от одного параметра (угловой частоты ω).

Путем схемотехнического моделирования было исследовано влияние полученных импульсов тока на остающееся напряжение ОПН. Основная схема исследования показана на рис. 1. Эта схема соответствует модели ОПН, предложенной в [3].

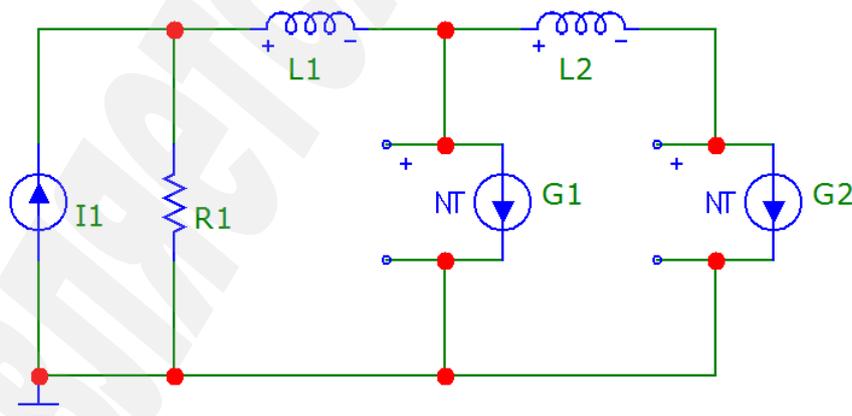


Рис. 1. Моделирование нелинейного ограничителя перенапряжений в демонстрационной версии Micro-Cap 11 [12] с помощью моделей источников тока G_1 и G_2 , управляемых напряжений (NTIofV)

На рис. 1 R_1 , L_1 и L_2 – линейные, а G_1 и G_2 – нелинейные элементы моделей ОПН. Числовые значения элементов модели были определены в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Нелинейные элементы модели ОПН были

смоделированы с помощью источников тока, управляемых напряжением (NTIofV) в соответствии с работами [11, 13]. В данной работе была использована модель металлоксидного ОПН с номинальным напряжением 258 кВ. Линейные параметры модели равны, соответственно $L_1 = 1,952$ мкГн, $L_2 = 5,855$ мкГн, $R_1 = 1000$ МОм. На рис. 2 показаны графики токов и соответствующие им графики остающегося напряжения, полученные при моделировании. Кривые, соответствующие выражению (14) на рис. 2 не показаны, поскольку они практически «сливаются» с кривыми, получаемыми по формуле (16).

