

УДК 621.311.031

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

А. Н. БОХАН, В. В. КРОТЕНОК

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ограничитель перенапряжения нелинейный (ОПН) представляет собой структуру легированных кристаллов оксида цинка ZnO и полупроводниковых барьеров из окислов других металлов. Вольтамперная характеристика ОПН, представленная на рис. 1 [1, с. 14], обладает такой нелинейностью, что при увеличении напряжения в два раза, ток через ОПН возрастает на несколько порядков.

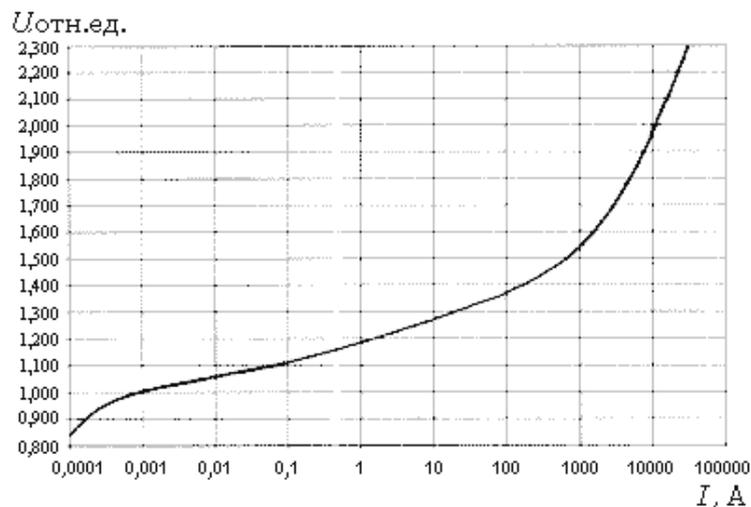


Рис. 1. Вольтамперная характеристика варисторов

Этот факт позволяет применять ОПН для ограничения перенапряжений, возникающих в электрических сетях. Для оценки эффективности различных способов ограничения перенапряжений, мест установки ОПН, требуется математическое моделирование процессов, связанных с работой ОПН.

До настоящего времени нет теории представления энергетической зоной структуры ОПН. Кроме того, сложная природа многих процессов, протекающих в ОПН, делает весьма затруднительным их аналитическое описание. Моделирование ОПН зачастую сводится к математическому описанию вольтамперной характеристики (рис. 1) и представляется отношением [2]:

$$\frac{u}{U_{ref}} = k \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

где i и u – мгновенные значения тока и напряжения; U_{ref} – пороговое значение напряжения; I_{ref} – величина тока устройства при значении напряжения, равном пороговому; α , k – показатель степени и коэффициент, определяющий нелинейность вольтамперной характеристики варистора.

При использовании такой модели ОПН результаты расчетов оказываются несоизмеримы с натуральными показаниями, уровни перенапряжений по модели оказываются ниже, чем уровни перенапряжений, полученные при эксперименте. Естественно, из-за этого могут возникать неправильные решения по поводу выбора и эксплуатации ОПН. Для избежания этого необходимо разработать модель ОПН, которая как можно точнее могла бы описать работу реального ОПН.

В предлагаемой модели ОПН будут учитываться не только статическая характеристика (рис. 1), но и динамические свойства. Для определения динамических характеристик был поставлен ряд опытов над ОПН разного класса. Было выяснено, что в модель ОПН необходимо ввести ряд дополнений:

- 1) инерционность работы;
- 2) тепловое действие тока;
- 3) физическое разрушение.

Структурная схема динамической модели ОПН представлена на рис. 2.

