

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СХЕМАХ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЖАТ

Рассмотрены вопросы построения эквивалентных моделей приборов схем защиты от перенапряжения для программ схемотехнического моделирования. Представлен метод определения коэффициентов уравнения, описывающего импульс помехи большой мощности в виде двухэкспоненциального импульса. Разработаны модели элементов схем защиты от перенапряжения с учетом их вольт-секундных характеристик. Предложенные модели могут быть использованы для моделирования схем защиты устройств ЖАТ от импульсных помех большой мощности.

В связи с широким внедрением в современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики микроэлектронных средств возникла проблема их защиты от перенапряжений.

Существующие классические схемы защиты в некоторой степени справлялись с защитой релейных систем ЖАТС. При этом переход на новую элементную базу потребовал применения более быстродействующих приборов защиты, но и это не позволило полностью решить проблему.

Для исследования процессов, происходящих в схемах защиты от перенапряжений, вызванных мощной импульсной помехой в соответствии со стандартом МЭК 61643-1:2005 «Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах», применяется импульсный генератор, упрощенная схема которого представлена на рисунке 1. При формировании импульса источник высокого напряжения $E_{вн}$ заряжает конденсатор C_n через сопротивление R_3 . После срабатывания ключа происходит разряд емкости на нагрузку. При этом резисторы $R_{д1}$, $R_{д2}$ определяют длительность импульса и совместно с индуктивностью L_{ϕ} , задают время и форму нарастания импульса. Резистор $R_{нр}$ формирует полное сопротивление испытательного генератора.

При проведении испытаний используется импульс напряжения с фактическим временем фронта 1,2 мкс и полупериодом 50 мкс (1,2/50 voltage impulse) или импульс тока 8/20 (8/20 current impulse), который представляет собой импульс тока с фактическим временем фронта 8 мкс и временем полупериода 20 мкс.

У реального импульса разряда молнии осциллограммы токов свидетельствуют о том, что он имеет нулевую начальную производную в момент формирования канала стримера [3–5]. Уравнение, удовлетворяющее этому условию имеет вид

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t)y(t) = I_{\max} z(t)y(t),$$

где $x(t) = t/t_1 \frac{(t/t_1)^n}{1+(t/t_1)^n}$; $y(t) = \exp(-\frac{t}{t_2})$; n – параметр, определяющий крутизну волны; $z(t)$ – сопротивление канала молнии, составляет по различным оценкам величину 150–300 Ом [5].

При этом присутствующее в уравнении изменяющееся сопротивление канала молнии значительно усложняет расчет.

При проведении схемотехнического моделирования схем защиты от перенапряжений гораздо более удобно представить мощную помеху с помощью уравнения двухэкспоненциального импульса. Импульс формиру-

ется разностью двух экспоненциальных функций. Несмотря на то, что импульс имеет начальную производную, отличную от нуля, он достаточно точно воспроизводит форму и параметры сигнала на выходе испытательного генератора молниевых разрядов.

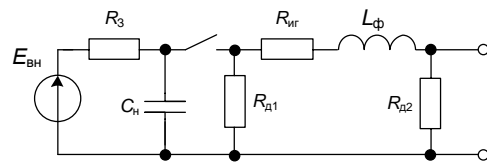


Рисунок 1 — Упрощенная схема комбинированного импульсного генератора мощных импульсных помех (1/50 мкс – 6,4/16 мкс)

При использовании двухэкспоненциального импульса сигнал на выходе испытательного генератора может быть представлен в виде уравнения

$$A(t) = \frac{A_{\max}}{k_m} [\exp(-\beta_1 t) - \exp(-\beta_2 t)],$$

где β_2 , β_1 – коэффициенты, определяющиеся скоростями нарастания и спада тока молнии; k_m – корректирующий фактор амплитуды молнии; A_{\max} – амплитудное значение тока молнии.

Основные параметры двухэкспоненциального импульса, которые нормируются в соответствии с требованиями стандарта, и способы их определения представлены на рисунке 2.

