

О.С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ; А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук; НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТ - АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТОРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Досліджено динамічні ВАХ нелінійних резисторів обмежувачів перенапруги при дії на них імпульсів струму в мікросекундній області. Установлені вид і параметри апроксимуючих функцій, визначені числові значення критеріїв точності апроксимації.

Dynamic volt-ampere characteristics of nonlinear resistors of supervoltage limitators in case of apply by current in microsecond area are investigated. The forms and parameters, the quantity of accuracy of approximation are determined.

Постановка проблемы. При эксплуатации электроустановок их изоляция подвергается воздействию перенапряжений, связанных с коммутацией электрических цепей, грозовой деятельностью, а также технологической деятельностью человека. Защита изоляции электроустановок в настоящее время чаще всего осуществляется с помощью ограничителей перенапряжений (ОПН), основным элементом которых являются нелинейные резисторы (НР). Повышение уровня напряжений, используемых для передачи электроэнергии, увеличение протяженности линий электропередачи и их мощности объективно требует разработки новых, более эффективных НР и увеличения количества устанавливаемых ОПН. Это, в свою очередь, ставит вопрос о проведении исследовательских испытаний разрабатываемых НР и увеличения объема приемочных испытаний выпускаемых НР, что вызывает необходимость модернизации действующей и разработки новой испытательной базы.

Анализ публикаций. В соответствии с нормативными документами [1, 2] НР (варисторы) подвергаются широкому спектру испытаний, требующих разработки и создания соответствующих испытательных установок и стендов. Испытания варисторов, которыми комплектуются ограничители перенапряжений, применяемые в энергосистемах, требуют создания, в частности, генераторов импульсов тока и напряжения с амплитудой формируемых импульсов тока до сотен килоампер и импульсов напряжения до единиц мегавольт. Нормативные документы ставят жесткие требования к амплитудно-временным параметрам воздействующих импульсов, что предопределяет необходимость решения актуальной задачи – разработки новых схемных решений испытательных установок и их оптимизации с учетом нелинейного характера нагрузки (испытываемых варисторов и ОПН в целом).

Основной характеристикой варистора, позволяющей учесть его нелинейный характер как резистивного элемента в схеме испытательного импульсного генератора, является вольт - амперная характеристика (ВАХ). Обычно производители в качестве технической характеристики варистора приводят

статическую ВАХ в виде степенной зависимости и ряд других характеристик, достаточных для выбора НР по условиям эксплуатации. Однако, результаты исследования, представленные в [3] показывают, что в области воздействия коротких импульсов тока и напряжения (микросекундный диапазон) ВАХ варисторов носит динамический петлеобразный характер, определяемый не только величиной тока, но и скоростью его изменения и для описания динамических ВАХ предлагается зависимость вида:

$$U = A \cdot I^\alpha + B \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^\beta, \quad (1)$$

где I , dI/dt – соответственно, значение тока, протекающего через НР, и его производной в расчетный момент;

A , α , B , β – числовые коэффициенты.

Очевидно, что в условиях, когда при испытаниях НР требуется формировать нормативный импульс тока с жесткими допусками на его параметры [1, 2], для рационального проектирования испытательных установок необходим учет петлеобразного характера ВАХ НР. Это вызывает необходимость дополнительных исследований по определению размеров и вида петли и ее математическому описанию.

Целью настоящей работы является формирование банка данных динамических ВАХ нелинейных резисторов, используемых для ограничения перенапряжений.

Материалы и результаты исследования. Для определения динамических ВАХ были проведены испытания ряда образцов НР.

Контрольная партия из 10 варисторов типа FNR была подвергнута воздействию импульсов напряжения 1,2/50 мкс. Импульс тока, протекавший через варисторы, имел следующие характеристики: длительность фронта импульса 3,5 ... 7,4 мкс, отношение длительности импульса к длительности фронта импульса 2,77 ... 2,84 и амплитуда импульса тока $17 \text{ A} \pm 1\%$.