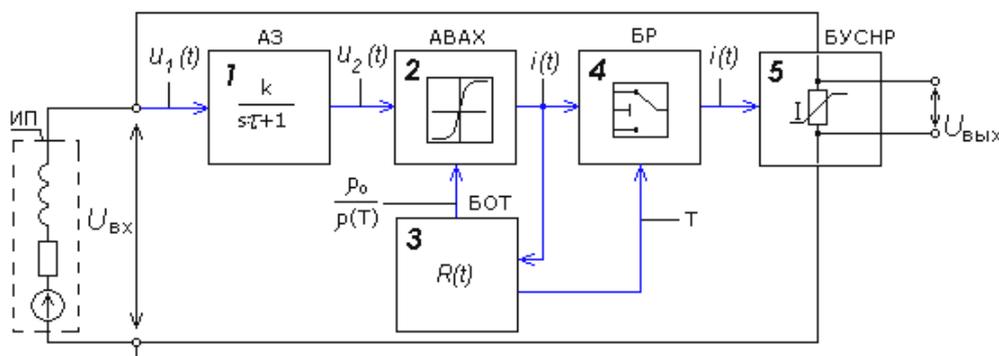


Рис. 2. Структурная схема модели ограничителя перенапряжения нелинейного

Блок 1 (А3) – аperiodическое звено, реализует инерционность работы. Блок 2 (АВАХ) – аппроксимация статической ВАХ ОПН, определяет ток ОПН по закону, описанному (1). Блок 3 (БОТ) – блок определения температуры ОПН, определяет и по обратной связи корректирует изменение ВАХ ОПН с учетом расчетных температур, определяющих изменение удельной проводимости варистора. Блок 4 (БР) – блок разрушения, моделирует разрушение ОПН по критерию превышения температуры T . Блок 5 (БУСНР) – блок управления сопротивлением резистора, изменяет сопротивление резистора посредством управляющего сигнала тока. Блок ИП является источником напряжения $U_{вх}$ заданной частоты и амплитуды со своим внутренним сопротивлением.

Инерционность работы

В ходе проведения опытов были зафиксированы рабочие характеристики (осциллограммы) тока и напряжения ОПН. Для рабочих частот (50 Гц) проведены измерения по ограничению приложенного напряжения для ОПН 0,4 и 10 кВ. На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения и тока: а) для ОПН 0,4 УХЛ1; б) для ОПН 10 КР УХЛ. При рабочей частоте 50 Гц происходит полный срез поданного напряжения, превышающего значение уровня ограничения. Из осциллограммы видно, что скорость нарастания тока ОПН значительно меньше, чем скорость спада, как для положительной, так и для отрицательной полуволн. Это позволяет сделать вывод о

том, что моделирование ОПН следует выполнять с учетом его динамических свойств.

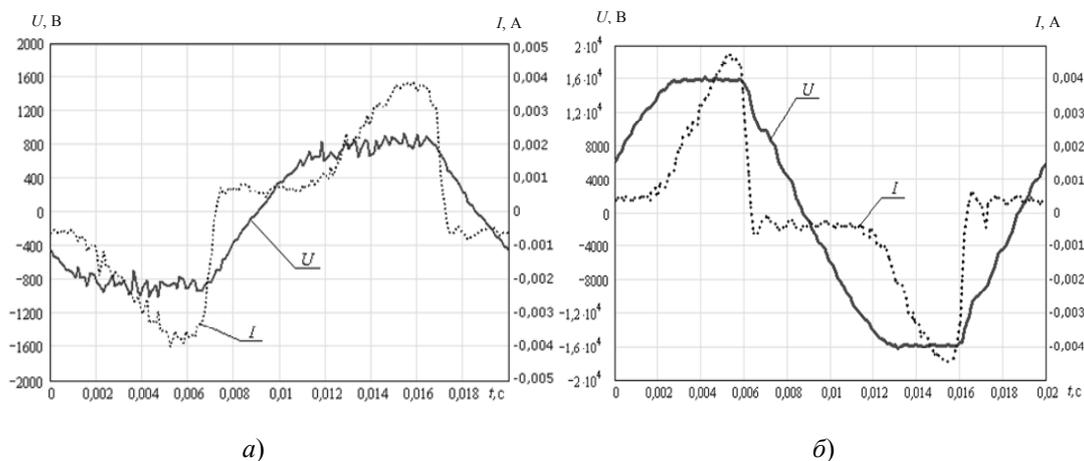


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока:
а – для ОПН 0,4 УХЛ1; б – для ОПН 10 КР УХЛ

Для определения постоянной времени запаздывания срабатывания были выполнены экспериментальные исследования ОПН 0,4 при воздействии на него напряжением 3 кВ с частотой сигнала 3,3 кГц. На рис. 4 приведена осциллограмма напряжения на ОПН. Из осциллограммы полупериода напряжения на ОПН 0,4 УХЛ видно, что время задержки включения ОПН в проводящее состояние равно t_3 (рис. 4).

