

УДК 621.316.1.015.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ****В. В. КРОТЕНОК, А. Н. БОХАН, В. В. СТАНИШЕВСКИЙ***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

В электрических сетях всех напряжений неизбежным является возникновение перенапряжений, возникающих в результате коммутаций сети, а также при однофазных замыканиях. Возникающие под действием этих факторов перенапряжения воздействуют на изоляцию электрооборудования, поэтому для защиты изоляции применяются технические мероприятия по принудительному ограничению перенапряжений до приемлемого для изоляции уровня. Эффективным средством ограничения возникающих перенапряжений является нелинейный ограничитель напряжения (ОПН). Ограничители представляют собой разрядники без искровых промежутков, в которых активная часть состоит из металлооксидных, нелинейных резисторов, изготавливаемых из окиси цинка (ZnO) с малыми добавками окислов других металлов [1], [2]. Эффект нелинейной проводимости проявляется на границах зерен ZnO [3]. Рабочие резисторы ОПН постоянно подключены к сети. Способность ОПН ограничивать перенапряжения характеризуется остающимся напряжением на ОПН при стандартном коммутационном (30/60 мкс) и грозовом (8/20, 4/10 мкс) импульсах перенапряжений. Значения остающегося напряжения на ОПН зависят не только от величины разрядного тока, но и от инерционности процессов перестройки структуры варистора при переходе от состояния низкой к состоянию высокой проводимости, конечной скоростью перемещения носителей заряда.

Статическая вольтамперная характеристика ОПН приведена на рис.1, где $U_{ост}$ – остающееся напряжение; U_{ref} – пороговое значение напряжения срабатывания ОПН; I_{ref} – ток ОПН при приложенном напряжении U_{ref} . Важно при математическом моделировании отразить нелинейность сопротивления ОПН и величину оставшегося напряжения, зависящую от скорости нарастания фронта импульса тока. На основе изложенных выше физических процессов работа ОПН моделируется аппроксимирующей зависимостью (1):

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

где i и u – мгновенные значения тока, А, и напряжения, В; U_{ref} – пороговое значение напряжения срабатывания ОПН, В; I_{ref} – величина тока устройства при значении напряжения, равном пороговому, А; α , k – показатель степени и коэффициент, определяющие нелинейность вольтамперной характеристики варистора ($\alpha = 0,1–0,5$ [6, с. 25]), о. е.

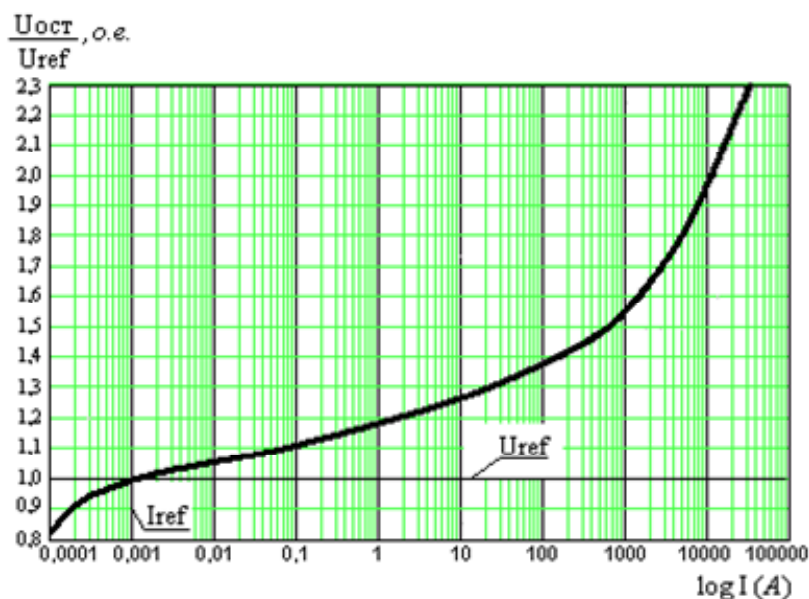


Рис. 1. Вольтамперная характеристика ОПН

В распределительных сетях среднего напряжения с незаземленной нейтралью при моделировании ОПН статической характеристикой расчетные данные существенно отличаются от результатов экспериментальных исследований. При этом уровни перенапряжений по модели оказываются ниже, чем уровни перенапряжений, полученные при эксперименте [4], [5], [6, с. 72], [7], [12]. Из-за этого могут возникать неправильные решения при выборе и эксплуатации ОПН. В связи с этим возникает необходимость разработки модели ОПН, которая как можно точнее описывала бы физические процессы, происходящие в ОПН при переходе в проводящее состояние.

