

Кротенок В.В., к.т.н., доцент

Козлов А.В.

Учреждение образования Гомельский ГТУ

им. П.О. Сухого, Республика Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Введение. 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.

Постановка задачи. Важно при математическом моделировании отразить нелинейность сопротивления ОПН и ве-

личину оставшегося напряжения, зависящую от скорости нарастания фронта импульса тока. На основе изложенных выше физических процессов работа ОПН моделируется аппроксимирующей зависимостью (1)

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

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 ($\alpha = 0,1 \div 0,5$ [6, с. 25]), о. е.

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; 8]. 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 [10] 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 $K_3 \approx (1,20 \div 1,32)$. Защитное действие ОПН при коммутационном импульсе оценивается отношением остающегося напряжения при коммутации

онном импульсе $U_{ост}$ к номинальному действующему напряжению ОПН $U_{н.опн}$. В исследованных образцах варисторов указанное соотношение составило $1,7 \div 1,9$.

В разрабатываемой модели ОПН должны учитываться не только статическая характеристика (см. рисунок 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 рисунке 1.

Блок 1 — аperiодическое звено (АЗ) — реализует инерционность работы. Блок 2 — аппроксимация статической ВАХ ОПН (АВАХ) — определяет ток ОПН по закону, описанному (3.1). 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.

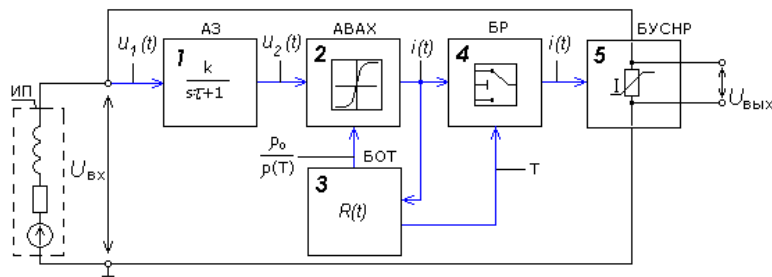


Рисунок 1. Структурная схема модели ОПН

Блок 4 – блок разрушения (БР) – моделирует разрушение ОПН по критерию превышения температуры T . Блок 5 – блок управления сопротивлением резистора (БУСНР) — изменяет сопротивление резистора, посредством управляющего сигнала тока. Блок ИП является источником напряжения U_{ex} заданной частоты и амплитуды со своим внутренним сопротивлением.

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 рисунке 2):

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

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.;

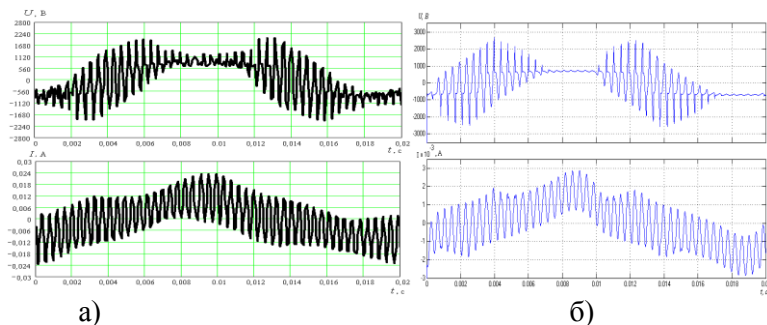
i, u – мгновенные значения тока, А, и напряжения, В;

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.

Результаты вычислительного эксперимента. Результаты моделирования ОПН с учетом его динамических свойств сопоставимы с данными, полученными при испытаниях ОПН на экспериментальной установке. Так, на рисунке 2а, 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 рисунке 2б показаны расчетные осциллограммы напряжения и тока ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при тех же условиях подаваемого испытательного напряжения на ОПН.



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

Рисунок 2. Осциллограммы напряжения и тока ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2

Выводы. Анализ результатов 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 $\approx 20 \div 160$ мкс. Изменение удельной проводимости варистора в модели ОПН осуществляется корректировкой статической ВАХ.

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., Кузьмичева, К.И. Ограничение перенапряжений на землю в сети 6 кВ собственных нужд с помощью ОПН / Н.Н. Беляков, К.И. Кузьмичёва // 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 // «Промышленная 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. Евдакунин, Г. Тилер. – СПб: Изд. 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 // Тезисы доклада для международной научно-технической студенческой конференции "Электротехнические и электромеханические системы", 2004г. г.Севастополь, 2004. – № 2. – С. 33 – 39.

8. Catalogue Zinc oxide surge arrester. ABB Switchgear / Publ. SESWG/A 2240E, № 2, Edition 1, 1991. –17 p.

9. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. М., Наука, 1977. – С. 633.

10. Кротенок, В.В. Экспериментальное исследование динамических характеристик нелинейных ограничителей перенапряжений. / В.В. Кротенок, А.Н. Бохан // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2013 г. №2, стр. 67-79.

11. Безик В.А., Маркарянц Л.М., Алексанян И.Э. Экспериментальные исследования комбинированного устройства защиты. В сборнике: проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК. Международная научно-техническая конференция. Под общей редакцией Маркарянц Л.М.. Брянск, 2013. С. 3-8.

УДК 519.87

*Комогорцев В.Ф., к.ф-м.н., доцент
Бардадын Н.Н., старший преподаватель
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ*

О ПАДАЮЩЕЙ ДОЖДЕВОЙ КАПЛЕ ИЛИ ГОРЯЩЕЙ ЧАСТИЦЕ ФЕЙЕРВЕРКА

Пусть, с некоторой высоты h , падает дождевая капля. Полагаем, что в процессе своего падения капля испаряется, то есть её размеры и масса уменьшаются с течением времени.