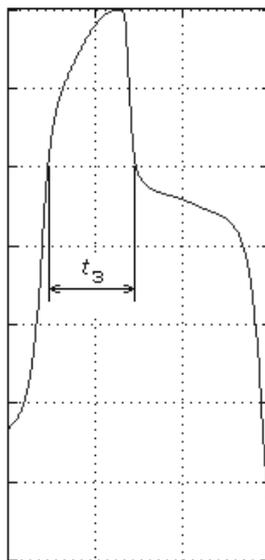


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на ОПН 0,4 УХЛ, амплитуда сигнала 2,7 кВ, частота 3,3 кГц

В электрических сетях 6–10 кВ частыми аварийными режимами 80 % являются короткие однофазные замыкания, которые сопровождаются перенапряжениями с присутствием высших гармоник. Частота свободных составляющих переходного процесса обычно находится в диапазоне 500–6000 Гц. Поэтому был проведен эксперимент работы ОПН 0,4 под действием напряжения частотой основной гармоники 50 Гц ($U_{m50} = 900$ В) и наложенной гармоники 3800 Гц ($U_{m3800} = 2000$ В), U_{ref} – уровень ограничения ОПН (рис. 5).

Из осциллограмм, приведенных на рис. 5, видно, что на значительной части периода мгновенное значение напряжения превышает уровень ограничения U_{ref} , но фактическое ограничение напряжения на ОПН происходит на небольшом отрезке. Это может быть объяснено запаздыванием срабатывания ОПН (инерционность работы).

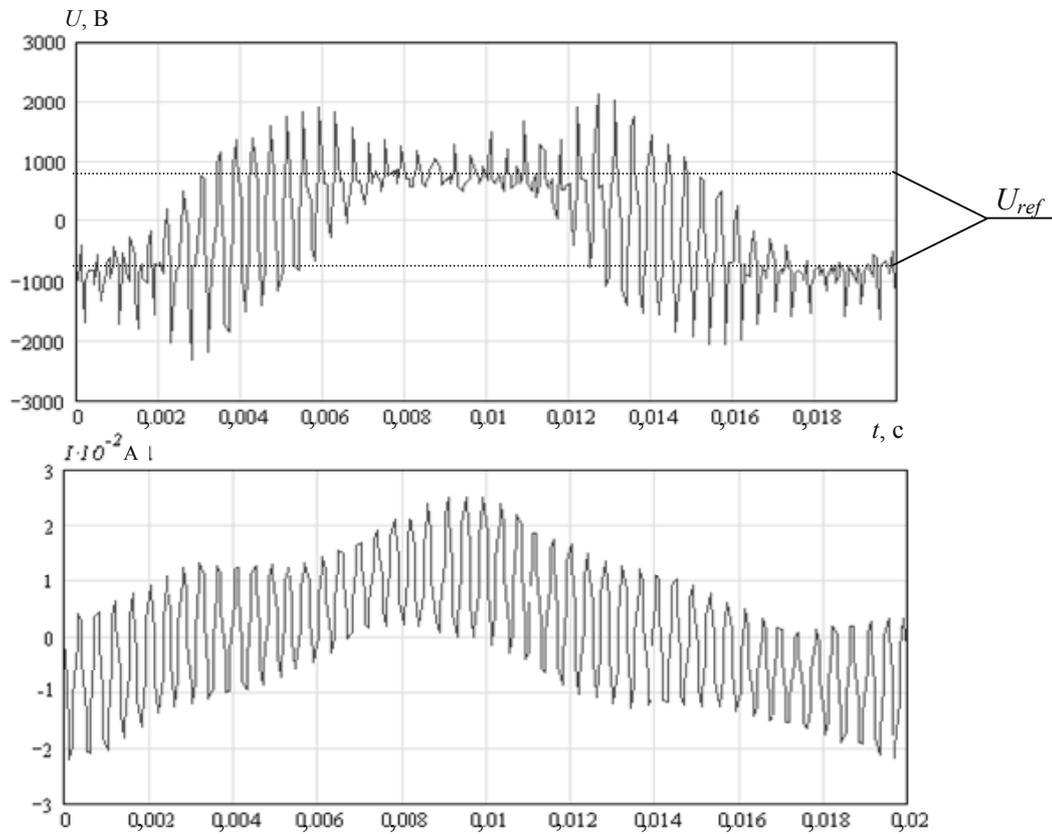


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока ОПН 0,4 при приложенном напряжении 50 Гц основной гармоники и 3,8 кГц наложенной

