

УССР, 1980. – 30 с. 3. *Сирота И.М.* Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова думка, 1985. – 64 с. 4. *Цапенко Е.Ф.* Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 134 с. 5. *Булгаков А.А.* Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970. – 320 с. 6. *Рябошапка А.Т., Сичкарь В.М.* и др. А.с. 1117772 (СССР). Дугогасящий реактор. // Б.и. 1984, № 37.

Поступила в редколлегию 19.03.2007.

УДК 621.373.5

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук;
В.А.БОЧАРОВ; М.А.НОСЕНКО; НТУ «ХПИ»

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО РАССЕИВАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБЪЕМНЫХ РЕЗИСТОРОВ ТИПА ТВО-60

Наведено деякі результати експериментальних досліджень температурної залежності активного опору і електротермічної стійкості для високовольтних керамічних об'ємних постійних резисторів типу ТВО-60-24 Ом, що розсіюють теплову енергію великих імпульсних струмів у розрядних колах потужних електрофізичних установок.

Some results of experimental researches of temperature dependence of active resistance and electrothermal immunity of high-voltage ceramic volume resistors of TVO-60-24 Ohm type dissipating thermal energy of high pulse current in discharging circuits of high-power electrophysical installations are adduced.

1. ВВЕДЕНИЕ

Керамические объемные постоянные резисторы типа ТВО нашли достаточно широкое практическое использование в различных электротехнических устройствах постоянного, переменного и импульсного токов, относящихся к области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [1-4]. Данные резисторы с предельным рабочим импульсным напряжением U_p от 0,4 до 25 кВ и номинальной постоянной мощностью рассеяния $P_{пр}$ от 0,125 до 60 Вт в соответствии с требованиями ГОСТ 11324-76 [5] и технических условий ОЖО.467.121 ТУ являются тепло- и влагостойкими постоянными резисторами с изолированным токопроводящим слоем. Этот слой, окруженный снаружи массивной изоляционной прямоугольной фарфоровой оболочкой (рубашкой), изготавливается, как правило, практически прямоугольного поперечного сечения на основе пресованного угольного порошка. Поперечное сечение, длина и плотность запресовки токопроводящего угольного слоя и определяет номинальное активное сопротивление R_p этих резисторов, состав-

ляющее в зависимости от класса резистора (начиная с ТВО-0,125 и заканчивая ТВО-60) от 3 Ом до 1 МОм [5]. Согласно [5] в импульсном режиме работы допускаемая средняя мощность резисторов типа ТВО не должна превышать 50 % от их номинальной постоянной мощности рассеяния $P_{ПР}$ для частоты повторения импульсов тока не более 20 кГц и длительности воздействующего на них импульса тока $\tau_{И}$ от 1 до 50 мкс. При рассеянии резисторами типа ТВО своей номинальной постоянной мощности $P_{ПР}$ длительно допустимая температура окружающей их среды $\theta_{0Д}$ и тела резисторов типа ТВО в соответствии с [5] должна составлять не более 85 °С. Предельная температура окружающей среды $\theta_{0Л}$ и самих резисторов типа ТВО для любых временных форм воздействующего на них тока составляет 155 °С [5]. Других рекомендаций в [5] по использованию резисторов типа ТВО в электрических схемах устройств ВИТ с импульсным током нет. Такая ситуация с малоопределенной по амплитудно-временным параметрам (АВП) протекающего по ним тока и рассеиваемой ими энергии областью использования приводит к определенным для электротехников и электрофизиков техническим трудностям при практическом применении и обоснованном выборе требуемого числа резисторов типа ТВО в электрических схемах ВИТ, когда воздействующие на них большие импульсные токи (БИТ) характеризуются длительностью 1 мкс $>$ $\tau_{И}$ $>$ 50 мкс при частотах их повторения значительно меньше 20 кГц (например, для одиночного импульса тока, протекающего по рассматриваемому типу резистора).

Целью статьи является экспериментальное определение температурной зависимости активного сопротивления R_p , уточнение предельных значений рассеиваемой пиковой $P_{ПИ}$ и усредненной $P_{РС}$ импульсной мощности, а также критических и длительно допустимых значений рассеиваемой импульсной тепловой энергии W_p для высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом, используемых в разрядных цепях мощных электрофизических установок с БИТ при $\tau_{И} >$ 50 мкс.

