

УДК 621.316.93

DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225492

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ МОДЕЛЕЙ

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

Объектом исследования является схема замещения генератора импульсных токов, предназначенного для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений. Расчёт параметров генератора импульсных токов при разряде батареи конденсаторов на сложную нелинейную нагрузку представляет сложную задачу для аналитического решения. До сих пор применение частотно-зависимых моделей нелинейных ограничителей перенапряжений ограничивалось задачами расчёта перенапряжений. Частотно-зависимые модели нелинейных ограничителей перенапряжений позволяют предсказать остающееся напряжение с высокой точностью. Это является основанием считать, что частотно-зависимые модели нелинейных ограничителей перенапряжений можно использовать для расчёта основных параметров генераторов импульсных токов, предназначенных для физических испытаний нелинейных ограничителей перенапряжений.

Задача определения параметров эквивалентной схемы замещения, необходимых для получения разрядного тока заданной формы и амплитуды в схеме с нелинейной нагрузкой генератора импульсных токов была решена с помощью схемотехнического моделирования.

В данной работе представлены результаты исследования процессов в схеме замещения генератора импульсных токов, в качестве модели нагрузки которого используется динамическая модель нелинейного ограничителя перенапряжений. Для этого была составлена эквивалентная схема замещения разрядного контура генератора импульсных токов. Определены параметры элементов схемы (включая необходимое количество конденсаторов и их зарядное напряжение), необходимые для получения разрядного тока заданной стандартизированной формы и амплитуды. Параметры разрядного контура определены для нелинейных ограничителей перенапряжений трёх различных классов напряжения. Установлено, что относительная погрешность определения остающегося напряжения на зажимах модели нелинейного ограничителя перенапряжений не превышает 3 %.

Работа вносит вклад в дальнейшее развитие схемотехнического моделирования нелинейных ограничителей перенапряжений и расширение области применения динамических моделей нелинейных ограничителей перенапряжений. В результате проведенных исследований показана возможность применения частотно-зависимых моделей нелинейных ограничителей перенапряжений для определения формы разрядного тока в генераторах импульсных токов. Проведенные исследования являются

перспективными в связи с тем, что нелинейные ограничители перенапряжений стали обязательным средством для защиты изоляции оборудования электрических сетей от внешних и внутренних перенапряжений.

Ключевые слова: *генератор импульсных токов, нелинейный ограничитель перенапряжений, батарея высоковольтных конденсаторов.*

1. Введение

Нелинейные ограничители перенапряжений предназначены для защиты изоляции электрооборудования от коммутационных и грозовых перенапряжений. Благодаря способности к ограничению любых видов перенапряжений эти защитные аппараты стали необходимым атрибутом в электроустановках всех классов напряжений. Каждый нелинейный ограничитель перенапряжений имеет ряд важных характеристик, которые учитывают при его выборе. Одной из основных характеристик нелинейного ограничителя перенапряжений является остающееся напряжение, то есть напряжение, которое возникает между его выводами при протекании через него разрядного тока. Именно значение остающегося напряжения при протекании коммутационного импульса тока и грозового импульса тока главным образом характеризует защитные свойства нелинейного ограничителя перенапряжений. Эти значения в киловольтах производители нелинейных ограничителей перенапряжений указывают в каталогах своей продукции. Проверить эти цифры конечный покупатель нелинейных ограничителей перенапряжений может только с помощью такой высоковольтной импульсной установки, как генератор импульсных токов. Кроме испытаний по определению остающегося напряжения, разрабатывают генераторы импульсных токов для испытания импульсом тока большой длительности [1]. Одним из основных элементов генератора импульсных токов является батарея высоковольтных конденсаторов. Для получения импульса тока требуемой формы батарею конденсаторов вначале заряжают, а потом разряжают на объект испытания с помощью коммутационных аппаратов. Если параметры объекта испытания являются линейными, то для расчёта генератора импульсных токов можно использовать готовые соотношения [2], которые применяются уже несколько десятков лет. Однако в данном случае объектом испытания является нелинейный ограничитель перенапряжений, варисторы которого обладают резко нелинейной вольт-амперной характеристикой. Расчёт параметров генератора импульсных токов при разряде батареи конденсаторов на нелинейную нагрузку является новой задачей особой сложности. Дополняя изложенное выше необходимо отметить, что нелинейный ограничитель перенапряжений характеризуется не просто нелинейной, а динамической нелинейной вольт-амперной характеристикой. Это означает, что его вольт-амперная характеристика различна для быстрых и относительно медленных перенапряжений. Поэтому, например, для коммутационного и грозового импульсов тока одинаковой амплитуды на зажимах нелинейного ограничителя перенапряжений возникнут различные падения напряжения. Это свойство достаточно хорошо воспроизводят частотно-зависимые эквивалентные схемы