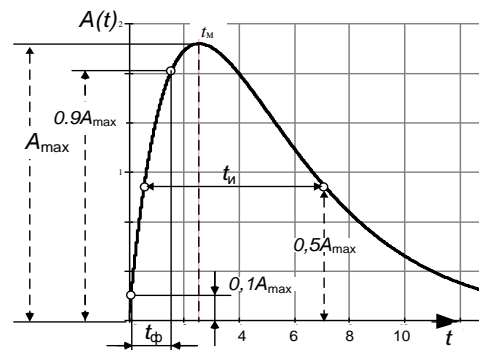


Рисунок 2 – Графическое определение параметров двухэкспоненциального импульса

В уравнении импульса вводится поправочный коэффициент k_m , учитывающий то, что амплитуда импульса меньше амплитуд экспоненциальных составляющих. Это ясно из приведенного на рисунке 3 построения. Пунктирными линиями изображены графики двух составляющих, разность которых представляет график рассматриваемого импульса.

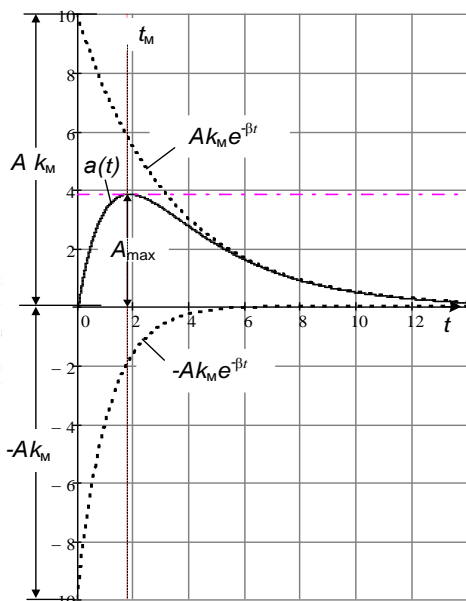


Рисунок 3 – Формирование двухэкспоненциального импульса

Продифференцировав уравнение импульса по времени, из условия $dA/dt = 0$ можно найти момент, в который функция $A(t)$ достигает максимума $A_{\max} = A(t_M)$:

$$t_M = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \ln \frac{\beta_2}{\beta_1},$$

При этом выполняется соотношение

$$A_{\max} = k_M A,$$

где A – амплитуда экспоненциальных составляющих.

Значение корректирующего фактора k_M можно определить из соотношений

$$k_M = e^{\gamma_1} - e^{\gamma_2}, \quad \gamma_1 = \frac{\ln \gamma}{\gamma - 1}, \quad \gamma_2 = \frac{\gamma \ln \gamma}{\gamma - 1},$$

где $\gamma = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$.

Установленный график зависимости корректирующего фактора $k_M = k_M(\gamma)$ приводится на рисунке 4. Он позволяет по заданию величины A найти высоту A_{\max} . При малых значениях $\gamma < 2$ высота $A_{\max} < A$; при $\gamma > 10$ высота A_{\max} приближается к A .

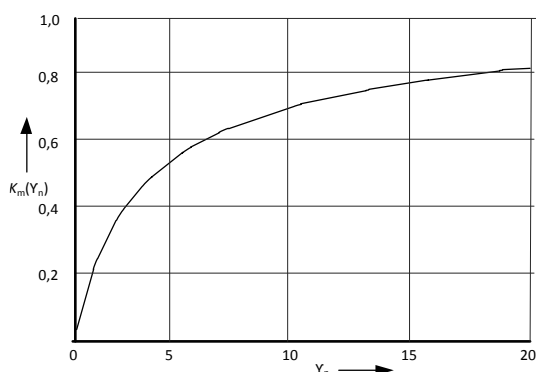


Рисунок 4 – График зависимости корректирующего фактора k_M от отношения постоянных времени $\gamma = \theta_1 / \theta_2$

Для определения параметров реальных импульсов используется понятие активного фронта t_ϕ ($t_\phi = t_{0,9} - t_{0,1}$) и длительности t_n (определяемой на уровне 0,5 амплитуды) импульса $t_n = t'_{0,5} - t'_{0,5}$ (см. рисунок 2).

В практически наиболее важных случаях ($\gamma > 1,5$) можно (с погрешностью менее 10 %) пользоваться приближенными формулами [6]:

$$\begin{cases} \beta_1 t_n = \frac{2}{\gamma} + 0,78 & \text{при } 1,5 < \gamma < 20; \\ \beta_1 t_\phi = 0,55 \ln \frac{\gamma}{\gamma - 1} & \text{при } 1,5 < \gamma < 20; \\ \beta_1 t_n = \frac{3}{\gamma} + 0,7 & \text{при } \gamma > 20; \\ \beta_1 t_\phi = \frac{1,16}{\gamma - 1} + 0,015 & \text{при } 10 < \gamma < 30. \end{cases}$$

Учитывая, что у стандартного импульса перенапряжения 1,5/50 мкс длительность фронта мала по сравнению с длительностью импульса, можно предположить, что при больших значениях γ длительность импульса на уровне 0,5A будет стремиться к $t_n \rightarrow 0,7/\beta_1$. При формировании крутизны фронта сигнала основную роль играет нарастание составляющей $\beta_2 t$. В таком случае β_2 может быть определено как нарастание фронта экспоненциального сигнала $\beta_2 = 2,2/t_\phi$. Корректирующий коэффициент k_M больших значениях γ будет стремиться к 1.