2. ЗАВИСИМОСТЬ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРА ТИПА ТВО-60-24 Ом ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Из имеющейся в НИПКИ «Молния» НГУ «ХПИ» партии резисторов типа ТВО-60-24 Ом с допуском ± 10 % (производство России, г. Котовск), считающейся не менее 100 шт., были произвольным путем выбраны три резистора и подвергнуты в сушильном термощкафе типа 2В-151 воздействию температуры в диапазоне от 20 до 160 °С. Выдержка каждого исследуемого резистора при той или иной температуре составляла не менее 30 мин, а общее время его нахождения в термощкафу при прохождении указанного температурного диапазона было выбрано равным не менее 180 мин. При достижении соответствующего уровня температуры в термощкафу и обеспечении принятой временной выдержки резисторы изымались из термощкафа и опе-

ративно проводились на стеклопластиковой подложке замеры их активного сопротивления R_p . При этом плоские металлические выводы резисторов с помощью штатных подсоединительных проводов подключались к цифровому измерителю RLC -параметров типа Е7-8. Результаты проведенных измерений R_p (в Омах) приведены в табл. Из представленных в табл. данных следует, что при нагреве керамических объемных резисторов типа ТВО-60-24 Ом в практическом диапазоне температур θ_C от 20 до 160 °С их активное сопротивление R_p изменяется практически не более чем на 5 %. Причем, это изменение всегда носит знак «минус», то есть при нагреве резисторов типа ТВО-60-24 Ом их активное сопротивление R_p уменьшается. Такой характер температурного изменения R_p для керамических объемных резисторов типа ТВО-60-24 Ом с токопроводящим угольным слоем принципиально отличается от температурной зависимости R_p для резисторов с металлическим токопроводящим слоем. В последних с ростом температуры θ_C металлического слоя за счет усиливающихся колебаний его кристаллической решетки и возрастанием роли фононов происходит и увеличение значений их активного сопротивления R_p . Вероятно, выявленная нами особенность в температурной зависимости активного сопротивления R_p резистора типа ТВО-60-24 Ом связана со специфическим влиянием температуры нагрева на микроструктуру его как фарфоровой оболочки, так и токопроводящего угольного слоя. Одним из возможных физических механизмов здесь может являться тот, который связан с изменением (увеличением) при нагреве распределенного по объему резистора в его изоляционной и угольной частях числа носителей электричества. Учитывая незначительные изменения указанных выше значений R_p , можно заключить, что при нагреве керамических объемных резисторов типа ТВО-60-24 Ом в рабочем для области ВИТ диапазоне температур θ_C от 20 до 160 °С их активное сопротивление можно считать практически постоянным и равным соответствующему номинальному значению R_p .

Температурная зависимость R_p для резистора типа ТВО-60-24 Ом.

θ_C №	20 °С	60 °С	80 °С	100 °С	120 °С	140 °С	160 °С
1	25,93	25,89	25,79	25,88	25,43	25,08	24,76
2	25,31	25,25	25,13	24,94	24,75	24,44	24,10
3	22,74	22,71	22,61	22,48	22,29	22,06	21,71

3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕИВАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕЗИСТОРА ТИПА ТВО-60-24 Ом

Учитывая практически чисто омический характер сопротивления исследуемых постоянных резисторов типа ТВО, для рассеиваемой одним из них в импульсном режиме воздействия на него разрядного тока мощной электро-

установки тепловой энергии W_P можно записать следующее соотношение:

$$W_P = R_P \int_0^{\tau_H} i_P^2(t) dt, \quad (1)$$

где i_P – ток в разрядной цепи электроустановки и соответственно в рассматриваемом резисторе, активное сопротивление R_P которого согласно приведенным выше в разделе 2 данным практически не изменяется в процессе его электротеплового нагрева до предельных рабочих температур $\theta_{0II} = 155^\circ\text{C}$.