Обобщенная динамическая ВАХ партии НР показана на рис. 1 (кривая 1). Кривая 2 рис. 1 представляет собой аппроксимацию ВАХ зависимостью вида:

$$U = A \cdot I^\alpha, \quad (2)$$

полученную при условии минимизации модуля максимального абсолютного отклонения ее значений от экспериментальных данных. Она отражает среднее значение петлеобразной ВАХ для каждого значения тока. Как видно из табл. 1 максимальное относительное отклонение экспериментальных данных от значений аппроксимирующей кривой вида (2) достигает 14% (см. столбец "Относительное отклонение" "Макс."), что характеризует ширину петли и подтверждает необходимость учета петлеобразного вида ВАХ при проектировании испытательных установок.

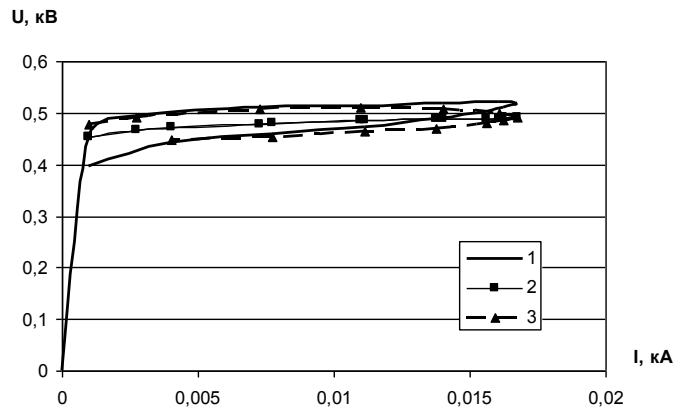


Рис. 1 ВАХ варистора FNR.

1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимирующая зависимость вида (2);
3 – аппроксимирующая зависимость вида (3).

Таблица 1

Аппроксимация ВАХ варисторов типа FNR

Параметры аппроксимирующей функции				Абсолютное отклонение		Относительное отклонение	
A	α	B	β	Макс.*	D	Макс.	D
tф(0,9; 0,1) = 4,7 мкс; ти(0,5) = 13 мкс							
0,55	0,028	-	-	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
0,55	0,028	5	0,86	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$
tф(0,9; 0,1) = 5,7 мкс; ти(0,5) = 16 мкс							
0,59	0,041	-	-	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
0,59	0,041	5	0,94	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
tф(0,9; 0,1) = 6,85 мкс; ти(0,5) = 19 мкс							
0,68	0,062	-	-	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
0,68	0,062	4,5	1,05	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
tф(0,9; 0,1) = 7,4 мкс; ти(0,5) = 21 мкс							
0,72	0,07	-	-	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$
0,72	0,07	3,9	0,91	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Здесь и далее приняты следующие обозначения:

Макс., D – соответственно, максимальное значение и дисперсия отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей кривой;

tф(0,9; 0,1) – длительность фронта импульса тока, определяемая как разность времен достижения на фронте значений 0,9 и 0,1 от максимального значения тока;

ти(0,5) – длительность импульса, определяемая как время достижения на спаде значения 0,5 от максимального значения тока.

Вторым этапом исследования являлось построение зависимости, отражающей петлеобразный характер ВАХ. Предложенная в [3] зависимость (1) имеет ряд вычислительных сложностей, при произвольных значениях β и отрицательных значениях производных тока. Поэтому аппроксимация динамической ВАХ авторами данной работы проводилась с использованием зависимости вида:

$$U = A \cdot I^\alpha + B \cdot \text{sign}\left(\frac{dI}{dt}\right) \cdot \left|\frac{dI}{dt}\right|^\beta. \quad (3)$$

где $\text{sign}\left(\frac{dI}{dt}\right)$ – функция, возвращающая знак производной.