На экспериментальной установке [15] проведены испытания варисторов 0,4; 6 и 10 кВ на частотах 50 Гц, а также 2,4 и 3,8 кГц. Отношение напряжения ограничения при токе 1 мА (50 Гц) к амплитуде номинального напряжения в исследуемых образцах находилось в пределах $K_3 \approx (1,20-1,32)$. Защитное действие ОПН при коммутационном импульсе оценивается отношением остающегося напряжения при коммутационном импульсе $U_{ост}$ к номинальному действующему напряжению ОПН $U_{н.опн}$. В исследованных образцах варисторов указанное соотношение составило 1,7–1,9.

В разрабатываемой модели ОПН должны учитываться не только статическая характеристика (см. рис. 1), но и его динамические свойства. Для определения динамических характеристик был поставлен ряд опытов над ОПН разного класса.

Исследования динамических характеристик ОПН показали, что в модель ОПН необходимо ввести ряд дополнений:

- 1) инерционность работы (замедленная реакция ОПН на перенапряжение);
- 2) тепловое действие тока;
- 3) физическое разрушение.

Структурная схема имитационной модели ОПН представлена на рис. 2.

Блок 1 – аperiodическое звено (АЗ) — реализует инерционность работы. Блок 2 – аппроксимация статической ВАХ ОПН (АВАХ) – определяет ток ОПН по закону, описанному (1). Блок 3 – блок определения температуры ОПН (БОТ) – определяет и по обратной связи корректирует изменение ВАХ ОПН с учетом расчетных температур, определяющих изменение удельной проводимости варистора.

Блок 4 – блок разрушения (БР) – моделирует разрушение ОПН по критерию превышения температуры T . Блок 5 – блок управления сопротивлением резисто-

ра (БУСНР) – изменяет сопротивление резистора посредством управляющего сигнала тока. Блок ИП является источником напряжения $U_{вх}$ заданной частоты и амплитуды со своим внутренним сопротивлением.

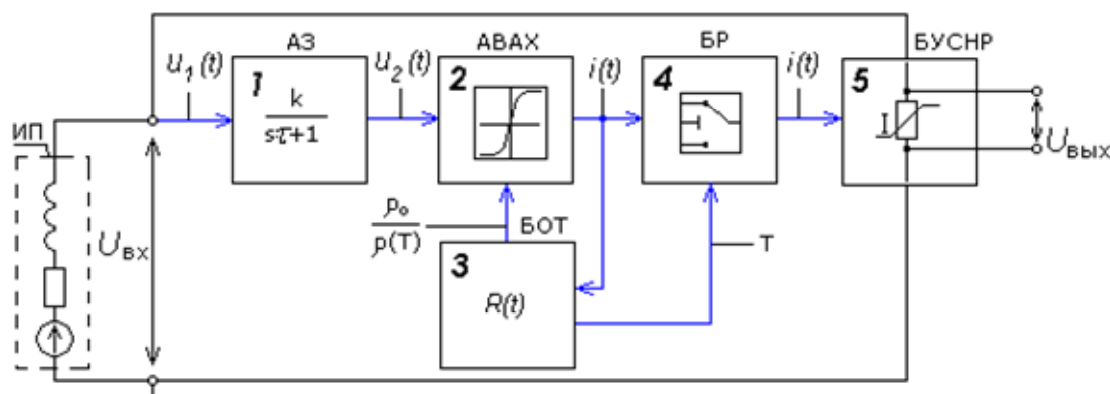


Рис. 2. Структурная схема модели ОПН

Инерционность работы ОПН

На основе экспериментальных данных по исследованию ОПН-КР/TEL 10/12 УХЛ1 и ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 определялись динамические параметры модели ОПН. Инерционные свойства ОПН моделировались (см. рис. 2) аперийодическим звеном первого порядка (блок 1 АЗ на рис. 2).