Для АВП разрядного тока $i_P = i_{PA}$ при аperiodическом законе его изменения в электрической цепи разряда мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), характерном для нашего случая, будет справедливо следующее аналитическое выражение [6]:

$$i_{PA}(t) = \beta_A \cdot I_{mA} \cdot [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (2)$$

где $I_{mA} = U_0 / \beta_A (\alpha_2 - \alpha_1) L_\Gamma$ – амплитуда аperiodического разрядного тока $i_{PA}(t)$; α_1, α_2 – коэффициенты формы разрядного тока $i_{PA}(t)$, приближенно равные $\alpha_1 = \delta - (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2} \approx 0,76/\tau_{II}$ и

$\alpha_2 = \delta + (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2} \approx 2,37/\tau_\phi$; τ_ϕ, τ_{II} – соответственно длительность фронта и длительность аperiodического импульса тока $i_{PA}(t)$; U_0 – зарядное напряжение на общей емкости $C_{ГC}$ мощного ЕНЭ электроустановки; $\delta = R_H / 2L_\Gamma$ –

коэффициент затухания тока $i_{PA}(t)$; $\omega_0 = (L_\Gamma C_{ГC})^{-1/2}$ – собственная круговая частота разрядного контура электроустановки; L_Γ – индуктивность разрядной цепи электроустановки с ЕНЭ;

$\beta_A = [(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)}]^{-1}$ – нормирующий коэффициент; R_H – активное сопротивление разрядной цепи мощной электроустановки, определяемое общим активным сопротивлением последовательно соединенных между собой и включенных в нее резисторов типа ТВО-60-24 Ом, каждый из которых имеет активное сопротивление R_P .

С учетом (2) для импульсной тепловой энергии W_P , рассеиваемой на исследуемом резисторе при однократном воздействии на него аperiodического разрядного тока $i_{PA}(t)$, на основании (1) получаем [6]:

$$W_P = R_P \int_0^{\infty} i_{PA}^2(t) dt = R_P \cdot \beta_A^2 \cdot I_{mA}^2 \left[(2\alpha_1)^{-1} - 2(\alpha_1 + \alpha_2)^{-1} + (2\alpha_2)^{-1} \right]. \quad (3)$$

Примем, что в принятой нами электрической схеме разряда ЕНЭ $R_H = 192$ Ом, $R_P = 24$ Ом; $L_\Gamma = 1$ мкГн, $C_{ГC} = 2,56$ мкФ и $U_0 = 200$ кВ. Тогда в соответствии с (2) и (3) получаем, что в рассматриваемой разрядной цепи мощной испытательной электроустановки: $\alpha_1 = 2,03 \cdot 10^3$ с⁻¹; $\alpha_2 = 1,92 \cdot 10^8$ с⁻¹; $\beta_A = 1,0$; $\delta = 9,6 \cdot 10^7$ с⁻¹; $\omega_0 = 6,25 \cdot 10^5$ с⁻¹; $I_{mA} = 1,042 \cdot 10^3$ А; $W_P = 6,4 \cdot 10^3$ Дж; $\tau_\phi = 12,34$ нс; $\tau_{II} = 373,6$ мкс. Выполненная энергетическая

проверка этих аналитических расчетов показывает, что при запасаемой электрической энергии W_T в ЕНЭ мощной высоковольтной испытательной электроустановки, равной $W_T = C_{TC} \cdot U_0^2/2 = 51,2$ кДж, рассеиваемая на каждом из восьми резисторов типа ТВО-60-24 Ом ($R_H = 8 R_p$) импульсная тепловая энергия будет точно равной указанной выше энергии W_p , а именно: $W_p = W_T/8 = 6,4 \cdot 10^3$ Дж. В этой связи предлагаемое нами соотношение (3) для расчета в импульсном режиме выделяющейся в резисторе типа ТВО-60-24 Ом тепловой энергии, от воздействия на него разрядного аperiodического тока $i_{pA}(t)$ мощного ЕНЭ испытательной электроустановки, можно считать вполне работоспособным. Дальнейшая оценка усредненной импульсной мощности P_{PC} , рассеиваемой на резисторе типа ТВО-60-24 Ом за время длительности одиночного импульса временной формы 12,4 нс/373,6 мкс разрядного тока $i_{pA}(t)$, показывает, что она принимает следующее крайне огромное численное значение: $P_{PC} = W_p/\tau_{II} = 17,13$ МВт. При такой оценке P_{PC} , наверное, ее полученные значения можно считать пиковой импульсной мощностью рассеяния P_{III} для резистора типа ТВО-60-24 Ом. Безусловно, эти пиковые значения импульсной мощности рассеяния во много раз превышают номинальную постоянную мощность рассеяния P_{III} для исследуемого резистора, равную 60 Вт.

