

УДК 621.316.86:621.316.933

EDN: SFMPKX

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВАРИСТОРЫ ПРИ ПРОВЕРКЕ ИХ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Е.А. Гусаченко

ORCID: 0009-0005-0151-2969 e-mail: eagusachenko@vei.ru

Всероссийский электротехнический институт –
филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»
Москва, Россия

При проверке пропускной способности некоторых типов оксидно-цинковых варисторов и устройств защиты от перенапряжений (УЗИП) на их основе используются импульсы тока с заданными значениями амплитуды и длительности, получаемые при разряде заряженной конденсаторной батареи на варистор или УЗИП и последовательно включенный резистор. Ввиду отсутствия аналитических выражений для расчетов переходных процессов в цепях с нелинейными элементами, на основе метода последовательных интервалов для данного частного случая и при наличии динамической вольтамперной характеристики варистора разработан алгоритм численного расчета кривых изменения разрядного тока и поглощаемой варистором энергии. С его помощью, в отличие от известного способа расчета с использованием схемы замещения варистора резистором и источником ЭДС, выявлена существенная разница в абсолютной величине и интенсивности энергетического воздействия импульсов тока на варистор в зависимости от емкости конденсаторных батарей испытательных установок. С целью установления единообразия в условиях испытаний варисторов на пропускную способность предложено в качестве технических требований в технических условиях (ТУ) на варисторы и УЗИП указывать минимальные значения заряда и/или энергии, которые должен соответственно пропустить через себя или поглотить варистор за время, равное длительности импульса разрядного тока. Предлагаемая методика расчета может быть использована для предварительной оценки ожидаемых значений пропускаемого варистором заряда и/или поглощаемой им энергии при выборе параметров конденсаторной батареи и последовательно включенного резистора испытательной установки, необходимых для выполнения требований ТУ.

Ключевые слова: варистор, вольтамперная характеристика, метод последовательных интервалов, оксидно-цинковый варистор, импульс разрядного тока конденсатора, электрический заряд, энергетическое воздействие.

Для цитирования: Гусаченко Е.А. Расчет энергетических воздействий на варисторы при проверке их пропускной способности // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 2. С. 105-123. EDN: SFMPKX

CALCULATION OF ENERGY IMPACTS ON VARISTORS WHEN TESTING THEIR THROUGHPUT

E.A. Gusachenko

ORCID: 0009-0005-0151-2969 e-mail: eagusachenko@vei.ru

All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of RFNC – VNIITF
Moscow, Russia

Abstract. Current pulses with given amplitude and long-term values are used for checking the throughput of some types of oxide-zinc varistors and surge protection devices (SPD) based on them. These current pulses are obtained when the charged capacitor bank is discharged on the varistor or SPD and the series resistor. There are no analytical expressions for calculating transient processes in circuits with nonlinear elements, so an algorithm for numerically calculating discharge current curves and energy absorbed by the varistor has been developed based on the method of consecutive intervals for this particular case and in the presence of a varistor dynamic V/I characteristic. A significant difference in the absolute value and intensity of the energy effect of current pulses on the varistor depending on the capacitance of the capacitor bank of the test installations was revealed using proposed algorithm, in contrast to the known calculation method using the varistor equivalent circuit with a resistor and a source of electromotive power. In order to establish uniformity in the conditions of testing throughput of varistors, it is proposed to show the minimum values of charge and/or energy that the varistor should pass through or absorb in a time equal to the duration of the discharge current pulse as technical requirements in the technical specifications for varistors and SPD. The proposed calculation method can be used for preliminary estimation of expected values of charge and/or energy absorbed by varistor in selection parameters of capacitor bank and series connected resistor required for fulfillment of requirements of technical specifications.

Key words: capacitor discharge current pulse, electrical charge, energy impact, method of successive intervals, oxide-zinc varistor, varistor, V/I characteristic.

For citation: E.A. Gusachenko, “Calculation of energy impacts on varistors when testing their throughput”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 105-123, 2024, EDN: SFMPKX

I. Введение

При контрольных испытаниях на пропускную способность некоторых типов оксидно-цинковых варисторов и устройств защиты от перенапряжений (УЗИП) на их основе, согласно техническим условиям (ТУ), требуется, чтобы указанные изделия выдерживали без ухудшения своих характеристик несколько десятков импульсов тока экспоненциальной формы с заданными значениями амплитуды I_0 и длительности T_n . За длительность импульса принимают промежуток времени, в течение которого происходит снижение тока до $0,1 \cdot I_0$.

Под импульсами тока экспоненциальной формы, как правило, понимают импульсы, у которых почти вертикальный фронт (т.е. пренебрегают собственной индуктивностью испытательной схемы), а ток после практически моментального достижения своего максимального значения спадает по кривой, близкой к экспоненте (при этом никаких критериев для оценки этой близости не устанавливается).

Необходимые импульсы тока получают от батареи конденсаторов с той или иной емкостью C , заряжаемой до постоянного напряжения U_0 , значение которого зависит от требуемого значения I_0 и должно находиться в пределах допустимого рабочего напряжения конденсаторов. Батарею разряжают на испытуемое УЗИП (часто это залитый герметизирующим веществом варистор с электродами – выводами) или отдельный варистор, последовательно с которыми, как правило, включают еще и резистор с сопротивлением r для получения требуемого времени спада $t_c = T_n$ импульса разрядного тока.

Визуальный осмотр после демонтажа некоторых УЗИП, не выдержавших данное испытание, позволяет предположить, что их варисторы подвергались значительным энергетическим воздействиям.

Целью настоящей статьи является:

– разработка упрощенной методики расчета зависимостей от времени тока разряда конденсатора на варистор и последовательно с ним включенный резистор, а также поглощаемой варистором энергии;

– выявление влияния параметров элементов разрядной цепи на характер энергетического воздействия при испытаниях варисторов и УЗИП на пропускную способность;

– формулирование предложений по внесению изменений в ТУ на варисторы и УЗИП.

С методологической точки зрения целесообразно начать с разряда конденсатора на резистор с линейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), но, в отличие от [1], сначала получить аналитические выражения для тока разряда конденсатора, его заряда и энергии, выделившейся в резисторе, которые затем можно использовать при рассмотрении разряда конденсатора на варистор.