Для определения постоянной времени аперийодического звена первого порядка, моделирующего инерционность работы ОПН, были выполнены экспериментальные исследования ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при воздействии на него напряжением 3 кВ с частотой сигнала 3,3 кГц. На рис. 3 приведена фотография осциллограммы напряжения на ОПН. Из осциллограммы полупериода напряжения на ОПН-0,4/0,45 УХЛ2 видно, что время задержки включения ОПН в проводящее состояние равно t_3 (рис. 3).

Моделировать замедленную реакцию ОПН на перенапряжение целесообразно аперийодическим звеном [1], [9] первого порядка (блок 1 АЗ на рис. 2).

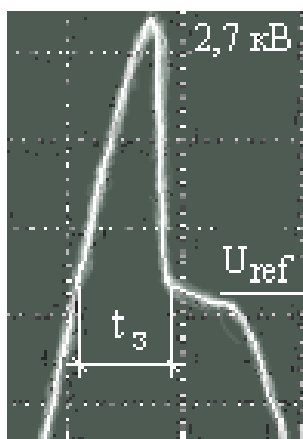


Рис. 3. Фотография осциллограммы напряжения на ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, амплитуда сигнала 2,7 кВ, $U_{ref} = 760$ В, частота – 3,3 кГц

Передаточная функция звена определяется по выражению (2) [8]:

$$W(p) = \frac{K}{\tau p + 1}, \quad (2)$$

где $W(p)$ – передаточная функция апериодического звена; p – комплексная переменная, $p = \alpha + j\omega$, где $\alpha = \text{const}$, ω – угловая частота; τ – постоянная времени, мкс; K – коэффициент пропорциональности между входной и выходной величинами (коэффициент усиления равен 1), о. е.

Для построения амплитудно-фазочастотной характеристики звена воспользуемся выражением для его комплексной передаточной функции вида

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

где ω – угловая частота сигнала, с^{-1} .

Исходя из этого амплитудно-частотная характеристика звена определяется

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

Постоянную времени τ можно определить исходя из экспериментальных данных. Зная время задержки t_3 , можно определить τ . При воздействии на апериодическое звено гармоническим сигналом $u_1(t)$ на выходе получим $u_2(t)$ (рис. 4). Если предположить, что $u_1(t)$ – это функция, описывающая перенапряжение, $u_2(t)$ – функция управления срабатывания, полученного после прохождения апериодического звена, то значение U_{ref} указывает на уровень ограничения напряжения $u_1(t)$ по закону (2), но только в тот момент, когда функция $u_2(t)$ достигает значения U_{ref} , этот момент соответствует на рис. 4 точке A . Время t_3 можно назвать временем замедленной реакции ОПН на перенапряжение.

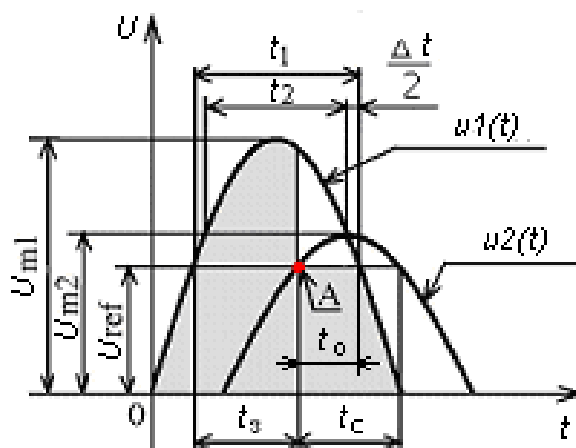


Рис. 4. Графики, поясняющие принцип работы апериодического звена первого порядка, входящего в модель ОПН

Если амплитудно-частотная характеристика апериодического звена определяется по формуле (4), то амплитудное значение U_{m2} функции $u_2(t)$ можно рассчитать следующим образом:

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

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

Из рис. 4 определяем t_3 по формуле

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

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

Время ограничения t_0 можно определить по выражению

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

где t_0 – время ограничения напряжения ОПН (импульса), с; Δt – разница времен t_1 и t_2 , с.