замещения нелинейного ограничителя перенапряжения [3–5]. Динамические модели нелинейных ограничителей перенапряжений были неоднократно исследованы в различных публикациях [6–8], где была показана их высокая точность. Это является основанием считать, что динамические модели нелинейных ограничителей перенапряжений можно использовать при расчёте основных параметров генератора импульсных токов, предназначенного для натуральных испытаний нелинейных ограничителей перенапряжений.

Поэтому актуальным является развитие эффективных подходов к расчёту параметров высоковольтных импульсных установок с учётом новых достижений в области схемотехнического моделирования.

Таким образом, *объектом исследования* выбрана схема замещения генератора импульсных токов, предназначенного для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений.

А цель работы заключается в определении электрических параметров схемы генератора импульсных токов, необходимых для получения испытательного импульса тока заданной амплитуды и формы в разрядной цепи с нелинейным ограничителем перенапряжений.

2. Методика проведения исследований

Нелинейный ограничитель перенапряжений – это защитный аппарат, через который в условиях эксплуатации будут протекать токи, непосредственно связанные с воздействием молнии. По этой причине нелинейные ограничители перенапряжений должны быть испытаны импульсными токами, по своей форме близкими к токам молнии. Помимо амплитуды, форма импульса тока определяется ещё двумя параметрами, которые характеризуют изменение тока во времени. Это длительность фронта T_1 и длительность импульса T_2 . Первый из этих параметров условно характеризует время нарастания тока до максимума, а второй, соответственно, время до уменьшения тока вдвое от максимального. Соответственно, форму импульса записывают в виде соотношения T_1/T_2 . Для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений грозовым импульсом тока принята форма импульсного тока 8/20 мкс. Соответственно, генератор импульсных токов должен воспроизводить такой ток в условиях высоковольтной лаборатории.

Как уже было отмечено выше, основными компонентами генератора импульсных токов являются высоковольтные конденсаторы. В данной работе в качестве элементной базы были выбраны конденсаторы ИК-50-3. Данные конденсаторы обладают следующими характеристиками: номинальное напряжение 50 кВ; номинальная ёмкость 3 мкФ; внутренняя индуктивность конденсатора 40 нГн. В качестве объектов испытания были выбраны модели трёх типовых нелинейных ограничителей перенапряжений, предназначенных для использования в сетях с классом напряжения 6 кВ, 10 кВ и 35 кВ, соответственно. Целью данной статьи не является исследование свойств нелинейных ограничителей перенапряжений какого-то конкретного производителя. Выбранные аппараты обладают типовыми характеристиками для своих классов напряжения. Более того, большинство нелинейных

ограничителей перенапряжений различных производителей обладают хоть и различными, но в целом, близкими защитными характеристиками. По этим причинам, для исключения возможных недоразумений авторы не указывают страну и фирму-производителя нелинейных ограничителей перенапряжений. Основная схема исследования показана на рис. 1.