В случае прохождения через исследуемый резистор серии следующих друг за другом аperiodических импульсов разрядного тока $i_{pA}(t)$, характеризующимся скважностью T_C (размерность в секундах), то для приближенного расчета усредненной импульсной мощности P_{PC} рассеяния в резисторе типа ТВО-60-24 Ом можно воспользоваться таким соотношением:

$$P_{PC} = W_p/T_C. \quad (4)$$

Например, при указанных выше электрических данных разрядной цепи электроустановки с мощным ЕНЭ, АВП импульсного разрядного тока $i_{pA}(t)$ и $T_C = 75$ с для численного значения P_{PC} согласно (4) следует, что в этом случае усредненная импульсная мощность рассеяния становится численно равной $P_{PC} = 6,4 \cdot 10^3$ Дж / 75 с = 85,3 Вт. При $T_C = 120$ с в соответствии с (4) для резистора типа ТВО-60-24 Ом имеем, что $P_{PC} = 6,4 \cdot 10^3$ Дж / 120 с = 53,3 Вт, то есть она даже меньше, чем его номинальная постоянная мощность рассеяния $P_{III} = 60$ Вт, рекомендуемая требованиями ГОСТ 11324-76 [5].

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕИВАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕЗИСТОРА ТИПА ТВО-60-24 Ом

Выполним численное моделирование электромагнитных и электротепловых процессов, протекающих в высоковольтных керамических объемных постоянных резисторах типа ТВО-60-24 Ом, используемых в разрядной цепи принятой нами испытательной электроустановки с мощным ЕНЭ, и полученные результаты сравним с данными соответствующих аналитических расче-

тов, представленных в разд. 3. Планируемое моделирование проведем с помощью апробированной нами ранее программы EWB 5.12 [7]. На рис. 1 приведена осциллограмма фронта импульса разрядного тока $i_{pA}(t)$ в принятой электрической цепи (см. разд. 5) испытательной электроустановки с мощным ЕНЭ, разряжающимся при $U_0 = 200$ кВ на активное сопротивление $R_H = 192$ Ом, собранное из восьми последовательно включенных резисторов типа ТВО-60-24 Ом ($R_P = 24$ Ом). Из данных рис. 1, полученных при $U_0 = 10$ В, видно, что $I_{mA} = 9,99 \cdot 20 \cdot 10^3 / 192 = 1,041 \cdot 10^3$ А, а длительность фронта τ_ϕ , расшифрованная согласно требованиям [8], составляет примерно 19,5 нс.

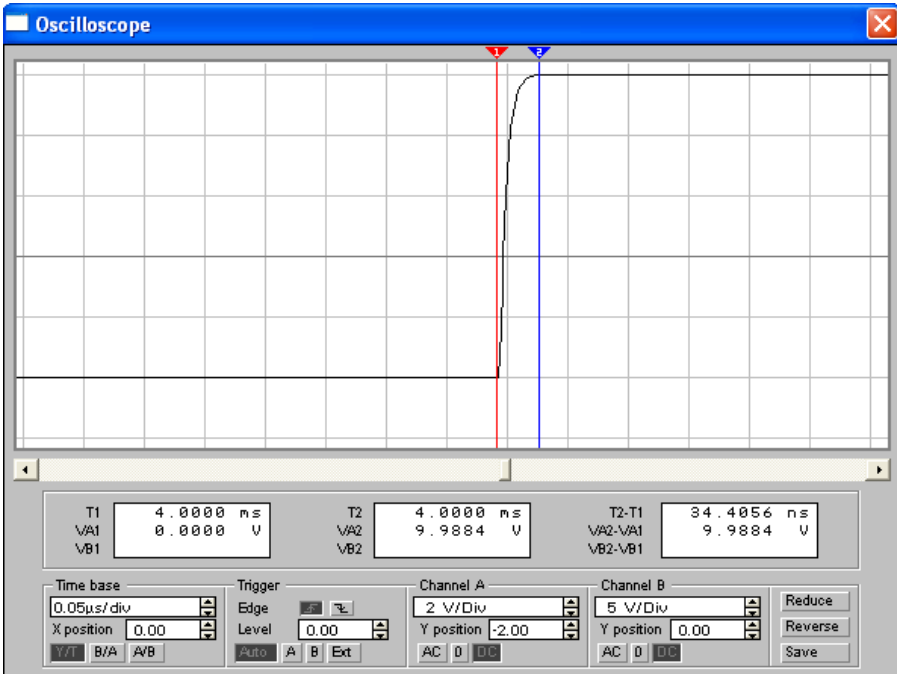


Рисунок 1 – Осциллограмма нарастающей части аperiodического импульса разрядного тока $i_{pA}(t)$, воздействующего на керамический резистор типа ТВО-60-24 Ом