Коэффициенты аппроксимирующей функции для различных временных параметров импульса тока приведены в табл. 1, а обобщенный график для испытанной партии варисторов показан на рис. 1 (кривая 3). Как видно из табл. 1, учет петлеобразного характера ВАХ с помощью введения в (3) слагаемого, зависящего от производной тока, позволяет снизить в среднем в 2 раза погрешность определения значений ВАХ, что позволяет повысить точность расчетов при проектировании испытательных установок.

Аналогично были проведены исследования динамических ВАХ НР, которыми комплектуются высоковольтные ОПН, в частности, варисторы фирмы EPCOS и НР вентиляльных разрядников РВС-33 и РВС-110.

В табл. 2 представлены результаты обработки и аппроксимации ВАХ, на рис. 2 – типичная ВАХ металлооксидного варистора EPCOS и кривые аппроксимирующих зависимостей.

Таблица 2

Параметры аппроксимирующей функции				Абсолютное отклонение		Относительное отклонение	
A	α	B	β	Макс.	D	Макс.	D
Элемент вентиляльного разрядника РВС-110. Импульс напряжения 1/20 мкс.							
4,5	0,71	-	-	3,582	1,177	0,407	0,012
Элемент вентиляльного разрядника РВС-33. Импульс напряжения 30/60 мкс.							
14	0,3	-	-	1,793	0,187	0,343	0,004
Металлооксидный резистор EPCOS. Импульс напряжения 8/20 мкс.							
11	0,2	-	-	4,636	1,438	1,274	0,051
11	0,2	2	0,5	2,617	0,431	0,896	0,023

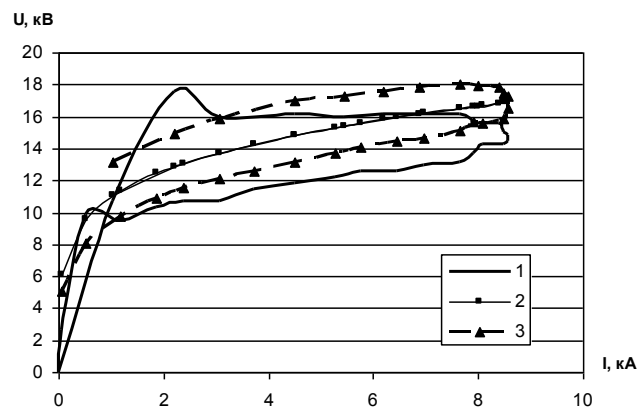


Рис. 2. ВАХ металлооксидного варистора EPCOS, при воздействии импульса напряжения 8/20 мкс.

1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимирующая зависимость вида (2);
3 – аппроксимирующая зависимость вида (3).

Результаты испытаний показали, что для элементов вентильных разрядников РВС-110 и РВС-33 при используемых импульсах напряжения влияние петлеобразного характера на точность описания по (2) и (3) незначительно. Для металлооксидных резисторов фирмы EPCOS учет петлеобразного характера позволяет снизить погрешность определения значений ВАХ в среднем в 2 раза.

Выводы.

1. Экспериментально получены динамические ВАХ металлооксидных варисторов серии FNR, HP фирмы EPCOS и HP, которыми комплектуются ОПН типа РВС-33 и РВС-110.

2. Установлено, что учет петлеобразного характера ВАХ при ее аппроксимации позволяет снизить погрешность вычисления ее значений в среднем в 2 раза.

3. Использование полученных результатов и дальнейшее расширение банка данных ВАХ HP позволит оптимизировать схемотехнические решения при создании испытательных импульсных генераторов напряжения и тока.

Список литературы: 1. ГОСТ 16357-83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1983. – 40 с. 2. Стандарт МЭК 60099-4. Металлооксидные ограничители перенапряжений без искровых промежутков для электрических сетей переменного тока. СЕИ / ИЕС / МЭК99-4. 1991. – 58 с. 3. Крыжановский В.В., Табарданова М.П. Исследование импульсных вольт - амперных характеристик ограничителей с оксидноцинковыми резисторами // Исследования и области применения ограничителей перенапряжений: Сб. научных трудов НИИПТ. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – С. 31 – 39.