II. Разряд конденсатора на резистор

Поскольку ток в цепи определяется скоростью изменения (уменьшения) заряда $q(t)$ конденсатора и напряжения $u_C(t)$, равного напряжению $u_R(t) = R \cdot i(t)$ на резисторе с сопротивлением R , то выражение, связывающее значение тока с его производной, будет иметь следующий вид:

$$i(t) = -dq/dt = -C \cdot du_C/dt = -C \cdot du_R/dt = -R \cdot C \cdot di/dt \quad (1)$$

Преобразуя (1), получаем линейное дифференциальное уравнение первого порядка без правой части относительно тока в цепи, решение которого показывает, что ток $i(t)$ в цепи разряда снижается по экспоненциальному закону:

$$i(t) = I_0 \cdot \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где $I_0 = i(0)$ – ток в начальный момент времени (при $t=0$); $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени цепи разряда конденсатора с емкостью C на резистор с сопротивлением R .

Так как к моменту времени $t = t_c = T_n$ ток в разрядной цепи снизится до $i(t_c) = I_0 \cdot \exp(-T_n/\tau) = 0,1 \cdot I_0$, постоянная времени будет однозначно определяться длительностью импульса T_n :

$$\tau = \frac{T_n}{\ln 10} = \frac{T_n}{2,3}. \quad (3)$$

Аналитическое выражение для заряда $q(t)$, прошедшего через резистор за время от 0 до t , получается интегрированием (2):

$$Q_R(t) = \int_0^t i(t) dt = I_0 \cdot \int_0^t \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt = -\tau \cdot I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \Big|_0^t = Q_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right),$$

где $Q_0 = \tau \cdot I_0 = C \cdot (R \cdot I_0) = C \cdot U_0$ – начальное значение заряда конденсатора.

При полном разряде конденсатора ($t \rightarrow \infty$) через резистор, очевидно, пройдет заряд, равный начальному заряду конденсатора:

$$Q_R(\infty) = Q_0 = \tau \cdot I_0. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет определить постоянную времени цепи τ как промежуток времени, в течение которого произошел бы полный разряд конденсатора, если бы ток разряда не снижался, а оставался равным своему начальному значению.

Аналитическое выражение для энергии $w_R(t)$, выделившейся из конденсатора и рассеянной резистором за время разряда от 0 до t , может быть получено по закону Джоуля-Ленца:

$$w_R(t) = \int_0^t i^2 \cdot R dt = -\left(\frac{\tau}{2}\right) \cdot R \cdot I_0^2 \cdot \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right)\Bigg|_0^t = -\left(\frac{C \cdot U_0^2}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right)\Bigg|_0^t = \\ = W_C(0) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right)\right),$$

где $W_C(0) = C \cdot (U_0)^2 / 2 = Q_0 \cdot U_0 / 2$ – начальное значение энергии электрического поля конденсатора.

При полном разряде конденсатора ($t \rightarrow \infty$) рассеянная резистором энергия, очевидно, будет равна начальному значению энергии конденсатора и может быть выражена в следующем виде:

$$W_R(\infty) = W_C(0) = \frac{C \cdot (U_0)^2}{2} = \frac{C \cdot (R \cdot I_0)^2}{2} = \frac{\tau \cdot (U_0 \cdot I_0)}{2} = \tau \cdot S_R, \quad (5)$$

где $S_R = (U_0 \cdot I_0) / 2$ – площадь прямоугольного треугольника между вольтамперной характеристикой резистора, представленной прямой линией $u_R(t) = R \cdot i(t)$, и отрезком оси абсцисс от $i = 0$ до точки со значением $i = I_0$ на рис. 1 для частного случая резистора с сопротивлением $R = 1,09$ Ом.

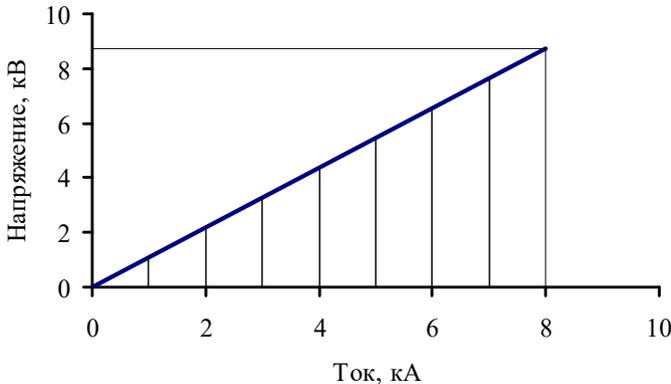


Рис. 1. Вольтамперная характеристика резистора $u_R(t) = R \cdot i(t)$ (сопротивление $R = 1,09$ Ом)

Fig. 1. The V/I characteristic of resistor $u_R(t) = R \cdot i(t)$ (resistance $R = 1.09$ Ohm)

На рис. 2 представлена кривая 1 изменения тока разряда конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ на резистор с сопротивлением R , которое позволяет получить заданную длительность импульса тока, например, $T_i = 250$ мкс.

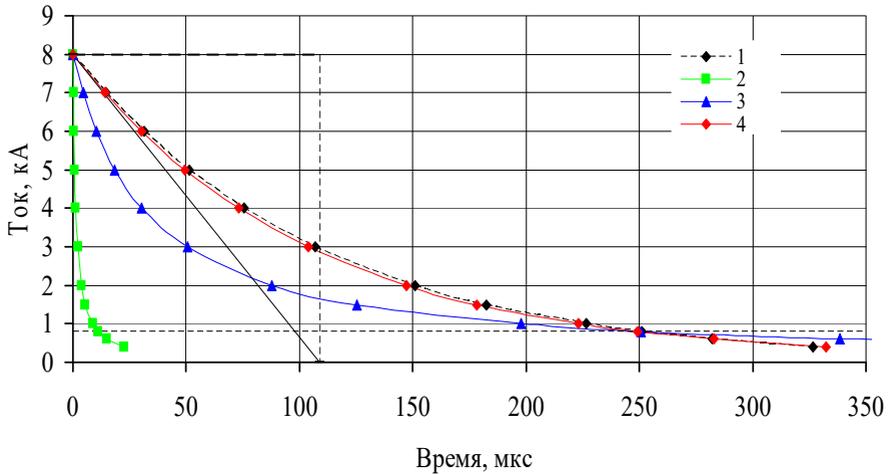


Рис. 2. Кривые тока $i(t)$ разряда конденсатора с емкостью:

- 1 – $C = 100$ мкФ на резистор с сопротивлением $R = 1,09$ Ом;
 2 – $C = 100$ мкФ на варистор; 3 – $C = 2270$ мкФ на варистор;
 4 – $C = 100$ мкФ на варистор и резистор с сопротивлением $R = 1,04$ Ом

Fig. 2. The discharging current curves $i(t)$ of a capacitor with the capacitance:

- 1 – $C = 100$ μ F on the resistor $R = 1.09$ Ohm;
 2 – $C = 100$ μ F on the varistor; 3 – $C = 2270$ μ F on the varistor;
 4 – $C = 100$ μ F on the varistor and the resistor $R = 1.04$ Ohm

Так как по (5) постоянная времени в такой цепи $\tau = 250 / 2,3 = 109$ мкс, то сопротивление резистора $R = 1,09$ Ом. Для получения максимального значения тока разряда $I_0 = 8$ кА конденсатор должен быть заряжен до напряжения $U_0 = 8 \cdot 1,09 = 8,72$ кВ.

При полном разряде конденсатора ($t \rightarrow \infty$) через резистор пройдет электрический заряд $Q_R = Q_0 = C \cdot U_0 = \tau \cdot I_0 \approx 0,87$ Кл. На рис. 2 заряд Q_R представлен площадью прямоугольника или равной ей удвоенной площадью прямоугольного треугольника, образованного катетами, равными τ и I_0 . Его гипотенуза будет касательной к кривой 1 при $t = 0$.

Учитывая необходимость симметрии в составе выражений $W_R(\infty)$ и $W_r(\infty)$ для энергии, рассеиваемых в резисторах с сопротивлениями R и r соответственно и в сумме равных начальной энергии $W_C(0)$ электрического поля конденсатора, для расчета энергии, выделившейся в резисторе с сопротивлением R , получаем выражение, аналогичное (5):

$$\begin{aligned}
 W_R(\infty) &= W_C(0) - W_r(\infty) = C \cdot \frac{((R+r) \cdot I_0)^2}{2} - W_r(\infty) = \\
 &= \frac{C \cdot R^2 \cdot I_0^2}{2} + C \cdot r \cdot R \cdot I_0^2 + \frac{C \cdot r^2 \cdot I_0^2}{2} - \frac{C \cdot r \cdot R \cdot I_0^2}{2} - \frac{C \cdot r^2 \cdot I_0^2}{2} = \\
 &= \frac{C \cdot R^2 \cdot I_0^2}{2} + \frac{C \cdot r \cdot R \cdot I_0^2}{2} = \frac{C \cdot (R+r) \cdot R \cdot I_0^2}{2} = \tau_\Sigma \cdot S_R,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\tau_\Sigma = C \cdot (R+r) = \frac{T_n}{2,3}$ – постоянная времени разряда конденсатора на последовательно включенные резисторы с сопротивлениями R и r , значение которой определяется задаваемым значением T_n ; $S_R = \frac{R \cdot I_0^2}{2} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2}$ – площадь того же прямоугольного треугольника, образованного линией ВАХ резистора $u_R(t) = R \cdot i(t)$ с сопротивлением R и отрезком оси абсцисс от $i = 0$ до точки со значением $i = I_0$ на рис. 1.

III. Разряд конденсатора на варистор

При разряде конденсатора на варистор, имеющий нелинейную ВАХ, изменение тока $i(t)$ через варистор происходит уже не по экспоненте и не может быть представлено в виде, аналогичном (2).

Для построения кривой зависимости $i(t)$ предлагается применить один из указанных в [2] графоаналитических методов расчета переходных процессов в нелинейных цепях, а именно – метод последовательных интервалов, причем для рассматриваемого случая разряда конденсатора на варистор интегро-дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс изменения (уменьшения) *заряда* конденсатора, предлагается заменить алгебраическим уравнением, в котором содержатся приращения (отрицательные по знаку) тока и напряжения на элементах цепи в пределах *выбранных* интервалов *по току*, а интегрирование заменить суммированием площадей под кривой тока в пределах интервалов по времени, соответствующих выбранным интервалам по току.

Аналогично (1) при разряде конденсатора на варистор ток в цепи будет определяться изменением напряжения на варисторе u_B , равного напряжению на конденсаторе u_C :

$$i(t) = -\frac{dq}{dt} = -C \cdot \frac{du_C}{dt} = -C \cdot \frac{du_B}{dt}. \tag{7}$$

Выразив (7) через дискретные приращения и заменив интегрирование неизвестной функции $i(t)$ на n -ом промежутке времени от t до $t + \Delta t$

произведением $i_{cp}(\Delta t)_n \cdot (\Delta t)_n$, можно найти изменение заряда конденсатора за тот же промежуток времени:

$$(\Delta q)_n = - \int_t^{t+\Delta t} i(t) dt \approx i_{cp}(\Delta t)_n \cdot (\Delta t)_n = C \cdot \Delta u_B, \quad (8)$$

где $i_{cp}(\Delta t)_n = (i_{n-1} + i_n)/2$ – среднее значение тока на n -ом промежутке времени $(\Delta t)_n$, соответствующем выбранному n -ому интервалу изменения тока от i_{n-1} до i_n (здесь i_{n-1} – значение тока в начале, а i_n – значение тока в конце n -го интервала); $\Delta u_B = u_B(i_{n-1}) - u_B(i_n)$ – определяемое по ВАХ варистора изменение напряжения на варисторе при изменении тока в интервале от i_{n-1} до i_n ; $n = 1, 2, 3, \dots, 11$ – индексы обозначений выбранных интервалов разрядного тока в диапазоне его снижения от I_0 до $0,05 \cdot I_0$ (за окончание импульса тока принимаем момент его снижения до 5 % от максимального значения).

Из (8) можно найти значения каждого n -го промежутка времени:

$$(\Delta t)_n = 2C \cdot \frac{u_B(i_{n-1}) - u_B(i_n)}{i_{n-1} + i_n}. \quad (9)$$

Последовательно задавая значения тока на границах интервалов и суммируя вычисленные по (9) значения промежутков времени, можно построить кривую изменения тока разряда $i(t)$. Необходимые расчеты удобно вести в табличной форме.