Заметим, что при расчете в разделе 3 по соотношению (2) длительности фронта τ_ϕ разрядного тока $i_{pA}(t)$ она была равной 12,4 нс, а расчетная амплитуда тока при этом составляла $I_{mA} = 1,042 \cdot 10^3$ А. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования длительности импульса τ_H разрядного тока $i_{pA}(t)$ в рассматриваемой электрической схеме включения резисторов типа ТВО-60-24 Ом (см. рис. 3). В соответствии с данными рис. 2 искомая длительность токового импульса τ_H оказывается примерно равной 345 мкс (при приближенном аналитическом расчете в разделе 3 АВП разрядного тока

$i_{PA}(t)$ было получено, что $\tau_{II} = 373,6$ мкс). Можно заключить, что результаты аналитического расчета АВП импульсного тока $i_{PA}(t)$ в разрядной цепи мощного ЕНЭ испытательной электроустановки с исследуемыми резисторами в пределах приемлемой для нас точности (с расхождением не более чем на 8 %) согласуются с данными численного моделирования с помощью программы EWB 5.12 соответствующих электромагнитных процессов в резисторах типа ТВО-60-24 Ом.

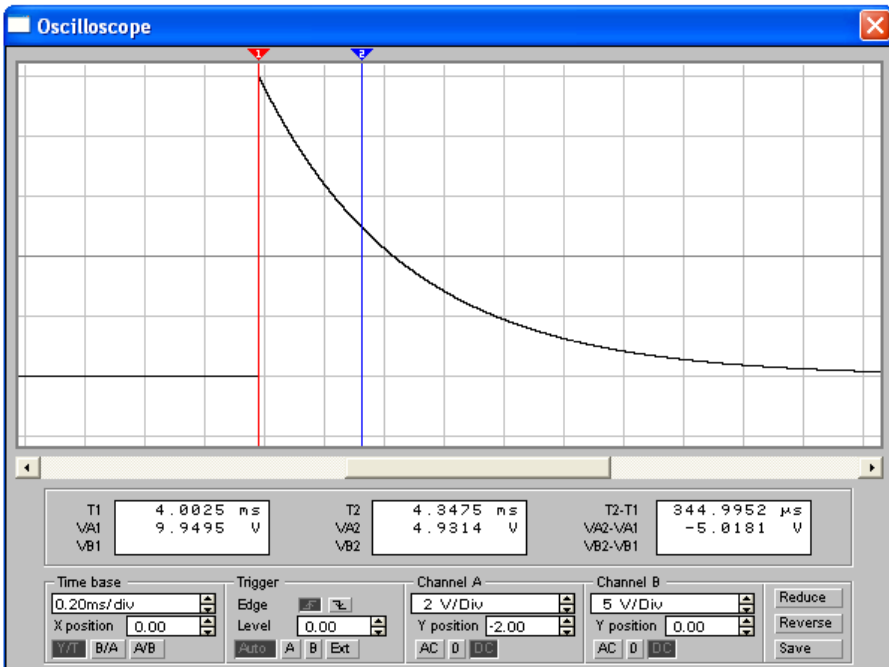


Рисунок 2 – Осциллограмма спадающей части аperiodического импульса разрядного тока $i_{PA}(t)$, воздействующего на керамический резистор типа ТВО-60-24 Ом

Полученные в разделе 4 с помощью программы EWB 5.12 данные для АВП разрядного тока $i_{PA}(t)$ позволяют уточнить численные значения выделенной импульсной тепловой энергии W_P и пиковой P_{III} или усредненной P_{PC} импульсной мощности рассеяния в резисторах типа ТВО-60-24 Ом. Так, при прохождении по исследуемому резистору одиночного аperiodического импульса разрядного тока временной формы 19,5 нс/345 мкс с амплитудой $I_{mA} = 1,041 \cdot 10^3$ А выделенная в нем импульсная тепловая энергия W_P согласно (2) и (3) составит примерно численное значение, равное 5,9 кДж ($\alpha_1 = 2,203 \cdot 10^3$ с⁻¹; $\alpha_2 = 1,20 \cdot 10^8$ с⁻¹; $\beta_A = 1,0$). Тогда пиковая P_{III} (усредненная P_{PC}) импульсная мощность рассеяния для резистора типа ТВО-60-24 Ом

будет равна $P_{III} = W_p/\tau_{II} = 17,10$ МВт. Видно, что расхождение между указанными выше результатами аналитического и численного расчетов для резистора ТВО-60-24 Ом по выделенной в нем импульсной тепловой энергии W_p не превышает 8 %, а по пиковой импульсной мощности рассеяния P_{III} данные соответствующих расчетов практически совпадают.

5. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАССЕЙВАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕЗИСТОРА ТИПА ТВО-60-24 Ом

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема мощной высоковольтной испытательной электроустановки, предназначенной для исследования предельных характеристик по рассеиваемой импульсной мощности керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом. На рис. 3 приняты следующие обозначения: $C_T = 1,28 \cdot 10^{-6}$ Ф – электрическая емкость одного высоковольтного конденсатора типа КБКГИ-125/1,28 (при общей емкости ЕНЭ $C_{TC} = 2,56$ мкФ) [4,9]; $L_T = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн – общая индуктивность разрядной цепи электроустановки; K_T – высоковольтный многозазорный искровой сильноточный коммутатор типа МЗК-200 [2,10]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения на +100 кВ [2,11]; $U_3 = U_0$ – зарядное напряжение положительной (отрицательной) полярности на общей емкости C_{TC} мощного ЕНЭ электроустановки, набранной из цепочек конденсаторов C_T типа КБКГИ-125/1,28, имеющих номинальное напряжение 125 кВ и емкость 1,28 мкФ; $R_H = N \cdot R_p$ – общее активное сопротивление испытываемых резисторов типа ТВО-60-24 Ом в разрядной цепи электроустановки ($R_p = 24$ Ом), значительно превышающее собственное активное сопротивление других электрических элементов разрядной цепи высоковольтной испытательной электроустановки, размещенной на воздухе в высоковольтном зале лабораторного корпуса НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»; N – число последовательно включенных в разрядную цепь электроустановки резисторов типа ТВО-60-24 Ом.

При экспериментальном определении на открытом воздухе при $\theta_0 = 20$ °С электротермической стойкости резисторов типа ТВО-60-24 Ом нами были проведены три серии опытов по их тепловому нагружению в разрядной цепи высоковольтной испытательной электроустановки, приведенной на рис. 3. **Первая серия** экспериментов: $R_p = 24$ Ом; $N = 8$; $R_H = 192$ Ом; $C_{TC} = 2,56$ мкФ; $U_0 = 200$ кВ; $W_T = 51,2$ кДж; $T_C = 75$ с. При $W_p = W_T/8 = 6,4$ кДж и $\tau_{II} = 373,6$ мкс эта серия опытов для каждого из исследуемых резисторов характеризовалась примерно пиковой импульсной мощностью рассеяния $P_{III} = W_p/\tau_{II} = 17,13$ МВт и усредненной импульсной мощностью рассеяния $P_{PC} = W_p/T_C = 85,3$ Вт. Собранный цепочка из восьми резисторов типа ТВО-60-24 Ом выдержала всего пять разрядов ($n_p = 5$) мощного ЕНЭ электроустановки. На шестом разряде произошло тепломеханическое разрушение одно-

го из резисторов. **Вторая серия** экспериментов: $R_p = 24$ Ом; $N = 5$; $R_H = 120$ Ом; $U_0 = 150$ кВ; $W_G = 28,8$ кДж; $W_p = 5,76$ кДж; $\tau_H = 233,5$ мкс; $T_C = 95$ с. Для данной серии опытов характерными были следующие показатели импульсной мощности рассеяния: $P_{\text{III}} = 24,67$ МВт и $P_{PC} = 60,6$ Вт. Цепочка из пяти рассматриваемых резисторов при заданной скважности токовых импульсов выдержала воздействие 39 разрядов мощного ЕНЭ электроустановки. На 40 его разряде наступило тепломеханическое разрушение одного из резисторов. **Третья серия** экспериментов: $R_p = 24$ Ом; $N = 5$; $R_H = 120$ Ом; $U_0 = 200$ кВ; $W_G = 51,2$ кДж; $W_p = 10,24$ кДж; $\tau_H = 233,5$ мкс; $T_C = 170$ с. Эта серия опытов характеризовалась такими показателями импульсной мощности рассеяния: $P_{\text{III}} = 43,86$ МВт и $P_{PC} = 60,2$ Вт. Исследуемая цепочка из резисторов типа ТВО-60-24 Ом выдержала лишь один разряд мощного ЕНЭ испытательной электроустановки. На втором электрическом разряде использованного нами в опытах ЕНЭ электроустановки произошло электротепловое (тепломеханическое) разрушение всех пяти испытываемых резисторов. На рис. 4 приведены результаты такого разрушения одного из исследуемых резисторов.