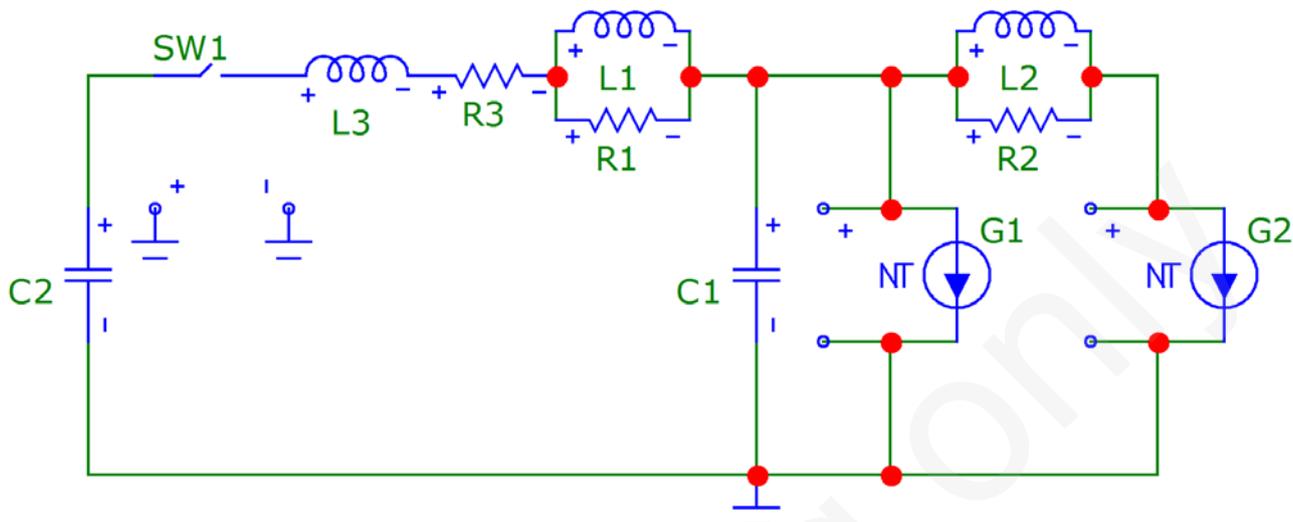


Рис. 1. Схема генератора импульсных токов с нелинейным ограничителем перенапряжений в качестве объекта испытания

На рис. 1: R_1 , R_2 , L_1 , L_2 и C_1 – линейные элементы модели нелинейного ограничителя перенапряжений, в свою очередь, G_1 и G_2 – нелинейные элементы модели нелинейного ограничителя перенапряжений. Расчёт численных значений параметров модели нелинейного ограничителя перенапряжений должен проводиться в соответствии с процедурой, приведенной в [3]. Моделирование электрической схемы на рис. 1 выполнено с помощью программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 12 [9]. Моделирование нелинейных элементов G_1 и G_2 модели нелинейного ограничителя перенапряжений на рис. 1 выполнено с помощью модели источника тока, управляемого напряжением (NTIoFV), в соответствии с методикой, предложенной в [10]. Остальные элементы на рис. 1 относятся к схеме замещения генератора импульсных токов: C_2 – накопительный конденсатор, заряженный до определенного напряжения; R_3 – резистор; L_3 – индуктивность, представляющая собой сумму паразитных индуктивностей батареи конденсаторов, паразитных индуктивностей соединительных проводов, паразитной индуктивности резистора и т. д. Ключ SW_1 представляет собой модель управляемого коммутатора, с помощью которого осуществляется разряд заряженного конденсатора C_2 на L_3 , R_3 и элементы модели нелинейного ограничителя перенапряжений (R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , C_1 , G_1 и G_2).

Данная схема может быть использована при поэтапном расчёте параметров генератора импульсных токов. С помощью схемы можно проверить влияние допустимой индуктивности и активного сопротивления разрядного контура на форму и амплитуду разрядного тока. Также с помощью схемы можно проверить влияние выбранного количества конденсаторов и значения их

зарядного напряжения на форму и амплитуду разрядного тока через нелинейный ограничитель перенапряжений (определенного класса напряжения). Основная цель схемотехнического моделирования – это определить параметры элементов схемы, необходимые для получения разрядного тока амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс через нелинейный ограничитель перенапряжений. Опорной точкой для определения характеристик нелинейных элементов модели (рис. 1) является остающееся напряжение на нелинейном ограничителе перенапряжений именно при волне 8/20 мкс с амплитудой 10 кА [10]. Результаты моделирования, полученные с помощью схемы замещения генератора импульсных токов, приведены в следующем разделе работы.

3. Результаты исследований и их обсуждение

В результате моделирования было установлено следующее. Здесь и далее приводим окончательные данные из всего массива данных, полученного в результате многовариантного анализа (Stepping).

Для того чтобы получить требуемую волну разрядного тока в цепи с нелинейным ограничителем напряжения для сети 35 кВ необходимы 12 конденсаторов ИК-50-3, соединенные последовательно-параллельно в соответствии с рис. 2. Параметры цепи (рис. 1) могут быть следующими: ёмкость батареи конденсаторов $C_2=4$ мкФ, индуктивность разрядной цепи $L_3=8$ мкГн, активное сопротивление разрядного контура $R_3=0.33$ Ом. Для получения разрядного тока амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс батарея конденсаторов должна быть заряжена до напряжения 144.2 кВ.