Согласно [3], зависимость напряжения на нелинейном элементе от тока в нем может быть представлена графически в виде *динамической* (зависимость *мгновенных* значений напряжения на варисторе от *мгновенных* значений тока в нем в одни и те же моменты времени) или *статической* (зависимость *максимальных* («остаточных» согласно [4], но «остающихся» согласно [5]) значений напряжения на варисторе от соответствующих *максимальных* значений проходящих через него импульсов тока) ВАХ. Необходимая для реализации предлагаемой методики *динамическая* ВАХ $u_B(i)$ конкретного типа варистора может быть получена экспериментально или путем использования имеющейся статической ВАХ варисторов того же типоразмера, полученной усреднением экспериментальных *статических* ВАХ $U_m(I_m)$, если допустить, что в используемом диапазоне токов зависимость $u_B(i)$ еще тождественна зависимости $U_m(I_m)$. При этом следует иметь в виду, что при больших плотностях тока динамическая ВАХ варистора может не совпадать с его статической ВАХ и даже иметь петлевой характер [6]. При этом максимум напряжения на варисторе несколько опережает максимум тока, а напряжение на спаде импульса будет несколько ниже, чем

напряжение на его фронте при одном и том же значении тока. Данный случай предполагается рассмотреть при дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях. Согласно [6, 7], возможна аппроксимация статической ВАХ варистора степенной функцией $U_m(I_m) = A \cdot (I_m)^\alpha$ с конкретными значениями постоянной A , зависящей от материала и геометрических размеров варистора, и коэффициента нелинейности α материала варистора (как правило, на пологих участках ВАХ варисторов $\alpha \leq 0,1$). Такая аппроксимация может быть использована при составлении программы компьютерных расчетов по предлагаемой методике.

На рис. 3 приведена стилизованная статическая ВАХ некоторого типоразмера оксидно-цинковых варисторов, для удобства расчетов на пологом (выше «перегиба») проводящем участке аппроксимированная степенной функцией:

$$U_m(I_m) = u_B(i) = 1,38 \cdot i^{0,07}, \quad (10)$$

где i – мгновенное значение тока варистора в кА; u_B – мгновенное значение напряжения на варисторе в кВ.

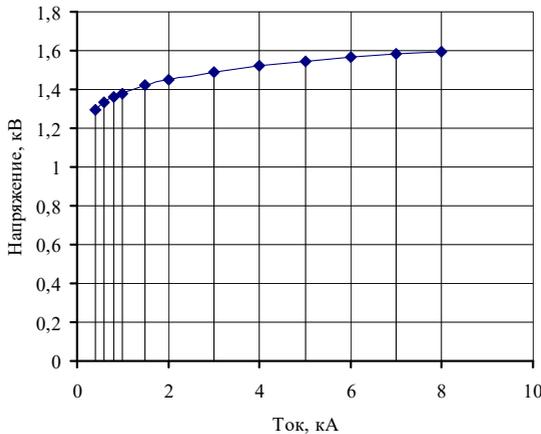


Рис. 3. Вольтамперная характеристика варистора: $u_B(i) = 1,38 \cdot i^{0,07}$

Fig. 3. The V/I characteristic of varistor: $u_B(i) = 1,38 \cdot i^{0,07}$

С учетом того, что ВАХ реального оксидно-цинкового варистора симметрична относительно начала координат, коэффициент нелинейности должен выражаться не десятичной, а простой дробью, т.е. $\alpha = k / l$, где k и l – целые положительные взаимно простые нечетные числа согласно [8], но для удобства проведения расчетов можно принять, например, что $\alpha = 7/99 \approx 0,07$.

На рис. 2 представлена кривая 2 тока $i(t)$ разряда конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ, заряженного, исходя из статической ВАХ варистора, для получения амплитуды тока $I_0 = 8$ кА до напряжения $U_0 = U_m(I_0) = 1,6$ кВ. Время, которое потребуется для снижения тока разряда до $i(t_c) = 0,1 \cdot I_0 = 0,8$ кА, составит всего 11 мкс, поэтому для того, чтобы при той же амплитуде импульса разрядного тока увеличить время разряда конденсатора на варистор до нормированного значения, например, $T_n = 250$ мкс, нужно будет, исходя из (9), пропорционально увеличить его емкость до $C = 100 \cdot (250/11) \approx 2270$ мкФ, для чего потребуется, видимо, целая батарея конденсаторов.

Кривая 3 на рис. 2 представляет изменение тока $i(t)$ разряда на варистор такой конденсаторной батареи. К моменту снижения тока разряда до 0,4 кА ($t \approx 0,5$ мс) напряжение на батарее, равное напряжению на варисторе, снизится согласно (10) до 1,3 кВ. На обкладках конденсаторов при этом останется заряд $Q = 2270 \cdot 10^{-6} \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 2,95$ Кл, а суммарная энергия их электрических полей снизится до $W_C = 2,95 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 1,92$ кДж.

Соответственно, к этому времени через варистор пройдет заряд, равный 0,68 Кл, а энергия, которая выделится в варисторе (рис. 4, кривая 1), составит приблизительно 1,0 кДж, т.е. всего лишь треть от начальной энергии продолжающей разряжаться конденсаторной батареи.

Если согласно [9] варистор заменить резистором с эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$, удовлетворяющему условию (3), т.е. $R_{\text{экв}} = (250 \cdot 10^{-6}/2,3) / (2270 \cdot 10^{-6}) \approx 0,048$ Ом, и последовательно с ним включенным источником напряжения с ЭДС $E = U_0 - I_0 \cdot R_{\text{экв}} = 1,6 - 8 \cdot 0,048 = 1,22$ кВ, направленной навстречу току, то ток разряда в такой схеме замещения будет изменяться по экспоненте с постоянной времени $\tau_3 = R_{\text{экв}} \cdot C = 0,048 \cdot 2270 \cdot 10^{-6} \approx 109$ мкс.