Таким образом, для формирования импульса перенапряжения 1,2/50 мкс коэффициенты уравнения будут иметь значения

$$\begin{aligned} k_M &= 0,944; \\ \beta_1 &= 0,75 / (50 \cdot 10^{-6}) = 0,015 \cdot 10^6; \\ \beta_2 &= 2,2 / (1,5 \cdot 10^{-6}) = 1,467 \cdot 10^6; \end{aligned}$$

При этом уравнение, описывающее стандартный импульс перенапряжения 1,5/50 мкс, примет вид:

$$A(t) = \frac{U_{\text{ампл}}}{0,944} [\exp(-1,5 \cdot 10^4 t) - \exp(-1,467 \cdot 10^6 t)].$$

Результаты построения для амплитудного значения напряжения перенапряжения $U_{\text{ампл}} = 10$ кВ, представленные на рисунке 5, достаточно точно воспроизводят задаваемые параметры импульса перенапряжения.

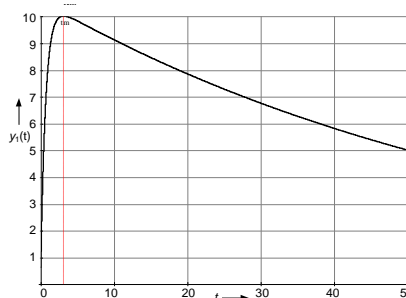


Рисунок 5 – Результат моделирования испытательного импульса 1,2/50 мкс

Наиболее распространенная схема защиты (рисунок 6) от перенапряжения представляет подключенные параллельно защищаемому устройству элементы защиты: разрядник и варистор (выравниватель).

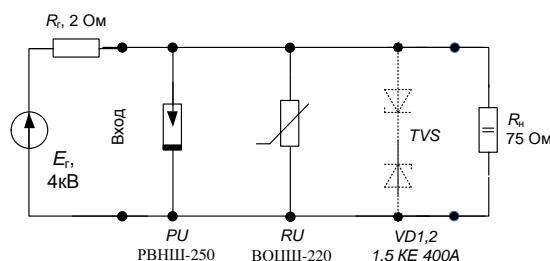


Рисунок 6 – Схема защиты от перенапряжений

В качестве третьего, быстродействующего, каскада возможна установка защитных TVS диодов VD 1,2.

Испытательный генератор импульса мощной помехи может быть представлен источником напряжения, уравнение которого задано в форме двухэкспоненциального импульса и эквивалентного сопротивления генератора R_g .

Модель разрядника в соответствии с рекомендациями IEEE выполнена в виде эквивалентной схемы, представленной на рисунке 7. Параметры элементов схемы выбираются исходя из известных параметров прибора защиты: R_b – сопротивление во включенном состоянии, $U_{вкл}$ – напряжение включения (срабатывания) и C_p – емкость разрядника.

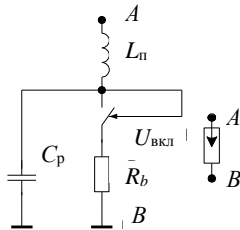


Рисунок 7 – Эквивалентная схема разрядника в соответствии с требованиями IEEE

Варистор обычно представляется нелинейным сопротивлением с известной вольт-амперной характеристикой, которая в программе моделирования может быть представлена в виде управляемого источника напряжения (рисунок 8).

Эта схема позволяет описать как элементы схемы замещения, реализуемой в соответствии с требованиями IEEE, так и достаточно простыми методами представить нелинейный элемент с соответствующими характеристиками.