Моделировать запаздывание работы ОПН целесообразно аperiodическим звеном, блок 1 (рис. 2). Дифференциальное уравнение звена имеет вид (2):

$$\frac{du_2(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (K \cdot u_1(t) - u_2(t)), \quad (2)$$

где $u_2(t)$ – реакция воздействия аperiodического звена (выходная величина); $u_1(t)$ – управляющее воздействие на аperiodическое звено (входная величина); τ – постоянная времени, мкс; K – коэффициент пропорциональности между входной и выходной величинами (коэффициент усиления равен 1).

Для построения амплитудно-фазо-частотной характеристики звена воспользуемся выражением для его комплексной передаточной функции вида (3):

$$W(jf) = \frac{K}{1 + f^2 \tau^2} - j \frac{Kf\tau}{1 + f^2 \tau^2}, \quad (3)$$

где f – частота сигнала.

Исходя из этого, амплитудно-частотная характеристика звена определяется, как (4):

$$A(f) = \frac{K}{\sqrt{1 + f^2 \tau^2}} \quad (4)$$

Постоянную времени τ можно определить исходя из экспериментальных данных.

Зная время задержки t_3 , можно определить τ . При воздействии на аperiodическое звено гармоническим сигналом $u_1(t)$ на выходе получим $u_2(t)$ (рис. 6).

Если предположить, что $u_1(t)$ – это функция, описывающая перенапряжение, $u_2(t)$ – функция управления срабатывания, полученного после прохождения аperiodического звена, то значение U_{ref} указывает на уровень ограничения напряжения $u_1(t)$ по закону (1), но только в тот момент, когда функция $u_2(t)$ достигает значения U_{ref} , этот момент указан на рис. 6 точкой A . Время t_3 можно назвать временем запаздывания срабатывания ОПН, или временем действия остающегося напряжения за полпериода исследуемого сигнала.

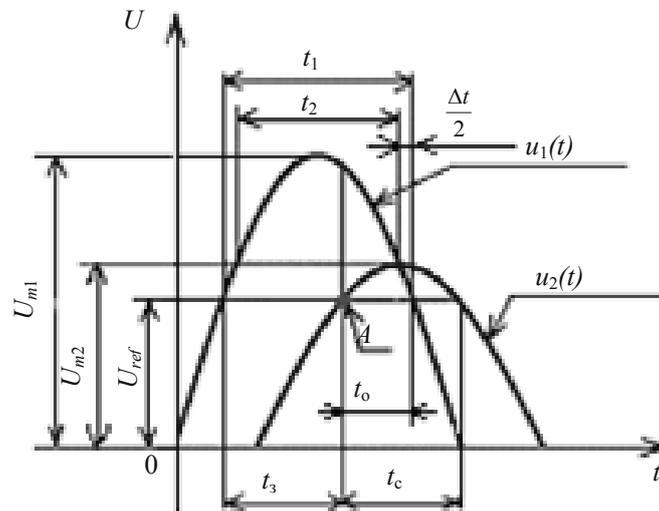


Рис. 6. Графики, поясняющие работу модели запаздывания срабатывания ограничителя перенапряжения нелинейного

Если амплитудно-частотная характеристика аperiodического звена определяется, как (4), то амплитудное значение U_{m2} функции $u_2(t)$ можно определить выражением (5):

$$U_{m2} = U_{m1} \cdot A(f), \quad (5)$$

где U_{m1} – амплитуда функции $u_1(t)$, В.