При разряде конденсатора, заряженного до напряжения $U_C(0) = E + I_0 \cdot R_{\text{экв}}$, когда ток спадет до нуля, напряжение на конденсаторе снизится до значения $U_C(\infty) = E$, рассеянная варистором энергия может быть выражена в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_B(\infty) &= W_C(0) - W_C(\infty) = C \cdot \frac{U_C(0)^2}{2} - C \cdot \frac{E^2}{2} = C \cdot \frac{(E + I_0 \cdot R_{\text{экв}})^2}{2} - C \cdot \frac{E^2}{2} = \\ &= C \cdot E \cdot I_0 \cdot R_{\text{экв}} + C \cdot \frac{I_0^2 \cdot R_{\text{экв}}^2}{2} = \tau_3 \cdot \left(E \cdot I_0 + \frac{I_0^2 \cdot R_{\text{экв}}}{2} \right) = \tau_3 \cdot S_3 \end{aligned} \quad (11)$$

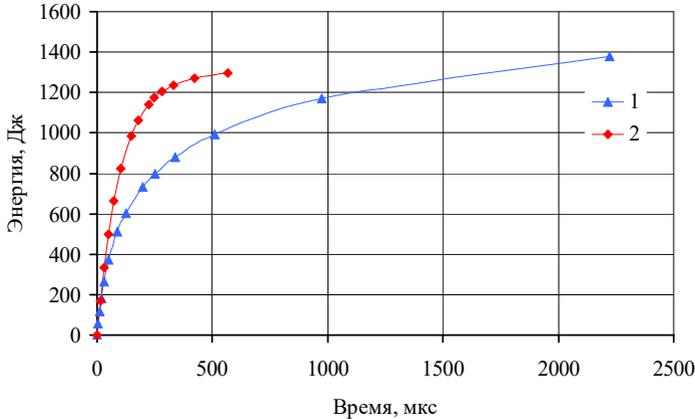


Рис. 4. Кривые изменения поглощаемой варистором энергии $w_B(t)$:
 1 – разряд конденсатора с емкостью $C = 2270$ мкФ на варистор;
 2 – разряд конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ на варистор и резистор с сопротивлением $r = 1,04$ Ом

Fig. 4. The curves of the energy $w_B(t)$ absorbed by the varistor:
 1 – discharging a capacitor $C = 2270$ μF on varistor;
 2 – discharging a capacitor $C = 100$ μF on varistor and resistor $r = 1.04$ Ohm

где $\tau_3 = R_{\text{экв}} \cdot C = T / 2,3$ – постоянная времени разряда конденсатора на варистор, значение которой определяется задаваемым значением $T_{\text{и}}$; $S_3 = E \cdot I_0 + R_{\text{экв}} \cdot I_0^2 / 2$ – площадь между линией ВАХ эквивалентной схемы замещения варистора $u_B(i) = E + i \cdot R_{\text{экв}}$ и отрезком оси абсцисс от $i = 0$ до точки со значением $i = I_0$ на рис. 5.

Если в (11) подставить значения входящих в него параметров, получится значение (около 1,23 кДж) энергии, поглощенной варистором при такой схеме замещения, завышенное на 24 % по сравнению с полученным по предлагаемой методике значением (почти 1,0 кДж) энергии, рассеиваемой варистором, в основном из-за увеличения прошедшего через резистор с сопротивлением $R_{\text{экв}}$ заряда с $Q_R = 0,68$ Кл до $Q_R = \tau_3 \cdot I_0 = 109 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \approx 0,87$ Кл при изменении тока по экспоненте.

IV. Разряд конденсатора на варистор и резистор

Если имеется возможность применить в испытательной установке конденсатор с более высоким номинальным рабочим напряжением, увеличение времени спада тока разряда конденсатора для получения требуемого значения $t_c = T_{\text{и}}$ при той же его емкости можно достичь путем включения последовательно с варистором резистора с соответствующим значением сопротивления r .

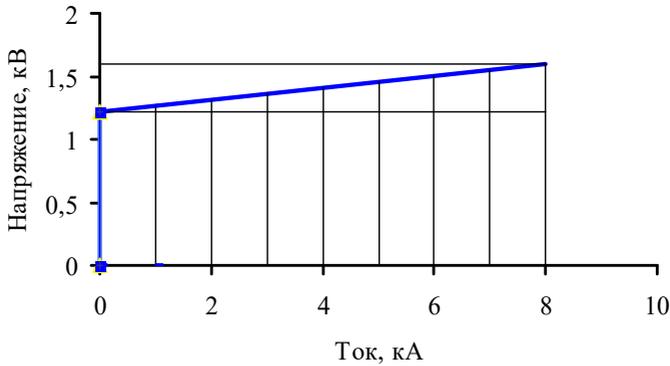


Рис. 5. Вольтамперная характеристика схемы замещения варистора
 $u_B(i) = E + I \cdot R_{\text{экв}}$ ($E = 1,22$ кВ; $R_{\text{экв}} = 0,048$ Ом)

Fig. 5. The V/I characteristic of the varistor equivalent circuit
 $u_B(i) = E + I \cdot R_{\text{экв}}$ ($E = 1,22$ kV; $R_{\text{экв}} = 0,048$ Ohm)

При этом изменение разрядного тока в такой цепи будет определяться (7), но с дополнительным падением напряжения еще и на резисторе:

$$i(t) = -\frac{dq}{dt} = -C \cdot \frac{du_C}{dt} = -C \cdot \frac{du_{\Sigma}}{dt}, \quad (12)$$

где $u_{\Sigma}(t) = u_B(t) + u_R(t)$ – сумма падений напряжений на варисторе и резисторе.

Выразив (12) через дискретные приращения, можно аналогично (8) найти изменение заряда конденсатора за n -й промежуток времени $(\Delta t)_n$:

$$(\Delta q)_n = - \int_t^{t+\Delta t} i(t) dt \approx i_{cp}((\Delta t)_n) \cdot (\Delta t)_n = C \cdot (\Delta u_{\Sigma})_n, \quad (13)$$

где $i_{cp}(\Delta t)_n = (i_{n-1} + i_n) / 2$ – среднее значение тока на n -ом промежутке времени $(\Delta t)_n$, соответствующем n -му интервалу изменения тока от i_{n-1} до i_n ; $(\Delta u_{\Sigma})_n = (\Delta u_B)_n + (\Delta u_R)_n = (u_B(i_{n-1}) - u_B(i_n)) + r \cdot (i_{n-1} - i_n)$ – изменение суммы падений напряжения на варисторе и резисторе при изменении тока от i_{n-1} до i_n на границах n -го интервала; $n = 1, 2, 3, \dots, 11$ – обозначения выбранных интервалов разрядного тока в диапазоне его снижения от I_0 до $0,05 \cdot I_0$.