Особенность функции $u_2(t)$ заключается в том, что ее амплитуда U_{m2} при любой частоте лежит на спаде функции $u_1(t)$, что доказывает выражение (5). Время действия напряжения, которое описывает функция $u_1(t)$, можно определить [8]:

$$t_1 = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m1}}\right). \quad (8)$$

Принимая во внимание, что коэффициент пропорциональности между входной и выходной величинами $K = 1$, то время среза вспомогательной функции $u_2(t)$ при пороге срабатывания U_{ref} , используя формулы (3)–(5), можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m2}}\right) = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m1} \cdot A(\omega)}\right) = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m1} \frac{1}{\sqrt{1+\tau^2 \cdot \omega^2}}}\right) = \\ &= \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{ref} \sqrt{1+\tau^2 \cdot \omega^2}}{U_{m1}}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Значение времени t_2 определяется выражением

$$t_2 = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{U_{m2}}{U_{m1}}\right) = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1+\tau^2 \cdot \omega^2}}\right). \quad (10)$$

Получим выражение, устанавливающее зависимость t_3 от значений $\omega = 2\pi f$, U_{ref} , U_{m1} , τ :

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \left(\arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_{m1}}\right) - \arccos\left(\frac{U_{ref} \cdot \sqrt{1+\tau^2 \omega^2}}{U_{m1}}\right) + \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1+\tau^2 \omega^2}}\right) \right), \quad (11)$$

где ω – угловая частота исследуемого сигнала, с^{-1} .

Решая уравнение (11) относительно τ , получаем постоянную времени задержки срабатывания ОПН.

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; $U_{m1} = 2,7$ кВ; $f = 3300$ Гц (см. рис. 3).

При моделировании ОПН различных типов в частотном диапазоне 50–6000 Гц расчетные значения τ находились в диапазоне 120–160.

Тепловое действие тока. Тепловая модель ОПН

Выполнены экспериментальные исследования процесса нагрева варистора ОПН диаметром 40 мм при воздействии тока с амплитудой 15 мА ($f = 50$ Гц). Из поставленных опытов определены для варистора зависимости температуры от времени ($T = f(t)$) и сопротивления от температуры ($R = f(T)$) (рис. 5).

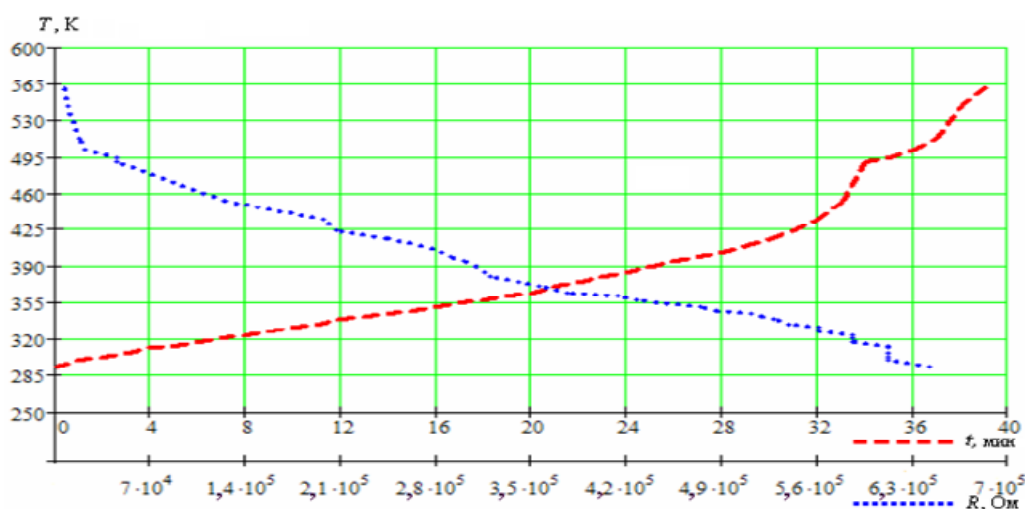


Рис. 5. Экспериментальные характеристики температуры $T = f(t)$ и сопротивления $R = f(T)$ варистора при воздействии разрядного тока амплитудой 15 мА и частотой 50 Гц

Выбор ОПН производится по двум главным параметрам. Один из них — длительнодопустимое рабочее напряжение $U_{н.д.}$, 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 эксплуатационных условиях на емкостный ток ОПН накладывается очень небольшая активная составляющая.