Из рис. 6 определяем t_3 :

$$t_3 = \frac{1}{2}(t_1 - t_c + t_2), \quad (6)$$

где t_1 – время действия напряжения, которое описывает функция $u_1(t)$, равная порогу срабатывания ОПН U_{ref} , с; Δt – разница времен t_1 и t_2 , с; t_c – время среза вспомогательной функции $u_2(t)$ при пороге срабатывания U_{ref} , с.

Время ограничения t_0 можно определить по выражению (7):

$$t_0 = \frac{1}{2}(t_c + \Delta t), \quad (7)$$

где t_0 – время ограничения ОПН (импульса), с.

Особенность функции $u_2(t)$ заключается в том, что ее амплитуда U_{m2} при любой частоте лежит на спаде функции $u_1(t)$.

Получено следующее выражение, устанавливающее зависимость t_3 от значений f , U_{ref} , U_{m1} , τ :

$$t_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left(\arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m1}}\right) - \arccos\left(\frac{U_{ref} \cdot \sqrt{1 + \tau^2 f^2}}{U_{m1}}\right) + \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 f^2}}\right) \right), \quad (8)$$

где f – частота исследуемого сигнала, Гц.

Для ОПН 0,4 получено значение постоянной времени для апериодического звена $\tau \approx 120$ мкс, при следующих условиях: $t_3 = 75$ мкс, $U_{ref} = 750$ В, $U_{m1} = 3$ кВ, $f = 3300$ Гц (рис. 4, 6).

При моделировании ОПН различных типов в частотном диапазоне 50–6000 Гц расчетные значения τ находились в диапазоне 120–160 мкс. На рис. 9 показаны расчетные осциллограммы тока и напряжения на ОПН 0,4 УХЛ при воздействии на него напряжением 3 кВ, частотой 3,3 кГц.

Тепловое действие тока. Тепловая модель ОПН

Исходя из поставленных опытов определения температуры поверхности рабочей части ОПН (варистора), были сняты осциллограммы температура – время, температура – сопротивление (рис. 7).

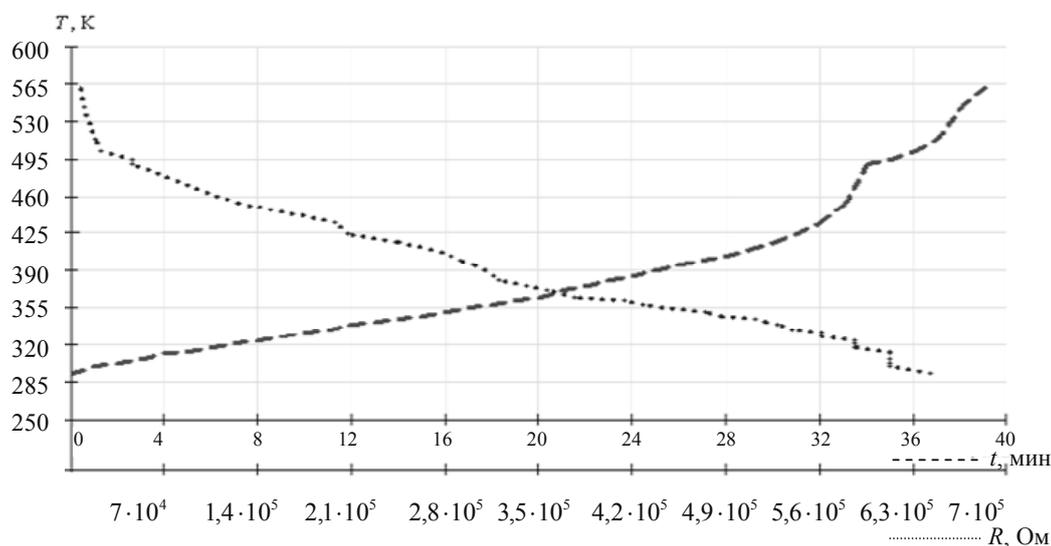


Рис. 7. Осциллограммы температурных зависимостей времени и сопротивления ограничителя перенапряжения нелинейного

Выбор ОПН производится по двум главным параметрам. Один из них – длительно-допустимое рабочее напряжение U_c , при котором ОПН будет работать надежно и устойчиво много лет. Другой – способность поглощения энергии тока разряда.