Из (13) можно определить величину n -го промежутка времени:

$$(\Delta t)_n = 2C \cdot \frac{(u_B(i_{n-1}) - u_B(i_n)) + r \cdot (i_{n-1} - i_n)}{i_{n-1} + i_n}. \quad (14)$$

Последовательно суммируя вычисленные по (14) значения промежуточных времени, можно построить кривую зависимости $i(t)$.

Теперь можно вернуться к расчету значения сопротивления r для того, чтобы кривая зависимости $i(t)$ проходила через точку с координатами: $t = t_c = T_n$ и $i(t_c) = 0,8$ кА. Из (14) видно, что снижение тока разряда в такой цепи с $I_0 = 8$ кА до $0,1 \cdot I_0 = 0,8$ кА произойдет за время, состоящее из двух слагаемых:

$$t_c = T_n = t_B + t_P, \quad (15)$$

где t_B – время снижения тока, рассчитываемого по (9), при разряде конденсатора только на варистор; t_P – время снижения тока, изменяющегося по экспоненте, при разряде этого же конденсатора только на резистор с сопротивлением r .

Если в (3) принять $T_n = t_P$, то с учетом (15) можно найти необходимое значение сопротивления r резистора:

$$r = \frac{t_P}{2,3 \cdot C} = \frac{T_n - t_B}{2,3 \cdot C}. \quad (16)$$

Осталось определиться с порядком расчета всей энергии, выделившейся в варисторе за время действия импульса тока. Поскольку в разрядной цепи теперь два приемника энергии (один – с нелинейной, а другой – с линейной ВАХ), придется по предлагаемой методике провести сначала расчет выделившейся в варисторе и резисторе энергии последовательно на каждом из выбранных интервалов по току, а затем полученные для варистора значения суммировать.

Для расчета энергии, выделившейся в варисторе Δw_B и в резисторе Δw_P на каждом интервале, примем во внимание, что их сумма должна быть равна разности значений энергии электрического поля конденсатора Δw_C на границах того же интервала.

Если изменение энергии конденсатора на границах n -го интервала:

$$(\Delta w_C)_n = (w_C)_{n-1} - (w_C)_n = C \cdot \frac{(u_{\Sigma}(i_{n-1}))^2 - (u_{\Sigma}(i_n))^2}{2},$$

а энергия, выделившаяся на интервале $(\Delta t)_n$ в резисторе, может быть определена по закону Джоуля-Ленца:

$$(\Delta w_P)_n = 0,25 \cdot (i_{n-1} + i_n)^2 \cdot r \cdot (\Delta t)_n,$$

то энергия, выделившаяся в варисторе на том же интервале, будет равна их разности:

$$(\Delta w_B)_n = (\Delta w_C)_n - (\Delta w_P)_n. \quad (17)$$

Далее, последовательно суммируя вычисленные по (17) значения, можно найти значения энергии $w_B(t)$, выделившейся в варисторе в процессе разряда конденсатора. Необходимые расчеты также удобно производить в форме таблицы.

На рис. 2 представлена кривая 4 тока $i(t)$ разряда конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ на варистор и последовательно с ним включенный резистор с сопротивлением r , значение которого, необходимое для увеличения длительности импульса разрядного тока с $t_c = 11$ мкс до $t_c = T_u = 250$ мкс, можно найти по (16):

$$r = \frac{T_u - t_B}{2,3 \cdot C} = \frac{(250 - 11) \cdot 10^{-6}}{2,3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \approx 1,04 \text{ Ом.}$$

Для получения начального тока $I_0 = 8$ кА с учетом последовательно включенных в разрядную цепь статического сопротивления варистора при токе 8 кА, согласно его ВАХ на рис. 3 равно $R_{ст} = U_0 / I_0 = 1,6/8 = 0,2$ Ом, и резистора с сопротивлением $r = 1,04$ Ом конденсатор придется зарядить уже до напряжения $U_C(0) = 8 \cdot (0,2 + 1,04) = 9,92$ кВ. Соответственно, начальный заряд конденсатора составит почти 1,0 Кл, а начальная энергия его электрического поля достигнет 4,92 кДж.

К моменту снижения тока разряда до 0,4 кА ($t \approx 0,33$ мс) напряжение на варисторе снизится до тех же 1,3 кВ, а напряжение на конденсаторе – до 1,7 кВ. При этом заряд конденсатора снизится до 0,17 Кл, а энергия его электрического поля – приблизительно до 0,15 кДж (3 % от начальной энергии).

Соответственно, при таком почти полном разряде конденсатора через варистор пройдет электрический заряд, равный 0,83 Кл, а энергия, которая выделится в варисторе (рис. 4, кривая 2), составит 1,24 кДж, что вызовет его нагрев, как показывают расчеты с учетом теплоемкости варистора, на 31°C.

При подготовке к испытаниям актуальным становится также вопрос о необходимой термической устойчивости добавочного резистора с сопротивлением r . Как видно, из выше проведенных расчетов, он должен быть рассчитан на рассеивание энергии, равной почти 75 % от начальной энергии конденсатора.

Если теперь, как и ранее, варистор заменить резистором с сопротивлением $R_{экв}$, таким, чтобы он вместе с добавочным резистором с сопротивлением $r = 1,04$ Ом обеспечивал заданную длительность импульса разрядного тока $T_u = 250$ мкс, т.е. чтобы $R_{экв} + r = (250/2,3) / 100 \approx 1,087$ Ом, а последовательно с резисторами включить источник ЭДС $E = U_0 - I_0 \cdot (R_{экв} + r) = 9,92 - 8 \cdot 1,087 = 1,22$ кВ, то ток разряда в такой цепи

будет изменяться по экспоненте с той же постоянной времени $\tau_{\Sigma} = (R_{\text{эКВ}} + r) \cdot C = 1,087 \cdot 100 \approx 109$ мкс.