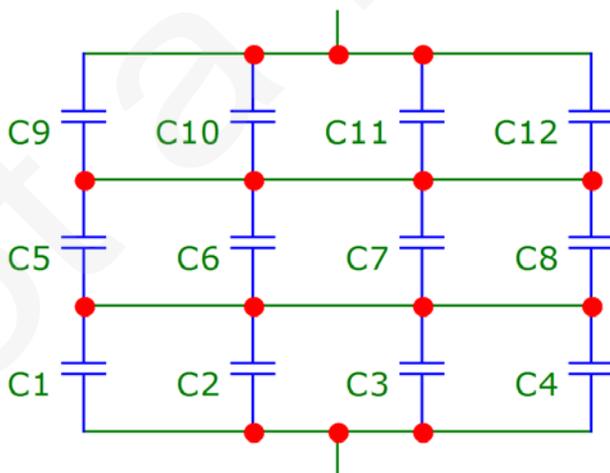


Рис. 2. Схема соединения конденсаторов ИК-50-3 в батарею конденсаторов для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений

Форма разрядного тока, падение напряжения между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений и поглощённая энергия показаны на рис. 3. Здесь и далее приводим снимок экрана (скриншот) программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 12 [9].

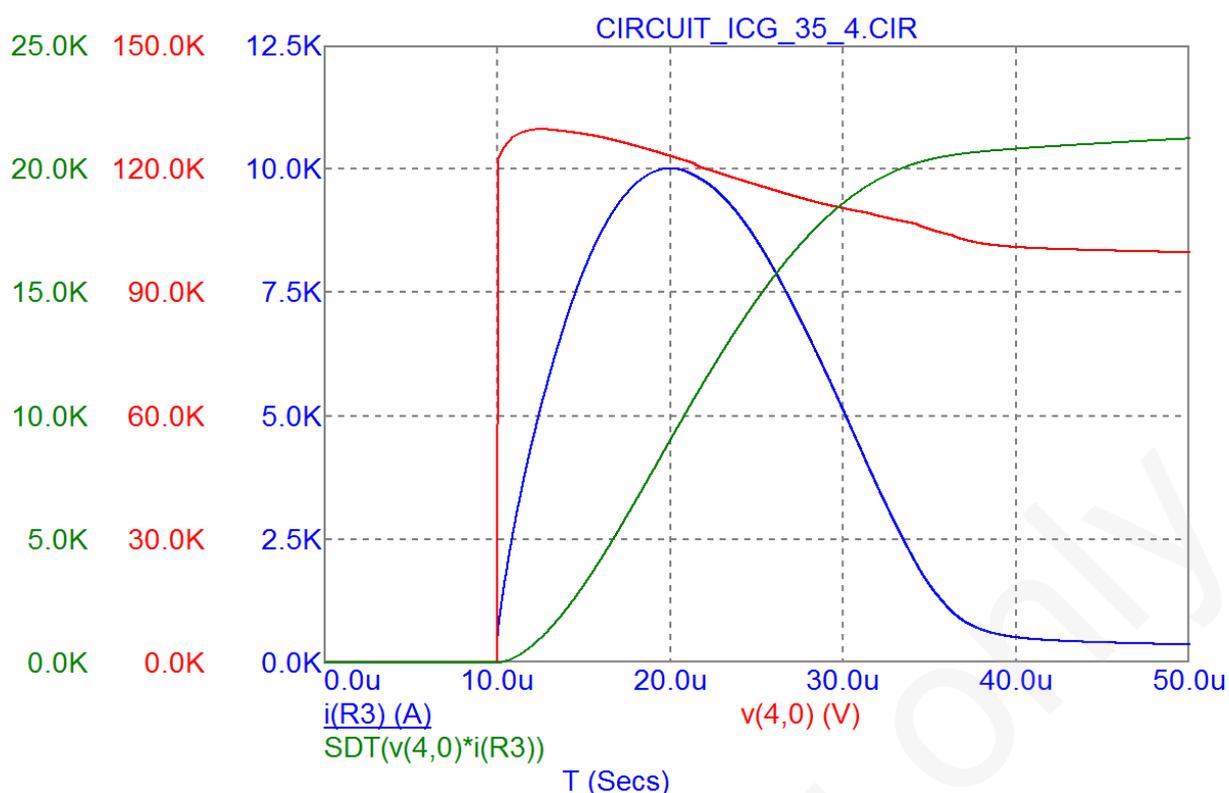


Рис. 3. Оценка разрядного тока, остающегося напряжения и поглощённой энергии при испытании нелинейного ограничителя перенапряжений для сети 35 кВ

Для выбранного нелинейного ограничителя перенапряжений паспортное значение остающегося напряжения составляет 126.0 кВ при разрядном токе амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс. Значение, полученное при моделировании, составляет 129.66 кВ. Относительная погрешность была рассчитана по формуле (1) и составила +2.91 %.

$$\xi = \frac{V'_r - V_r}{V_r} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где V'_r – полученное в результате моделирования максимальное значение остающегося напряжения (кВ), возникающее между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений; V_r – паспортное максимальное значение остающегося напряжения (кВ) для выбранного нелинейного ограничителя перенапряжений.