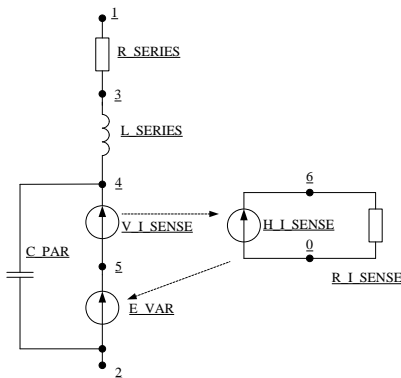


Рисунок 8 – Эквивалентная схема варистора с реализацией BAX с помощью управляемого источника напряжения

Модель содержит в своем составе элементы R_SERIES и L_SERIES , представляющие собой эквивалентные сопротивление и индуктивность выводов варистора. C_PAR является эквивалентной емкостью варистора. С помощью зависимых источников напряжения V_I_SENSE , E_VAR реализуется требуемая вольт-амперная характеристика (BAX) нелинейного элемента варистора, описываемая следующим уравнением:

$$\log(U) = b_1 + b_2 \log(I) + b_3 e^{-\log(I)} + b_4 e^{\log(I)},$$

где U – напряжение на ограничивающем элементе; I – ток через ограничивающий элемент; $b_1 - b_4$ – коэффициенты, определяющие нелинейность BAX.

Посредством изменения коэффициентов $b_1 - b_4$ имеется возможность получения BAX, соответствующей реальному варистору, и ее изменение для моделирования процессов изменения характеристики нелинейного элемента вследствие старения и т.д.

Путем линеаризации вольт-амперной характеристики варистора мы можем значительно упростить построение эквивалентной модели и использовать схему, аналогичную схеме разрядника, но со своими параметрами элементов.

Для изучения процессов, происходящих в схемах защиты от перенапряжений, проведено моделирование в программе схемотехнического моделирования *LTspice*. Данная программа представляет собой универсальную среду для проектирования и создания электрических схем с интегрированным симулятором смешанного моделирования. От аналогичных программ (*Microcap*, *OrCAD*) *LTspice* отличается малым объемом необходимого дискового пространства и более высокой скоростью моделирования, что позволяет достаточно достоверно осуществлять анализ процессов в рассматриваемых задачах. Данный программный продукт оптимизирован для исследования переходных процессов и широко применяется для схемотехнического моделирования импульсных источников питания.

На рисунке 9 показана исследуемая схема двухкаскадной защиты от перенапряжений, построенная в пакете *LTspice* с использованием разработанных моделей приборов защиты.

Генератор испытательного импульса реализован на элементе B2 и сопротивлении генератора R2. Разрядник (первая ступень защиты) выполнен на ключе управляемом напряжением S1 и дополнительных элементах эквивалентной схемы разрядника. Аналогично, но со своими параметрами схемы замещения, реализован варистор на ключе S2, устанавливаемый на вторую ступень защиты.

Параметры напряжения срабатывания приборов защиты заданы посредством *spice* – директив как параметры соответствующего ключа.

Для реализации вольт-секундных характеристик приборов защиты (моделирования их временных характеристик) схема дополняется элементами задержки срабатывания и выключения на элементах B1 и B3. Значение задержки может быть задано фиксированным или рассчитываться в процессе моделирования.

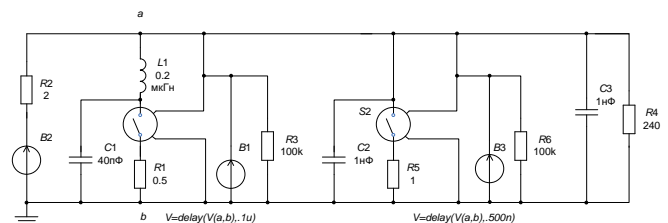


Рисунок 9 – Модель двухкаскадной схемы защиты с учётом вольт-секундной характеристики каскадов

Параметры элементов эквивалентных схем приборов грозозащиты выбраны в соответствии с их техническими параметрами. Меньшее напряжение срабатывания ключа соответствует квалификационному напряжению варистора ВОЦН-110 (применяется для защиты цепей с номинальным действующим напряжением 110 В) и

находится в пределах $U_{кв} = 330 \dots 470$ В. Времена срабатывания приборов защиты выбраны преднамеренно большими, чтобы показать процессы, происходящие в схеме защиты от перенапряжений.

Результаты моделирования классической двухкаскадной схемы представлены на рисунке 10. Как можно заметить, напряжение на нагрузке до момента срабатывания более быстродействующей второй ступени достигает величины 2,4 кВ (первый пик графика). Второй пик обусловлен продолжающимся возрастанием перенапряжения и срабатыванием разрядника (первая ступень защиты).