Поскольку ОПН не имеют искровых промежутков, блоки варисторов в них подвергаются постоянному воздействию напряжения сети. В нормальных эксплуатаци-

онных условиях на емкостной ток ОПН накладывается очень небольшая активная составляющая.

Эта активная составляющая, проходящая через ОПН, приводит к выделению энергии и незначительному повышению его температуры относительно температуры окружающего воздуха. Когда напряжение повышается, активная составляющая тока в резисторах и выделение энергии быстро растет. Однако благодаря своей массе ОПН не разрушается мгновенно, а только нагревается до определенной степени. Если величина и длительность перенапряжения ниже определенных величин, ОПН не будет поврежден. Допустимые величина и длительность воздействия перенапряжения промышленной частоты на ОПН до достижения термического разрушения приводятся в диаграммах с допустимыми временными перенапряжениями ОПН [4, с. 48], [5, с. 2].

Внутренние перенапряжения, наиболее опасные из которых возникают при отключении кабельных линий и конденсаторных батарей, однофазных дуговых замыканий на землю, сопровождающихся перемежающейся дугой. Энергия W (Дж), которую должен поглощать ОПН в этих случаях, определяется емкостью C_Φ кабеля (батареи конденсаторов) (мкФ), фазным напряжением сети $U_{\Phi m}$ (амплитуда) (кВ), номинальным напряжением ОПН U_H (кВ) и следующим выражением [4, с. 29]:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_\Phi \cdot \left[(3 \cdot U_{\Phi m})^2 - (\sqrt{2} \cdot U_H)^2 \right]. \quad (9)$$

Полученные значения сравнивают с табличными данными, если энергетическая стойкость ОПН недостаточна, выбирают ОПН с более высоким U_c . При дуговых и коммутационных перенапряжениях на ОПН воздействует напряжение высокой частоты, обуславливаемое параметрами схемы замещения сети. Частота свободных колебаний может быть равной 500–6000 Гц, значение которой зависит от параметров сети и причины внутреннего перенапряжения. Принимая во внимание запаздывание срабатывания ОПН, длительность и величину остающегося напряжения ОПН, можно качественно и количественно оценить энерговыделение при внутренних перенапряжениях. На рис. 8 представлены расчетные осциллограммы напряжения, тока и энерговыделения в ОПН 0,4 УХЛ при импульсе напряжения с частотой 3300 Гц, амплитудным значением 3 кВ.

Из осциллограмм видно, что при остающемся напряжении 2,480 кВ на участке $t_3 \approx 75$ мкс мгновенное значение напряжения превышает уровень ограничения U_{ref} , но тепловыделение на данном участке практически отсутствует.

Численными расчетами по методу конечных элементов было определено тепловое поле испытываемого ОПН (рис. 9) с исходными данными таблице [3].

Теплофизические характеристики материалов ограничителя перенапряжения нелинейного

Материал	Удельная теплоемкость [кДж/(кг · °С)]	Коэффициент теплопроводности [Вт/(м ² · °С)]	Плотность материала [г/см ³]
Фарфор	0,8	0,015	2,3
Стеклопластик	0,67	0,07	2,3
Оксид цинка (варисторы)	1,0475	3,99	5,7
Воздух	1,0056	0,00026	$1,225 \cdot 10^{-3}$