Энергия, поглощённая нелинейным ограничителем перенапряжений составляет 21.24 кДж. Здесь и далее значение энергии было определено с помощью встроенной функции «SDT» программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 12 [9]. Эта встроенная функция соответствует аналитической функции для определения энергии:

$$W(t) = \int_{t_0}^t u(t)i(t)dt,$$

где $W(t)$ – энергия (Дж), поглощённая нелинейным ограничителем перенапряжений, как функция от времени; $u(t)$ – остающееся напряжение (В), возникающее между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений как функция от времени; $i(t)$ – разрядный ток (А), протекающий через нелинейный ограничитель перенапряжений; t_0 – момент времени, в который между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений возникает падение напряжения, с; t – текущий момент времени, с.

С помощью процедуры, приведенной в [3], были определены параметры модели нелинейного ограничителя перенапряжений на рис. 1. Для модели нелинейного ограничителя перенапряжений для сети 35 кВ были получены следующие значения: $L_1=0.121$ мкГн, $R_1=60.5$ Ом, $L_2=9.075$ мкГн, $R_2=39.325$ Ом, $C_1=165.289$ пФ.

Для того чтобы физически реализовать схему на рис. 2, высоковольтные конденсаторы должны быть установлены на изоляторы, чтобы обеспечить необходимый уровень изоляции по отношению к земле. Например, баки конденсаторов C_5 – C_8 должны быть изолированы от земли на 50 кВ, в свою очередь баки конденсаторов C_9 – C_{12} должны быть изолированы от земли на 100 кВ. Для этой цели предполагается использовать элементы генератора импульсных напряжений, установленного в высоковольтной лаборатории кафедры теоретической электротехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (рис. 4). Уравнительные резисторы батареи конденсаторов на рис. 4 не показаны.



Рис. 4. Монтаж конденсаторов ИК-50-3 на опорные изоляторы для обеспечения необходимой изоляции от земли в генераторе импульсных напряжений

Для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений для сетей 10 кВ и 6 кВ предполагается использовать эту же батарею конденсаторов, регулируя только зарядное напряжение конденсаторов и индуктивность. Эта индуктивность реализуется в виде дополнительной катушки, индуктивность которой входит в L_3 на рис. 1.

Для того чтобы получить требуемую волну разрядного тока в цепи с нелинейным ограничителем напряжения для сети 10 кВ параметры цепи могут быть следующими: ёмкость батареи конденсаторов $C_2=4$ мкФ, индуктивность разрядной цепи $L_3=13$ мкГн, активное сопротивление разрядного контура $R_3=0.33$ Ом. Для получения разрядного тока амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс батарея конденсаторов должна быть заряжена до напряжения 59.8 кВ. Форма разрядного тока, падение напряжения между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений и поглощённая энергия показаны на рис. 5.