Активная составляющая тока, проходящая через ОПН, приводит к выделению энергии и повышению его температуры относительно температуры окружающего воздуха. Когда напряжение повышается, активная составляющая тока в резисторах и выделение энергии быстро растут. Скорость нагрева варистора зависит от его теплоемкости и теплоотдачи в окружающую среду, а также от разрядного тока. Характеристики «напряжение–время» ОПН позволяют определить допустимую длительность воздействия напряжения промышленной частоты, не вызывая повреждения или термической неустойчивости [2, с. 11], [12, с. 2].

Для обеспечения надежного и безопасного функционирования ограничителя перенапряжений его способность поглощать энергию в переходных режимах должна превышать ожидаемые воздействия в процессе эксплуатации. Энергия W , выраженная в Дж, которую должен поглощать ОПН в этих случаях, определяется емкостью

C_Φ кабеля (батареи конденсаторов), выраженной в мкФ, фазным напряжением сети $U_{\Phi.T}$ (амплитуда), выраженным в кВ, и номинальным напряжением ОПН U_n ($U_n \approx 1,25 U_{n.д}$), также выраженным в кВ [2, с. 29]. Энергию ОПН можно определить по следующему выражению:

$$W = \frac{1}{2} C_\Phi \left[(3 \cdot U_{\Phi.T})^2 - (\sqrt{2} \cdot U_n)^2 \right]. \quad (12)$$

Полученные значения сравнивают с табличными данными. Если энергетическая стойкость ОПН недостаточна, выбирают ОПН с более высоким длительно допустимым рабочим напряжением. При дуговых или коммутационных перенапряжениях на ОПН воздействует также высокочастотная свободная составляющая напряжения. Частота свободных колебаний определяется параметрами схемы замещения сети и обычно находится в диапазоне 1–16 кГц. На рисунке 6 представлены расчетные осциллограммы напряжения, тока и энерговыделения в ОПН-0,4/0,45 при воздействии на него напряжением амплитудой 3 кВ с частотой 3,3 кГц. Из осциллограмм видно, что ОПН вступил в проводящее состояние с запаздыванием на время $t_3 \approx 75$ мкс. На этом участке мгновенное значение напряжения превышает порог срабатывания ($U_{ref} = 0,76$ кВ) и достигает 2,48 кВ, а разрядный ток практически отсутствует. На участке, где ОПН вступил в ограничение, наблюдается рост активного тока до амплитуды 19 мА. Энерговыделение в ОПН происходит в соответствии с изменением разрядного тока.

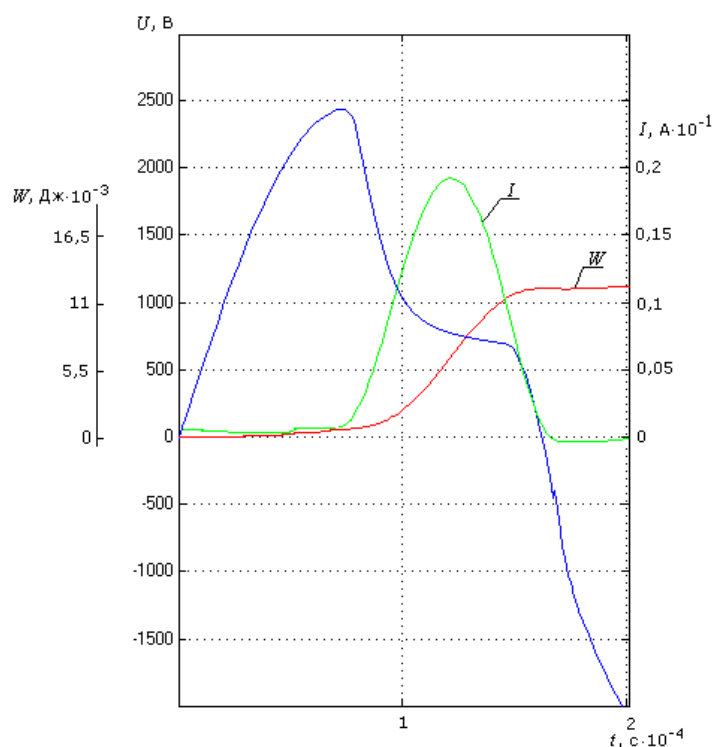


Рис. 6. Расчетные осциллограммы напряжения, тока и энерговыделения в ОПН-0,4УХЛ при импульсе напряжения с частотой 3300 Гц и амплитудой 3 кВ

Численными расчетами по методу конечных элементов было определено тепловое поле испытуемого ОПН (рис. 7) с исходными данными таблицы [7].