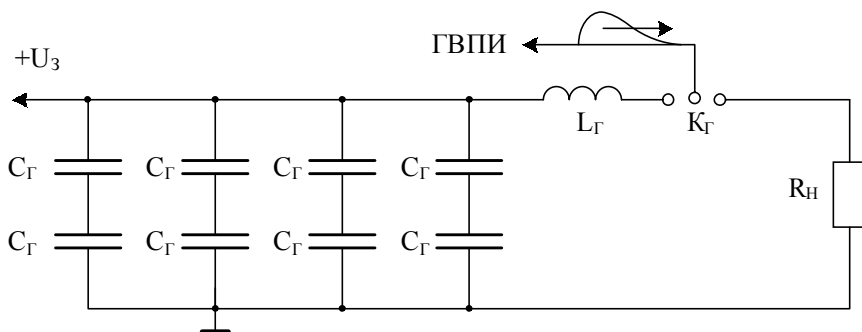


Рисунок 3 – Электрическая схема мощной высоковольтной испытательной электроустановки для исследования резисторов типа ТВО-60-24 Ом на рассеиваемую импульсную мощность и энергию

Из анализа полученных в разделе 5 экспериментальных данных следует, что для высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом критическими характеристиками по тепловому рассеиванию импульсного тока являются: во-первых, пиковая импульсная мощность рассеяния P_{III} и, во-вторых, сама рассеиваемая импульсная тепловая энергия W_p , приходящиеся на один резистор. Причем, такая характеристика как W_p является определяющей для их электротермической стойкости. Ее значения оказались обратно пропорциональны числу электрических токовых разрядов n_p мощного ЕНЭ высоковольтной испытательной электроустановки, прошедших через резистор и не разрушивших его, то есть $n_p \sim 1/W_p$. Ус-

редненная импульсная мощность рассеяния P_{PC} не может служить одним из критериев электротермической стойкости рассматриваемых резисторов. Во всех проведенных экспериментах ее численные значения были весьма близки к величине номинальной постоянной мощности рассеяния $P_{PP} = 60$ Вт для этих резисторов, а резисторы типа ТВО-60-24 Ом выходили из-за периодически воздействующей на них электротепловой нагрузки из строя.



Рисунок 4 – Общий вид высоковольтного керамического объемного постоянного резистора типа ТВО-60-24 Ом, разрушенного на открытом воздухе при $\theta_0 = 20$ °С предельной импульсной электротепловой нагрузкой

Выполненные исследования и накопленный в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» опыт эксплуатации высоковольтного электрофизического сильноточного оборудования, содержащего керамические объемные постоянные резисторы типа ТВО-60-24 Ом, позволяют заключить, что для этого класса резисторов критическое значение рассеиваемой за один разряд мощного ЕНЭ высоковольтной испытательной электроустановки импульсной тепловой энергии $W_p = W_T/N$, приводящее со временем в серии воздействующих на них токовых импульсов нано- и микросекундного временного диапазонов к их преждевременному выходу из строя по причине тепломеханического разрушения, составляет в первом приближении для одного резистора порядка 5 кДж. На основании этих данных для резистора типа ТВО-60-24 Ом уровень длительно допустимой рассеиваемой за однократное токовое воздействие импульсной тепловой энергии W_p может составлять примерно порядка 3 кДж. В этом случае пиковая импульсная мощность рассеяния P_{PII} для резистора типа ТВО-60-24 Ом принимает численное значение порядка 20 МВт.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальным путем показано, что при нагреве высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом в рабочем для области ВИТ диапазоне температур θ_c от 20 до 160 °С их актив-

ное сопротивление R_p уменьшается не более чем на 5 % от своего номинального значения. В этой связи значения R_p для резисторов типа ТВО-60-24 Ом можно считать практически неизменными в процессе их работы в высоковольтных электрических схемах, применяемых в области ВИТ.