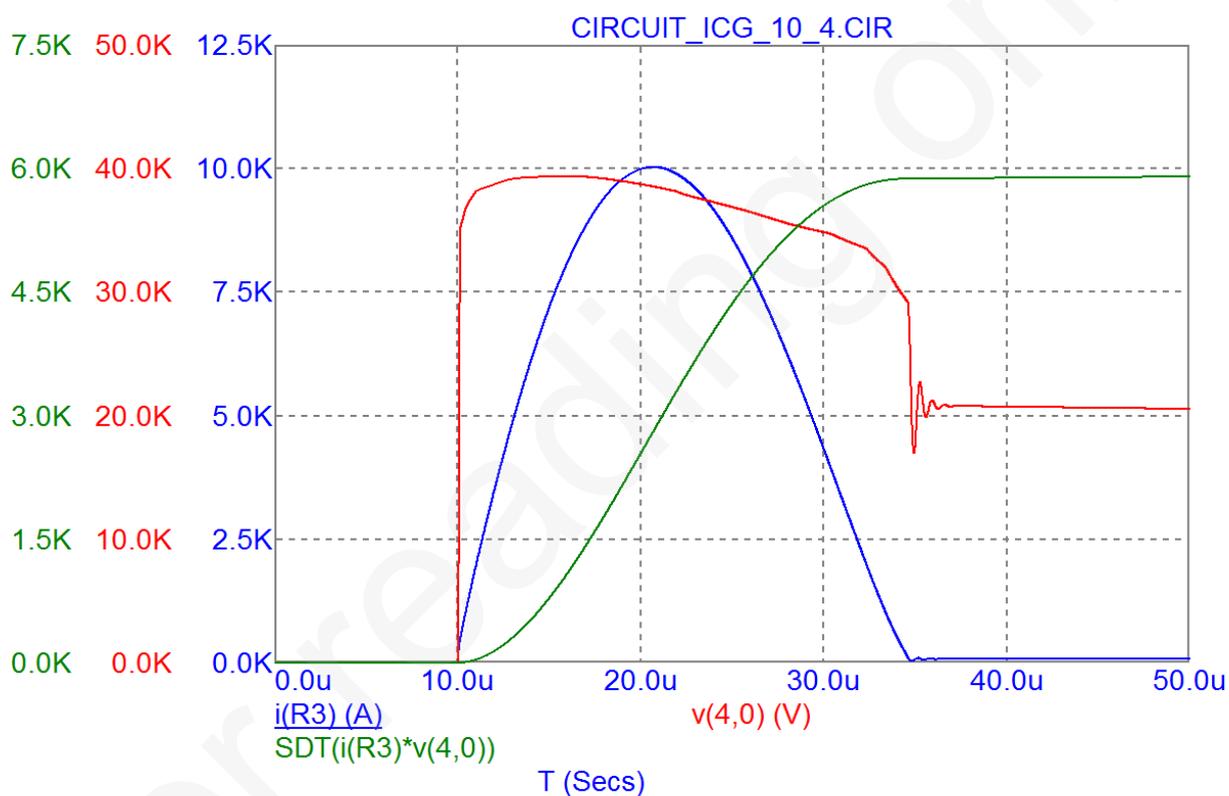


Рис. 5. Оценка разрядного тока, остающегося напряжения и поглощённой энергии при испытании нелинейного ограничителя перенапряжений для сети 10 кВ

Для выбранного нелинейного ограничителя перенапряжений паспортное значение остающегося напряжения составляет 39.6 кВ при разрядном токе амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс. Значение, полученное при моделировании, составляет 39.39 кВ. Согласно (1) относительная погрешность составляет -0.53% . Энергия, поглощённая нелинейным ограничителем перенапряжений составляет 5.9 кДж. Параметры модели нелинейного ограничителя перенапряжений на рис. 1: $L_1=0.025$ мкГн, $R_1=12.5$ Ом, $L_2=1.875$ мкГн, $R_2=8.125$ Ом, $C_1=800.0$ пФ.

Для того чтобы получить требуемую волну разрядного тока в цепи с нелинейным ограничителем напряжения для сети 6 кВ параметры цепи могут быть такими же, как в предыдущем случае: ёмкость батареи конденсаторов $C_2=4$ мкФ, индуктивность разрядной цепи $L_3=13$ мкГн, активное сопротивление разрядного контура $R_3=0.33$ Ом. Для получения разрядного тока амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс батарея конденсаторов должна быть заряжена до напряжения 43.1 кВ. Форма разрядного тока, падение напряжения между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений и поглощённая энергия показаны на рис. 6.