Теплофизические характеристики материалов ОПН

Материал	Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м² · °С)	Плотность материала, г/см³
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	$1,225 \cdot 10^{-3}$

Температурное поле ОПН определяется численно путем решения дифференциального уравнения теплового баланса, устанавливающего связь между пространственным и временным изменениями температуры в изотропном теле, имеет вид [14, с. 94]:

$$C(T) \cdot \rho \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad}(T(x, y, t))) + P(x, y, t, T), \quad (13)$$

где $C(T)$ – удельная теплоемкость, кДж/(кг · К); $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м² · К); ρ – плотность материала, г/см³; $P(x, y, t, T)$ – удельное тепловыделение в материале с учетом теплоотдачи в окружающее пространство, Дж.

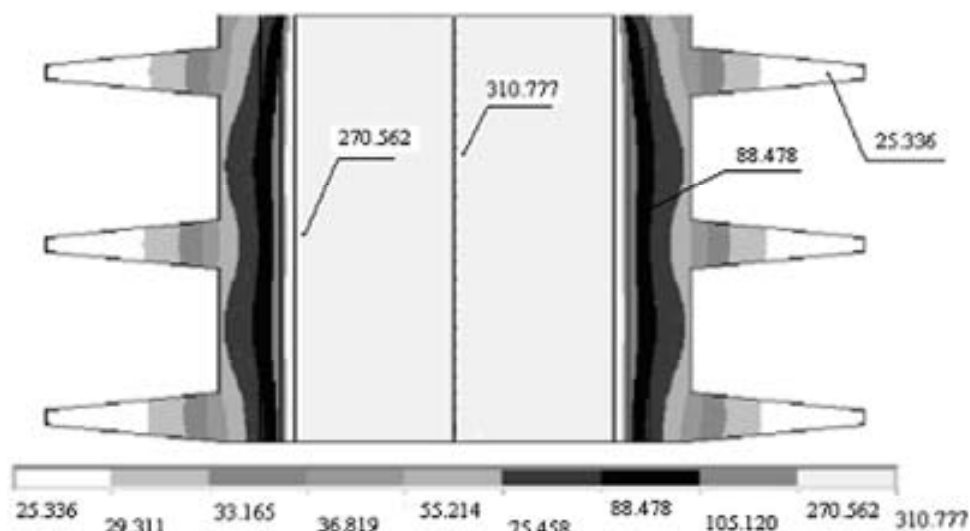


Рис. 7. Распределение температуры в ОПН 6/6,9 КС УХЛ1
(расчетная температура окружающей среды 25 °С, постоянный ток нагрева 0,1 А)

Уравнение теплопроводности (13) приводится к виду (14):

$$C(T) \rho \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \lambda(T) \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial x} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(T)}{\partial y} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} + P(x, y, t, T). \quad (14)$$

При решении (14) 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. 7). 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 БОТ (см. рис. 2) принять, что расчетная температура колонки варистора для всех точек одинакова. 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. На рис. 8 показан график изменения удельного сопротивления и удельной теплоемкости в зависимости от температуры оксида цинка ZnO [7].