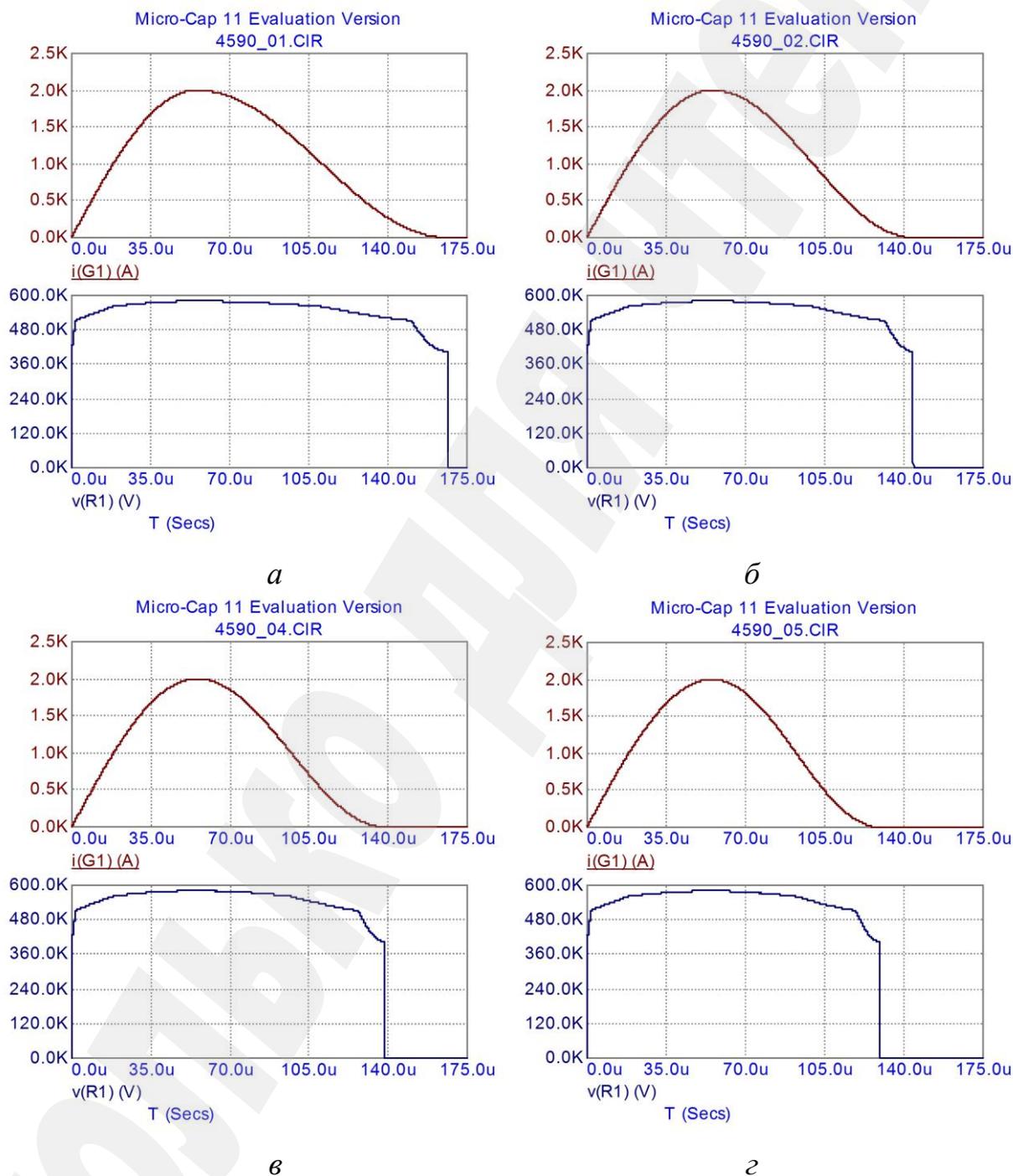


Рис. 2. Остающееся напряжение (внизу) при протекании через нелинейный ограничитель перенапряжений коммутационных импульсов тока (вверху) амплитудой 2,0 кА разной формы: *a* – 45/111.90 мкс; *б* – 45/100.80 мкс; *в* – 45/98.02 мкс; *г* – 45/93.40 мкс

Для всех токов, указанных в табл. 1, было получено одно и то же значение максимума остающегося напряжения, равное 580,192 кВ. Это подтверждает тот факт, что на максимальное значение остающегося напряжения ОПН основное влияние оказывает длительность фронта волны разрядного тока и её амплитуда, а не длительность волны до полуспада [13]. У всех токов в табл. 1 длительность фронта импульса одинакова и равна 45 мкс.

Нужно дополнительно отметить, что при $\omega = 159312.827$ рад/с, выражение (4) описывает импульс формой 8/19.89 мкс. Тем самым позволяет описать грозовой импульс тока ОПН формой 8/20 мкс с погрешностью определения длительности импульса, равной -0.55 %.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильными сторонами данного исследования являются:

- в отличие от других выражений, полученные выражения коммутационного импульса имеют только один параметр (угловую частоту);
- длительность фронта результирующего импульса рассчитывается не по приближенной, а по аналитически точной формуле (в которую входит единственный параметр коммутационного импульса – угловая частота);
- поскольку предложенные выражения характеризуются только одним параметром (а не тремя), это значительно снижает затраты времени на предварительные вычисления.

Weaknesses. Слабая сторона данного исследования состоит в том, что:

- длительность результирующих импульсов определяется с некоторой погрешностью;
- вышеуказанная погрешность снижается путем некоторого усложнения исходного выражения;
- при записи кусочных функций в линейном виде с помощью встроенных функций, обычных и логических операторов возрастают затраты времени на ввод этой информации с клавиатуры.