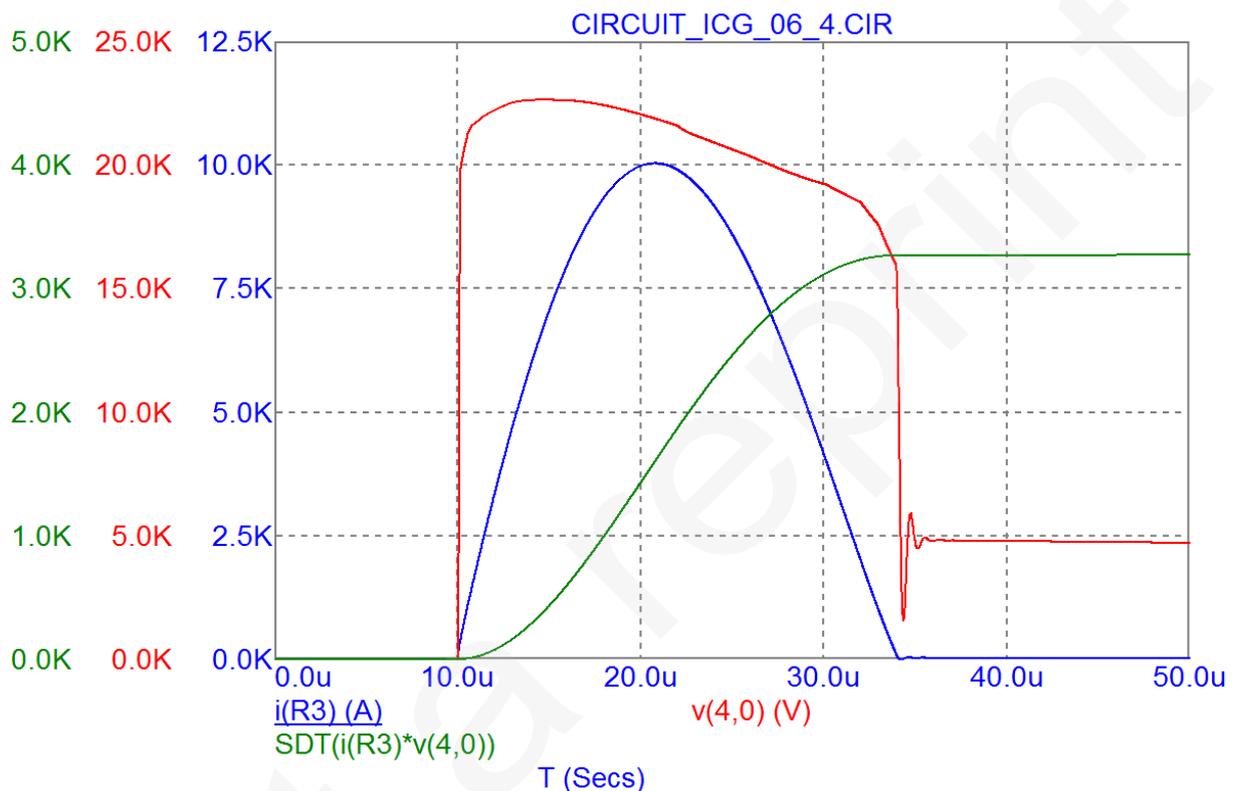


Рис. 6. Оценка разрядного тока, остающегося напряжения и поглощённой энергии при испытании нелинейного ограничителя перенапряжений для сети 6 кВ

Для выбранного нелинейного ограничителя перенапряжений паспортное значение остающегося напряжения составляет 22.4 кВ при разрядном токе амплитудой 10 кА формой 8/20 мкс. Значение, полученное при моделировании, составляет 22.63 кВ. Согласно (1) относительная погрешность составляет +1.03 %. Энергия, поглощённая нелинейным ограничителем перенапряжений составляет 3.27 кДж. Параметры модели нелинейного ограничителя перенапряжений на рис. 1: $L_1=0.019$ мкГн, $R_1=9.5$ Ом, $L_2=1.425$ мкГн, $R_2=6.175$ Ом, $C_1=1053.0$ пФ.

Как видно, для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений различных классов напряжения 6 кВ и 10 кВ возможно использовать один и тот же генератор импульсных токов с незначительным варьированием его параметров.

Развитие и расширение области применения динамических моделей нелинейных ограничителей перенапряжений является перспективным в связи с тем,

что эта категория защитных аппаратов стала практически обязательной для защиты изоляции оборудования электрических сетей от различных перенапряжений. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования, направленные на снижение затрат времени на расчёт параметров импульсных установок для испытания нелинейных ограничителей перенапряжений являются важными. Согласно [2] интегрально-дифференциальное уравнение тока разряда для эквивалентной схемы замещения генератора напряжений имеет вид:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = U_0, \quad (3)$$

где L – индуктивность разрядного контура; R – сопротивление разрядного контура; C – ёмкость батареи конденсаторов; U_0 – напряжение, до которого заряжена батарея конденсаторов.