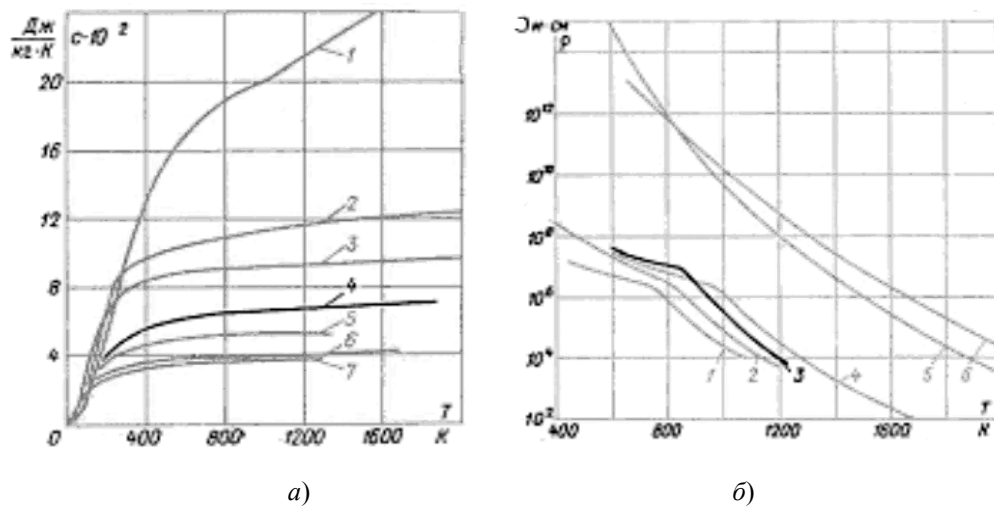


Рис. 8. Характеристики оксида цинка:

- a* — зависимость удельной теплоемкости от температуры (кривая 4);
б — зависимость удельного сопротивления от температуры (кривая 3)

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

$$\begin{cases} dW_{ras} = F \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot dt; \\ P \cdot dt - dW_{ras} = m \cdot c(T), \end{cases} \quad (15)$$

где F — площадь рассеяния, m^2 ; α — коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$; T — текущее значение температуры ОПН, $К$; W_{ras} — рассеиваемое количество теплоты в окружающую среду, $Дж$; T_o — температура окружающей среды, где $\Delta T = T - T_o$, $К$; $c(T)$ — зависимость удельной теплоемкости от температуры, $Дж/(кг \cdot К)$ (рис. 8, *a*); m — масса ОПН, $кг$; P — мощность, выделяемая в ОПН, $Вт$.

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

$$u(i, T) = \begin{cases} k_1 \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}} U_{ref} \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } 0 \leq |i| < i_{c1}; \\ k_2 \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha_2}} U_{ref} \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c1} \leq |i| < i_{c2}; \\ k_3 \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha_3}} U_{ref} \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c2} \leq |i| < i_{c3}; \\ i \cdot R(T), & \text{если } T \geq 1000, \end{cases} \quad (16)$$

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

Физическое разрушение

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. Физическое разрушение ОПН реализовано в структурной схеме модели в блоке 4 БР (см. рис. 2).

Результаты моделирования ОПН с учетом его динамических свойств сопоставимы с данными, полученными при испытаниях ОПН на экспериментальной установке. Так, на рис. 9, а представлены экспериментальные данные осциллограммы напряжения и тока ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при сложной форме подаваемого напряжения (высокочастотная составляющая 2,4 кГц наложена на напряжение промышленной частоты), уровень основной гармоники равный началу срабатывания ОПН – 0,95 кВ, уровень высокочастотной составляющей – 1,25 кВ. На рис. 9, б показаны расчетные осциллограммы напряжения и тока ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при тех же условиях подаваемого испытательного напряжения на ОПН.

Их анализ позволяет сделать вывод, что формы напряжения и тока ОПН при одних и тех же условиях подачи испытательного напряжения практически совпадают. Напряжение и ток ОПН, которые получены расчетным путем, повторяют динамику, характер поведения кривых тока и напряжения экспериментальных данных. Применение в модели ОПН апериодического звена первого порядка позволяет учитывать замедленную реакцию ОПН на перенапряжения. Для исследуемых варисторов ОПН-10,6 и ОПН-0,4 определена постоянная времени апериодического звена первого порядка, входящего в состав модели, которая составила ≈ 20 –160 мкс. Изменение удельной проводимости варистора в модели ОПН осуществляется корректировкой статической ВАХ.