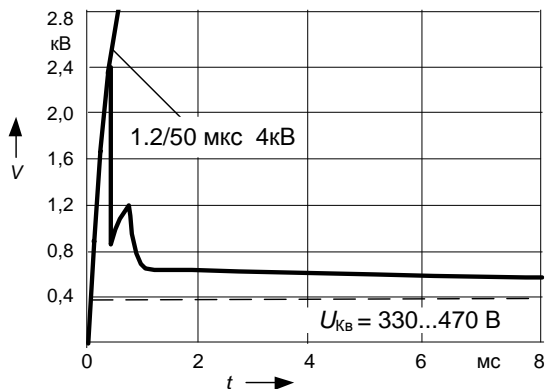


Рисунок 10 – Результаты моделирования двухкаскадной схемы грозозащиты с наименьшим квалификационным напряжением $U_{кв}$ прибора защиты 330 В

Испытания реальной двухступенчатой схемы защиты от перенапряжений были проведены с помощью испытательного генератора импульсной помехи большой мощности типа *PNW2055* фирмы «Schaffner».

Проведенные испытания показали, что применение схемотехнического моделирования с помощью пакета *LTspice* и разработанных эквивалентных моделей достаточно хорошо позволяет судить о процессах, происходящих в схемах защиты.

Анализ результатов исследований схемы защиты при различных параметрах элементов позволяет сделать следующие выводы:

- двухступенчатая схема защиты удовлетворительно защищает релейно-контактные приборы ЖАТ с напряжением пробоя изоляции более 2 кВ. Это можно объяснить тем, что реальное напряжение пробоя изоляции превышает указанное значение и имеет место кратковременное импульсное перенапряжение;

- большая величина перенапряжения в течение длительного времени разрушительно влияет на микроэлектронные элементы систем ЖАТ, так как они имеют гораздо более низкое значение напряжения пробоя, и этот процесс происходит намного быстрее;

Получено 19.12.2017

S. I. Khomenko. Schematic simulation of operation in overvoltage protection circuits of RAT.

The questions of constructing equivalent models of overvoltage protection circuits for circuit simulation programs are considered. The method for determining the coefficients of the equation is given for the form of a two-exponential pulse are presented. The models of the elements of the overvoltage protection circuits are developed with their volt-second characteristics. The proposed models can be used to simulate the protection circuits of RAT from high-power impulse noise.

– дополнение схемы защиты быстродействующим третьим каскадом на основе защитных TVS диодов (см. пункт на рисунке 6) не позволяет получить существенных улучшений параметров схемы защиты. Связано это с тем, что, имея гораздо лучшие параметры по быстродействию (десятки наносекунд), защитный диод до момента срабатывания варистора будет пропускать через себя основную часть энергии импульса. Из-за его малой мощности рассеивания это приводит к выходу прибора из строя.

Результаты моделирования и испытаний применяемых схем защиты от перенапряжений позволяют сделать вывод о неэффективности применяемой схемы грозозащиты и указывают на необходимость ее модернизации.

Один из вариантов модернизации схемы защиты от перенапряжений показан на рисунке 11.

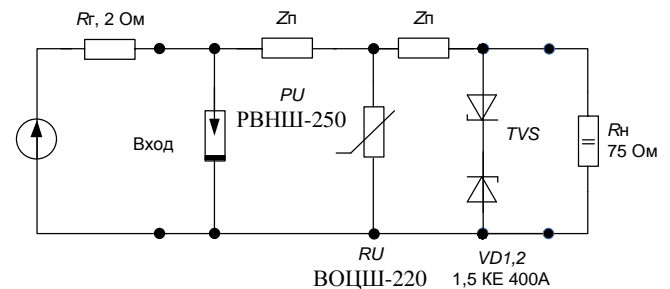


Рисунок 11 – Установка сопротивлений Z_p между каскадами защиты

Установка между ступенями защиты сопротивлений Z_p (активных или индуктивных) позволяет координировать последовательность срабатывания каскадов и отделять их друг от друга.

Список литературы

- 1 Кравченко, В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 261 с.
- 2 Кравченко, В. И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства / В. И. Кравченко. – Харьков : НТМТ, 2010. – 292 с.
- 3 Дмитриев, В. Л. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты / В. Л. Дмитриев, М. В. Дмитриев // Известия РАН: Энергетика. – 2005. – № 4. – С. 54–61.
- 4 Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с.
- 5 РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / под науч. ред. Н. Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб. : ПЭИПК, 1999. – 185 с.
- 6 Параметры типовых импульсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lektsii.org/5-78112.html>. – Дата доступа : 15.10.2017.