Полагая сопротивление R нелинейным, введя замену $u_R = Ri$, затем разделив уравнение (3) слева и справа на L получим:

$$\frac{di}{dt} + \frac{u_R}{L} + \frac{1}{LC} \int idt = \frac{U_0}{L}. \quad (4)$$

Продифференцировав уравнение (4) слева и справа получим дифференциальное уравнение разряда в генераторе импульсных токов с нелинейной нагрузкой:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{L} \frac{du_R}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0. \quad (5)$$

Аналитическое решение этого уравнения в общем виде не существует. Кроме того, уравнение (5) справедливо только, если нелинейный ограничитель перенапряжений моделировать в виде одного нелинейного резистора. Однако это является сильным упрощением, что и послужило причиной создания сложных моделей нелинейных ограничителей перенапряжений, обладающих динамической вольт-амперной характеристикой [3–5]. Поэтому подход, применённый в данной работе, является альтернативным способом расчёта формы разрядного тока и формы остающегося напряжения для нелинейного ограничителя перенапряжений в разрядной цепи генератора импульсных токов. Предложенный подход устраняет необходимость решения дифференциального уравнения (5) и сводит задачу определения параметров схемы генератора импульсных токов к схемотехническому моделированию. В работе представлен фрагмент одного из этапов многоэтапного расчёта данного типа высоковольтной импульсной установки. Параметры R_3 и L_3 (рис. 1) представляют собой суммарные значения соответствующих параметров нагрузки и элементов разрядного контура генератора импульсных токов (шин, искровых промежутков, шунта, контакторов, дополнительной индуктивности и т. д.). Уточнение активного сопротивления R_3 и

индуктивности L_3 выполняется на следующем этапе и является предметом исследования другой научной работы.

4. Выводы

В работе впервые показано, что динамические модели нелинейных ограничителей перенапряжений можно непосредственно использовать для определения основных параметров генератора импульсных токов, предназначенного для натуральных испытаний нелинейных ограничителей перенапряжений. Также показано, что с помощью схемотехнического моделирования можно выбирать параметры элементов схемы, необходимые для получения разрядного тока с заданной амплитудой и формой, который должен протекать через нелинейный ограничитель перенапряжений по условиям испытаний. Данный подход показал свою эффективность для моделей различных нелинейных ограничителей перенапряжений, предназначенных для использования в сетях с разными классами напряжения. В работе приведены полученные в результате моделирования графики разрядного тока, остающегося напряжения, возникающего между выводами нелинейного ограничителя перенапряжений и поглощённой энергии. Представленный подход значительно упрощает процедуру определения параметров схемы генераторов импульсных токов, предназначенных для испытаний нелинейных ограничителей перенапряжений.

Литература

1. Prasertsang, C., Triuattanapiruk, N. Yutthagowith, P. (2013). A long duration impulse current generator for testing surge arresters in distribution systems. *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Krabi, 1–4. doi: <http://doi.org/10.1109/ecticon.2013.6559579>
2. Beyer, M., Boeck, W., Möller, K., Zaengl, W. (1986). *Hochspannungstechnik: theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*. Berlin: Springer-Verlag, 362. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4>
3. Modeling of metal oxide surge arresters. (1992). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7 (1), 302–309. doi: <http://doi.org/10.1109/61.108922>
4. Pinceti, P., Giannettoni, M. (1999). A simplified model for zinc oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (2), 393–398. doi: <http://doi.org/10.1109/61.754079>
5. Magro, M. C., Giannettoni, M., Pinceti, P. (2004). Validation of ZnO Surge Arresters Model for Overvoltage Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (4), 1692–1695. doi: <http://doi.org/10.1109/tpwr.2004.832354>
6. Meister, A., Shayani, R., De Oliveira, M. (2012). Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3 (11), 35–45. doi: <http://doi.org/10.4314/ijest.v3i11.4s>
7. Vita, V., Mitropoulou, A. D., Ekonomou, L., Panetsos, S., Stathopoulos, I. A. (2010). Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on

high-voltage transmission lines of the Hellenic network. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4 (7), 846–853. doi: <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0424>

8. Peppas, G. D., Naxakis, I. A., Vitsas, C. T., Pyrgioti, E. C. (2012). Surge arresters models for fast transients. *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. doi: <http://doi.org/10.1109/iclp.2012.6344285>

9. *Micro-Cap 12. Electronic Circuit Analysis Program*. Reference Manual (2018). Sunnyvale: Spectrum Software, 1098. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm12.pdf>

10. Trotsenko, Y., Brzhezitsky, V., Masluchenko, I. (2017). Study of surge arrester model under influence of various current pulses. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (33)), 44–48. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.92244>

For reading only