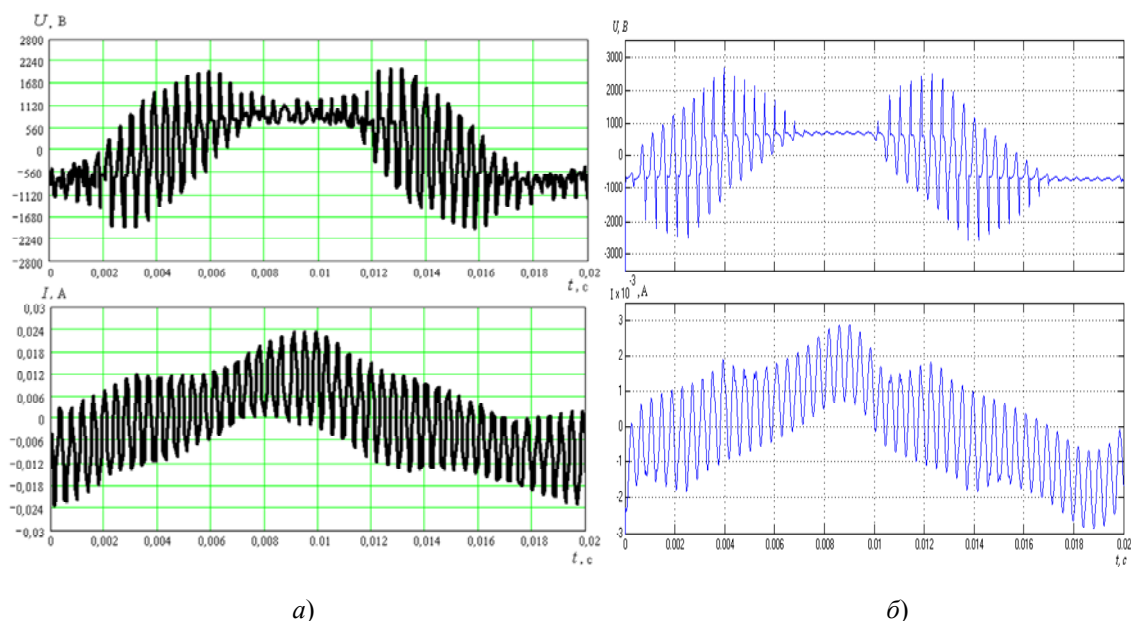


Рис. 9. Осциллограммы напряжения и тока ОПН-Н/ТЕЛ 0,4/0,45 УХЛ2:

а — экспериментальные данные; б — расчетные данные; высокочастотная составляющая напряжения 2,4 кГц наложена на напряжение промышленной частоты), амплитуда основной гармоники равна началу срабатывания ограничителя — 0,95 кВ, амплитуда высокочастотной составляющей 1,25 кВ

Литература

1. Кадомская, К. П. Нелинейные ограничители перенапряжений. Критерии выбора для разных условий эксплуатации / К. П. Кадомская // Новости электротехники [Электронный ресурс]. — 2001. — Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2004/25/07.php>. — Дата доступа: 10.04.2012.
2. Перенапряжения в электрических сетях. Проблемы и опыт эксплуатации. Рекомендации по выбору и применению нелинейных ограничителей перенапряжения // Таврида Электрик. — 2000. — С. 61.
3. IEC 60099-4 Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c.systems.
4. Беляков, Н. Н. Ограничение перенапряжений на землю в сети 6 кВ собственных нужд с помощью ОПН / Н. Н. Беляков, К. И. Кузьмичева // Электричество. — 1999. — № 5.
5. Дударев, Л. Е. Особенности дуговых замыканий фазы на землю в сетях с нейтралью, заземленной через резистор / Л. Е. Дударев, И. В. Волошек // Промышл. энергетика. — 1998. — № 6. — С. 23–29.
6. Евдокунин, Г. А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) / Г. А. Евдокунин, Г. Тилер. — СПб.: Изд-во Сизова М. П., 2000. — С. 114.
7. Иевлева, А. А. Математическое моделирование дуговых замыканий фазы на землю в электрических системах с изолированной нейтралью / А. А. Иевлева, В. Ф. Сивокобыленко // Электротехнические и электромеханические системы: тез. докл. для междунар. науч.-техн. студенч. конф., Севастополь. — 2004. — № 2. — С. 33–39.
8. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. — Минск: ДизайнПро, 2000. — С. 352.

9. Пошель, М. Моделирование сигналов и систем / М. Пошель. – М. : Наука. – 1981. – С. 250.
10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – С. 544.
11. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – С. 288.
12. Catalogue Zinc oxide surge arrester. ABB Switchgear / Publ. SESWG/A 2240E, № 2, Edition 1, 1991. – 17 p.
13. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – С. 633.
14. Герасимович, А. Н. 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 апр. 2004 г. – Вып. 3. – Минск : ПЭИПК, 2004. – С. 380.
15. Кротенок, В. В. Экспериментальное исследование динамических характеристик нелинейных ограничителей перенапряжений. / В. В. Кротенок, А. Н. Бохан // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 2. – С. 67–79.

Получено 20.12.2013 г.