После разряда конденсатора, заряженного до напряжения $U_C(0) = E + I_0 \cdot R_{\text{эКВ}}$, когда ток спадет до нуля, напряжение на конденсаторе снизится до $U_C(\infty) = E$, а рассеянная варистором (после его замены резистором с сопротивлением $R_{\text{эКВ}}$ и источником противо-ЭДС E) энергия $W_B(\infty)$ будет равна разности энергии, ушедшей из электрического поля конденсатора ΔW_C , и энергии $W_P(\infty)$, поглощенной резистором с сопротивлением r , и с учетом (6) может быть представлена в виде, аналогичном (11):

$$W_B(\infty) = W_C(0) - W_C(\infty) - W_P(\infty) = C \cdot \frac{(E + I_0 \cdot (R_{\text{эКВ}} + r))^2}{2} - C \cdot \frac{E^2}{2} - C \cdot \frac{(R_{\text{эКВ}} + r) \cdot r \cdot I_0^2}{2} = C \cdot (R_{\text{эКВ}} + r) \cdot \frac{E \cdot I_0 + R_{\text{эКВ}} \cdot (I_0)^2}{2} = \tau_{\Sigma} \cdot S_3, \quad (18)$$

где $\tau_{\Sigma} = C \cdot (R_{\text{эКВ}} + r) = T_{\text{и}} / 2,3$ – постоянная времени разряда конденсатора на последовательно включенные резисторы с сопротивлениями $R_{\text{эКВ}}$ и r ; ее значение определяется задаваемым значением $T_{\text{и}}$; $S_3 = E \cdot I_0 + R_{\text{эКВ}} \cdot (I_0)^2 / 2$ – площадь между линией ВАХ эквивалентной схемы варистора $u_B(i) = E + i \cdot R_{\text{эКВ}}$ и отрезком оси абсцисс от $i = 0$ до точки со значением $i = I_0$ на рис. 3.

Если в (18) подставить значения входящих в него параметров, то получим значение энергии (1,23 кДж), равное значению энергии, полученному ранее в результате расчета по (11) для случая разряда конденсатора только на варистор.

В обоих случаях при расчете варистор заменялся одной и той же эквивалентной схемой, состоящей из источника противо-ЭДС $E = 1,22$ кВ и резистора с сопротивлением $R_{\text{эКВ}} \approx 0,05$ Ом, через который пропускались экспоненциальные импульсы тока с одной и той же амплитудой и постоянной времени, а, следовательно, в соответствии с (4), и одинаковым зарядом. Таким образом, использование для расчетов замены варистора эквивалентной схемой, состоящей из резистора и источника противо-ЭДС, при условии сохранения амплитуды и длительности импульсов тока, не позволяет выявить разницу в величине и интенсивности впрыска энергии, поглощаемой варистором.

V. Обсуждение полученных результатов

Из рис. 4 видно, что скорость поступления энергии в варистор при разряде конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ (кривая 2) существенно выше, чем при разряде конденсаторной батареи с емкостью $C = 2270$ мкФ (кривая 1). Соответственно и энергия, поступающая в варистор к моменту времени $T_{\text{и}} = 250$ мкс, в первом случае будет больше, чем во втором, почти

в 1,5 раза. Как видно из рис. 2, такой интенсивный «впрыск» энергии сопровождается еще и в 1,5-2 раза большими значениями разрядного тока для одних и тех же моментов времени, что может привести к повреждению металлизации в точках контакта с электродами на торцевых поверхностях варистора.

При временах, превышающих 250 мкс, ток разряда конденсаторной батареи с емкостью $C = 2270$ мкФ будет уже больше, чем у конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ (рис. 2), и, как показывают дальнейшие расчеты, только при временах, превышающих 2,2 мс, когда разрядный ток будет меньше, чем $0,01 \cdot I_0$, а аппроксимация ВАХ по (16) может оказаться уже некорректной, значение поглощенной варистором за этот довольно большой промежуток времени энергии может уже превысить 1,3 кДж, что обеспечит и его нагрев больше, чем на 32 °С.

Очевидно, что вариант параметров цепи разряда конденсатора с емкостью $C = 2270$ мкФ на варистор, но без резистора ($r = 0$), является одним из двух крайних сочетаний значений емкости конденсатора и сопротивления резистора, включаемого последовательно с испытуемым варистором.

Вариант параметров цепи разряда конденсатора с емкостью $C = 100$ мкФ на варистор и резистора с сопротивлением $r = 1,04$ Ом является другим крайним (или близким к нему) сочетанием значений этих параметров, так как поглощенная за короткое время варистором в этом случае энергия (при разрядном токе $0,05 \cdot I_0$ – около 1,24 кДж) уже приблизится к ее максимально возможному значению.

Действительно, из (14) и (16) видно, что при уменьшении емкости C увеличение сопротивления r происходит по гиперболической зависимости, вызывая сдвиг кривой 4 разрядного тока $i(t)$ на рис. 2 в сторону больших значений времени и ее приближение к строго экспоненциальной зависимости от времени с постоянной времени $\tau_{\Sigma} = T_n/2,3 = 109$ мкс (кривая 1 на рис. 2), в то время как площадь под ВАХ эквивалентной схемы варистора в пределе не может быть больше площади под ВАХ самого варистора.

Тогда максимальную энергию, которую в течение одного импульса разрядного тока с амплитудой 8 кА и длительностью импульса 250 мкс должен будет поглотить варистор, можно приблизительно оценить следующим образом:

$$(W_B(\infty))_{\max} = \tau_{\Sigma} \cdot S_{\text{ВАХ}} \geq 109 \cdot 10^{-6} \cdot 11,5 \cdot 10^6 \approx 1,25 \text{ кДж},$$

где $S_{\text{ВАХ}} \geq 11,5 \cdot 10^6$ Вт – приблизительное значение площади под ВАХ варистора, рассчитанное путем суммирования площадей 11 трапеций, на которые в соответствии с выбранными интервалами по току в диапазоне от $i = I_0$ до $i = 0,4 \cdot I_0$ разбита площадь под ВАХ варистора на рис. 5.

Несмотря на существенное различие лишь в интенсивности впрыска энергии импульса разрядного тока в варистор в рассмотренных выше двух крайних случаях, оно может оказаться решающим при испытаниях конкретного типа УЗИП. Дело в том, что при испытании на пропускную способность N импульсов обычно подают сериями, состоящими из двух или трех импульсов, с небольшими интервалами между импульсами и менее, чем полчасовой паузой между сериями. Из приведенных выше расчетов, видно, что при нахождении варистора в составе герметизированного УЗИП и его быстром нагреве, близком к адиабатическому, при испытании в установке с емкостью батареи конденсаторов порядка 100 мкФ уже после первой серии из трех импульсов с учетом температуры окружающей среды температура варистора может подняться выше знакового порогового уровня в 100 °С. Кумулятивный тепловой эффект от последующих серий импульсов может негативным образом повлиять на варистор и соприкасающиеся с ним материалы, приведя к отрицательным результатам испытаний.