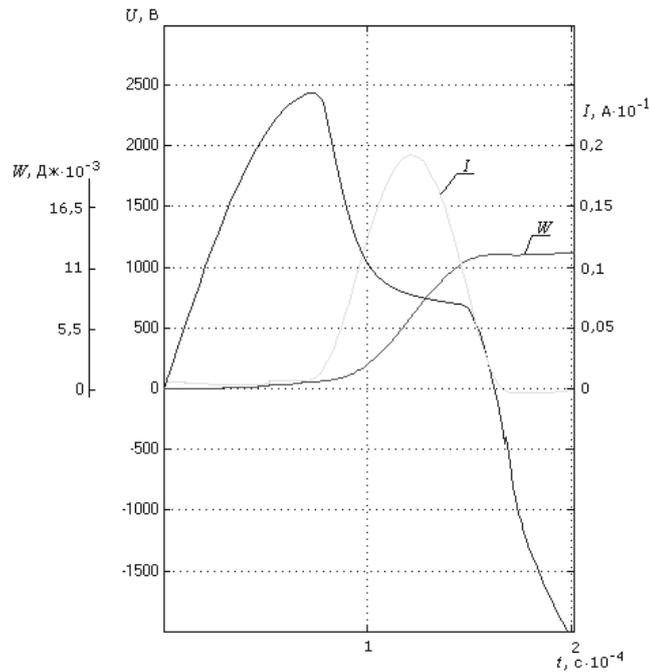


Рис. 8. Расчетные осциллограммы напряжения, тока и энерговыделения в ОПН 0,4 УХЛ при импульсе напряжения с частотой 3300 Гц, амплитудным значением 3 кВ

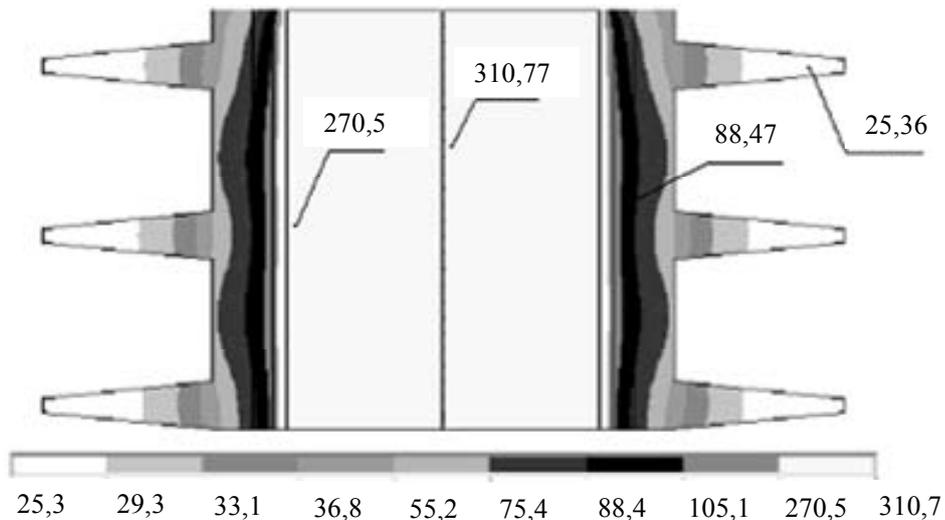


Рис. 9. Распределение температуры в ограничителе перенапряжений при температуре окружающей среды 25 °С

Температурное поле ОПН определяется численно путем решения дифференциального уравнения теплового баланса, устанавливающего связь между пространственным и временным изменениями температуры в изотропном теле, имеет вид [6, с. 94]:

$$C(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad}(T(x, y, t))) + P(x, y, t, T), \quad (10)$$

где $C(T)$ – удельная теплоемкость; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность материала; $P(x, y, t, T)$ – удельное тепловыделение в материале с учетом теплоотдачи в окружающее пространство.

Уравнение теплопроводности (10) приводится к виду (11):

$$C(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \lambda(T) \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial x} \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial y} \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} + P(x, y, t, T). \quad (11)$$

При решении (11) считаются известными начальные значения температур для всех областей и краевые условия на границе раздела ОПН и окружающего пространства.

По результатам вычислений можно заключить, что в колонке ОПН температурная нагрузка на варисторы распределена достаточно равномерно (рис. 8). Это объясняется тем, что избыточное локальное тепло вследствие высокой теплопроводности варисторной керамики эффективно распределяется по колонке варисторов. Равномерное распределение температуры в пределах колонки варисторов является благоприятным фактором и позволяет при математическом описании блока 3 (рис. 2) принять, что расчетная температура колонки варистора для всех точек является одинаковой. Поэтому при разработке динамической модели ОПН для получения быстродействующего алгоритма, тепловые процессы в варисторе рассчитываются без учета неравномерного распределения тепла в варисторной керамике.

Для построения тепловой математической модели ОПН необходимы справочные данные изменения удельного сопротивления и теплоемкости оксида цинка ZnO [3].