2. Предложены методики аналитического и численного (на основе программы EWB 5.12) расчетов электромагнитных и электротепловых процессов, а также выделяемой в резисторах типа ТВО-60-24 Ом, испытывающих воздействие аperiodического импульса разрядного тока $i_{pA}(t)$ мощного ЕНЭ высоковольтной электроустановки, импульсной тепловой энергии W_p , пиковой импульсной мощности рассеяния $P_{ПИ}$ и усредненной импульсной мощности рассеяния $P_{РС}$.

3. Основными критическими характеристиками по тепловому рассеянию в импульсном режиме джоулевой энергии в резисторах типа ТВО-60-24 Ом являются пиковая импульсная мощность рассеяния $P_{ПИ}$ и рассеиваемая импульсная тепловая энергия W_p . Из этих двух характеристик наиболее критическим показателем является величина импульсной тепловой энергии W_p , однократно выделяемой в рассматриваемом резисторе.

4. На основании выполненных расчетов, проведенных экспериментов и накопленного опыта эксплуатации в области ВИТ исследуемых резисторов установлено, что для резистора типа ТВО-60-24 Ом с импульсным аperiodическим током нано- и микросекундного временного диапазонов критическое значение однократно рассеиваемой импульсной тепловой энергии W_p составляет порядка 5 кДж. Для данного резистора с номинальной постоянной мощностью рассеяния $P_{ПР} = 60$ Вт длительно допустимая рассеиваемая им при однократном разряде на него мощного ЕНЭ импульсная тепловая энергия W_p принимает численное значение порядка 3 кДж, а пиковая импульсная мощность рассеяния $P_{ПИ}$ при этом может составлять около 20 МВт.

Список литературы: 1. *Техника* больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 2. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П., Мельников П.Н. Комплекс электрофизического оборудования для генерирования микро – и миллисекундных импульсов напряжения до 1,2 МВ и тока до 200 кА // *Технічна електродинаміка*. – 2003. – №5. – С. 55-59. 3. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. Комплекс высоковольтного электрофизического оборудования для испытания средств молниезащиты технических объектов грозowymi и коммутационными импульсами напряжения микро- и миллисекундной длительности амплитудой до 1 МВ // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 4. – С. 60-65. 4. Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 2. – С. 75-80. 5. ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1976. – 20 с. 6. Баранов М.И. Сравнение двух моделей для электротепловых расчетов цилиндрических проводников при воздействии на них больших импульсных токов // *Технічна електродинаміка*. – 1999. – № 3. – С. 14-19. 7. Баранов М.И., Носенко М.А. Применение программы EWB для численного расчета электромагнитных процессов в разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // *Вісник Національного технічного університету «Харківськ*

кий політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 49. – С. 71–84. **8.** Межгосударственный ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с. **9.** Рудаков В.В., Бойко Н.И., Беспалов В.Д., Кравченко В.П. и др. Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 7, т. 1. – С. 47-58. **10.** Пекарь И.Р., Бочаров В.А., Штагер П.И. и др. Многозачерные коммутаторы на 100 и 200 кВ (МЗК-100, МЗК-200) // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – № 2. – С. 234. **11.** Баранов М.И. Сравнительный анализ работы двух схем построения генераторов высоковольтных поджигающих импульсов напряжения мощных электрофизических установок // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 37. – С. 100-106.

Поступила в редколлегию 04.06.2007.

УДК 519.688

В.С.БРЕСЛАВЕЦ, канд.техн.наук; **С.А.НИКИТИН**; НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

У статті розглянуті основні методи ідентифікації збоїв програмного забезпечення, які можуть викликати системні ризики. Запропонована технологія аналізу системних ризиків, сформульовані основні вимоги для розробки програмного забезпечення, яке задовольняє критеріям максимального захисту від системних ризиків.

The basic methods for identification of software failures that can provoke system risks are discussed. A technique is proposed for analyses of system risks and a set of basic criteria is formulated to ensure system risk safe software development.

Введение. Существует несколько методов анализа рисков, связанных с функционированием программного обеспечения. Анализ рисков – это техника, предназначенная для обнаружения и обработки рисков, производимых системой с учетом ее оборудования, например неблагоприятные события, исходящие от других систем или интерфейсов системы, и затем изменяющая рекомендации по уменьшению опасности или преобразование ее риска к «приемлемому уровню». Традиционно такой анализ не включал в себя анализ программного обеспечения. Анализ рисков фокусируется на роли программного обеспечения относительно рисков вообще. Это пошаговая техника, которая может быть использована на любой стадии жизненного цикла.