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

- возможность описания с помощью выражения (4) импульсов тока, у которых длительность импульса в два с половиной раза больше длительности фронта. В качестве примера можно привести номинальный разрядный ток (грозовой импульс тока) формой 8/20 мкс и импульс тока большой амплитуды формой 4/10 мкс;
- возможность описания с помощью выражения (18) импульсов тока, у которых длительность импульса вдвое больше длительности фронта. В качестве примера можно привести коммутационный импульс тока формой 30/60 мкс и крутой импульс тока формой 1/2 мкс;
- возможность более детально исследовать существующие и будущие модели нелинейных ограничителей перенапряжений при большем количестве контрольных точек. Тем самым выявить особенности, которые в противоположном случае остались бы незамеченными.

Threats. Полученное выражение коммутационного импульса имеет ненулевую производную в начальный момент времени. Для тестирования моделей ОПН это не является важным. Однако, при использовании

полученного выражения в других задачах эта особенность может стать важной и потребовать дальнейшего усовершенствования выражения. Для применения изложенного материала на практике необходим сотрудник со знанием основ теории линейных и нелинейных электрических цепей, линейного программирования, а также навыков схемотехнического моделирования.

8. Выводы

1. Предложены аналитические кусочно-непрерывные функции для описания коммутационных импульсов тока ОПН. Функции (4), (12), (14), (16), (18) соответствуют требованиям стандарта IEC 60099-4:2014 относительно коммутационных импульсов тока ОПН и позволяют описывать кривые, у которых длительность импульса примерно вдвое больше длительности фронта. При этом у всех функций погрешность определения условной длительности фронта равна нулю. У выражения (18) погрешность определения условной длительности импульса минимальна и равна +3.78 %. Кроме того, необходимо отметить, что выражение (4) позволяет описать грозовой импульс тока ОПН, у которого длительность импульса в два с половиной раза больше длительности фронта. Погрешность определения длительности импульса при этом составляет –0.55 %.

2. С помощью динамической модели металлоксидного нелинейного ограничителя перенапряжений проведено исследование влияния длительности полученных импульсов на максимум остающегося напряжения ОПН. Установлено, что отклонения от требуемой длительности импульса в большую сторону при моделировании не влияют на максимальное значение остающегося напряжения ОПН.

Литература

1. Meister, A. Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies [Text] / A. Meister, R. Shayani, M. De Oliveira // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2012. – Vol. 3, No. 11. – P. 35–45. doi:[10.4314/ijest.v3i11.4s](https://doi.org/10.4314/ijest.v3i11.4s)
2. 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)
3. 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)
4. 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.
5. 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)
6. Standler, R. B. Equations for some transient overvoltage test waveforms [Text] / R. B. Standler // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1988. – Vol. 30, No. 1. – P. 69–71. doi:[10.1109/15.19891](https://doi.org/10.1109/15.19891)

7. De Conti, A. Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms [Text] / A. De Conti, S. Visacro // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2007. – Vol. 49, No. 2. – P. 448–451. doi:[10.1109/temc.2007.897153](https://doi.org/10.1109/temc.2007.897153)

8. Koehler, F. Simplified Analytical Representation of Lightning Strike Waveshapes [Text] / F. Koehler, J. Swingler // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 1. – P. 153–160. doi:[10.1109/temc.2015.2493582](https://doi.org/10.1109/temc.2015.2493582)

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

10. Beyer, M. Hochspannungstechnik: theoretische und praktische grundlagen für die anwendug [Text] / M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl. – Berlin: Springer-Verlag, 1986. – 362 p. doi:[10.1007/978-3-642-61633-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4)

11. 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)

12. 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/download/rm11.pdf>

13. Trotsenko, Y. Effect of piecewise linear current waveforms on surge arrester residual voltage [Text] / Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – Vol. 2, No. 1 (34). – P. 25–31. doi:[10.15587/2312-8372.2017.97507](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.97507)