Текущее значение температуры ОПН и рассеиваемое количество теплоты в окружающую среду можно получить, решая систему уравнений (12):

$$\begin{cases} dQ_{ras} = F \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot dt \\ P \cdot dt - dQ_{ras} = m \cdot dT \cdot c(T), \end{cases} \quad (12)$$

где F – площадь рассеяния; α – коэффициент теплопередачи; T – текущее значение температуры ОПН; Q_{ras} – рассеиваемое количество теплоты в окружающую среду; T_0 – температура окружающей среды; $\Delta T = T - T_0$, $c(T)$ – зависимость удельной теплоемкости от температуры (рис. 9, а).

Изменение удельной проводимости ОПН в динамической модели осуществляется корректировкой статической ВАХ (13) на коэффициент, равный изменению удельного сопротивления от температуры $\frac{\rho_0}{\rho(T)}$, соответствующий текущей температуре ОПН (блок 3, рис. 2):

$$u(i, T) = \begin{cases} k_1 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_1} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } 0 \leq |i| < i_{c1}, \\ k_2 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_2} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c1} \leq |i| < i_{c2}, \\ k_3 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_3} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c2} \leq |i| < i_{c3}, \\ i \cdot R(T), & \text{если } T \geq 1000, \end{cases} \quad (13)$$

где $k_1, k_2, k_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, – коэффициенты, зависящие от типа варистора, определяются экспериментально; $\frac{\rho_0}{\rho(T)}$ – коэффициент, равный изменению удельного сопротивления от температуры; i и u – мгновенные значения тока и напряжения; U_{ref} – пороговое значение напряжения; I_{ref} – величина тока устройства при значении напряжения, равном пороговому; T – температура ОПН; i_{c1}, i_{c2}, i_{c3} – пределы значения токов для определения нелинейных участков значения функции $u(i, T)$, R – сопротивление ОПН после разрушения ≈ 10 МОм.

Физическое разрушение

Блок 4 (БР) (рис. 2). Предельная температура, при которой происходит разрушение ОПН, принята равной 1000 К. При достижении критической температуры, как правило, происходит взрыв, сопротивление в месте установки ОПН в этом случае принимается равным 10 МОм.

Выводы

Исследование переходных процессов при моделировании перенапряжений в распределительных сетях с использованием статической модели ОПН недостаточно достоверны. Расчет таких моделей показывает пониженный уровень ограничения перенапряжений по сравнению с натуральным экспериментом.

Опыты показали, что ОПН обладают инерционностью, т. е. постоянная времени перехода в состояние высокой проводимости для исследуемых варисторов составила ≈ 120 – 160 мкс. Этот факт объясняет причину высокого остающегося напряжения ОПН при ограничении внутренних перенапряжений в сети 6–10 кВ.

Разработана динамическая модель ОПН, учитывающая инерционность его перехода в проводящее состояние, а также температурные изменения физических параметров варисторов (рис. 2). Инерционность перехода варистора в проводящее состояние моделируется аperiодическим звеном (2). Вольтамперная характеристика варистора и температурные изменения параметров описываются выражениями (12), (13). Применение динамической модели ОПН позволяет повысить достоверность исследований внутренних перенапряжений в распределительных сетях и оптимизировать места установки, типы и параметры средств ограничения перенапряжений.

Литература

1. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6–35 кВ. – Москва : РАО «ЕЭС России», 2000.
2. Бохан, А. Н. Применение ОПН для защиты от внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок // Энергетика. – 2005. – № 5. – С. 39–46.
3. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – Москва : Наука, 1977.
4. Перенапряжения в электрических сетях. Проблемы и опыт эксплуатации. Рекомендации по выбору и применению нелинейных ограничителей перенапряжения. – Таврида Электрик, 2000. – 61 с.
5. Catalogue Zinc oxide surge arrester. ABB Switchgear / Publ. SESWG/A 2240E, № 2, Edition 1, 1991. – 17 p.

-
6. Математические модели электромагнитных и тепловых процессов в многослойных проводящих структурах как основа конструирования высоконадежных контактных узлов / А. Н. Герасимович [и др.] // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования: материалы междунар. науч.-техн. конф., 5–9 апреля 2004 г. – Минск: Изд-во ПЭИПК; Санкт-Петербург, 2004. – Вып. 3. – 380 с.

Получено 12.05.2006 г.