В связи с этим, на практике возможны даже конфликтные ситуации. Например, если у производителя рассматриваемых варисторов изделия будут испытываться на пропускную способность на установке с емкостью батареи конденсаторов превышающей 2000 мкФ, и благополучно выдерживать эти испытания, то не исключено, что у производителя УЗИП, использующего такие варисторы в качестве комплектующих, на их установке с емкостью конденсаторной батареи, равной 100 мкФ, аналогичные испытания их изделия могут не пройти.

VI. Заключение

Эквивалентная замена варистора резистором и последовательно с ним включенным источником ЭДС в принципе не позволяет выявить различия ни в абсолютной величине, ни в скорости впрыска энергии в варистор при расчете энергетического воздействия на него в установках с разными значениями емкостей конденсаторных батарей при одних и те же заданных значениях амплитуды и длительности импульсов разрядного тока. Поэтому на основе метода последовательных интервалов разработана упрощенная методика расчета кривых изменения во времени разрядного тока конденсаторной батареи и энергии, выделяющейся в испытываемом варисторе за время прохождения через него импульса тока с заданными параметрами.

В результате проведенных по предложенной методике расчетов с разными значениями емкости конденсаторной батареи и сопротивления резистора, включаемого последовательно с испытываемым варистором, выявлена существенная разница в интенсивности впрыска энергии в варистор при одних и тех же значениях амплитуды и длительности импульсов разрядного тока.

Для установления единых условий испытаний целесообразно в ТУ на варисторы и УЗИП на их основе внести изменения в части технических требований к параметрам испытательных импульсов разрядного тока, указав, также наименьшее значение заряда и/или энергии, которые за время длительности импульса разрядного тока должны соответственно пропустить через себя или поглотить варисторы без недопустимого ухудшения своих характеристик, как, например, это сделано в [4, 5, 10].

Наконец, поскольку при разряде конденсатора на цепь, в которой из-за наличия ее собственной индуктивности длительность фронта импульса тока может достигать нескольких микросекунд, а из-за наличия даже одного нелинейного элемента ток снижается не по экспоненте, импульс тока в принципе не может быть экспоненциальным по форме, то его корректнее называть квазиэкспоненциальным.

© Гусаченко Е.А., 2024

Поступила в редакцию 12.02.2024

Принята к публикации 22.03.2024

Received 12.02.2024

Accepted 22.03.2024

Библиографический список

- [1] Круг К.А. Основы электротехники. Т. 1. Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 472 с.
- [2] Круг К.А., Даревский А.И., Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Ломоносов В.Ю., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы электротехники. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 432 с.
- [3] Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехник. Том 2. С.-Пб.: Питер, 2003. – 576 с.
- [4] ГОСТ ИЕС 61643-11-2013. Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения энергии. Требования и методы испытаний. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 81 с.
- [5] ГОСТ Р 52725-2021. Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. Введ. 2022-02-01. М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 42 с.
- [6] Шишман Д.В., Бронфман А.И., Пружинина В.И., Савельев В.П. Вентильные разрядники высокого напряжения. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ие, 1971. – 261 с.
- [7] Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Бортник И.М., Вишневецкий Ю.И., Кренгауз Э.Б. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с.
- [8] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов. М.: Гос. из-во физ.- мат. лит-ры, 1962. – 608 с.
- [9] Татур Т.А. Основы электрических цепей (Справочное пособие). М.: Высшая школа, 1980. – 271 с.

- [10] IEC 60099-4:2014. Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Введ. 2014-06-30. IEC, 2014. – 358 p.

References

- [1] K.A. Krug, *Osnovy ehlektrotekhniki [Fundamentals of Electrical Engineering]*. Vol. 1. Leningrad: Gosenergoizdat, 1946 (in Russian).
- [2] K.A. Krug, A.I. Darevskiy, G.V. Zeveke, P.A. Ionkin, V.Yu. Lomonosov, A.V. Netchushil and S.V. Strakhov, *Osnovy ehlektrotekhniki [Fundamentals of Electrical Engineering]*. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1952 (in Russian).
- [3] K.S. Demirchyan, L.R. Neiman, N.V. Korovkin and V.L. Chechurin, *Teoretitsheskiye osnovy ehlektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*. Vol. 2. St. Petersburg: Peter, 2003 (in Russian).
- [4] Low-voltage surge protective devices. Part 11. Surge protective devices connected to low-voltage power systems. Requirements and test methods, GOST IEC 61643-11-2013, Jan. 2015.
- [5] Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. electrical installations from 3 to 750 kV. General specifications, GOST R 52725-2021, Feb. 2022.
- [6] D.V. Shishman, A.I. Bronfman, V.I. Pruzhinina and V.P. Savelyev, *Wentil'nye razryadniki vysokogo napryazheniya [High voltage surge arresters]*. Leningrad: Energiya. Leningrad department, 1971 (in Russian).
- [7] N.M. Adonyev, V.V. Afanasyev, I.M. Bortnik, Yu.I. Vishnevsky and E.B. Krengauz, *Spravochnik po ehlektricheskim apparatam vysokogo napryazheniya [Handbook of high voltage electrical apparatus]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1987 (in Russian).
- [8] I.N. Bronshtein and K.A. Semendyaev, *Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchastshihsyia wtuzow [Handbook of mathematics. For engineers and college students]*. Moscow: State publishing house physics and mathematics literature, 1962 (in Russian).
- [9] T.A. Tatur, *Osnovy elektricheskikh cepej (Spravochnoe posobie) [Basics of electrical circuits (Reference manual)]*. Moscow: Higher School, 1980 (in Russian).
- [10] Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, IEC 60099-4:2014, June 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT AUTHOR

Гусаченко Евгений Андреевич, ведущий инженер Всероссийского электротехнического института – филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабина», г. Москва, Российская Федерация

Evgeniy A. Gusachenko, leading engineer of All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute”, Moscow, Russian Federation