

**М.И. БАРАНОВ**, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **НОВАЯ РЕЗИСТИВНАЯ СХЕМА ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

Приведены результаты оценки основных параметров предложенной резистивной схемы защиты высоковольтных конденсаторов мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков. Показано, что такая схема защиты ЕНЭ не только в десятки раз ограничивает ток короткого замыкания через его конденсаторы в аварийном режиме работы ЕНЭ, но и предотвращает взрывообразное разрушение его защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60.

**Ключевые слова:** мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный импульсный конденсатор; высоковольтный защитный резистор; аварийный сверхток.

**Введение.** В [1] была рассмотрена резистивная схема защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных одномодульных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), используемых как для научных (например, в экспериментальной физике и сильноточной электронике [2]), так и электро-технологических целей (например, в силовой электроимпульсной обработке материалов и технике больших импульсных токов [3,4]). Одним из недостатков резистивной схемы защиты конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощных одномодульных ЕНЭ согласно [1] является возможность высокоскоростного разрушения (взрыва) установленных на высоковольтных выводах конденсаторов ее графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 в аварийном режиме работы ЕНЭ. Такой режим работы мощного ЕНЭ может быть вызван электрическим пробоем внешней (внутренней) изоляции его конденсаторов и протеканием через них тока короткого замыкания, амплитуда которого может достигать сотен килоампер. Как правило, подобный пробой конденсаторов мощного ЕНЭ наблюдается в основном на стадии их относительно длительного заряда (при его продолжительности от десятков секунд до нескольких минут), когда напряженности электрического поля в их диэлектрике составляют около 100 кВ/мм [1,5]. В этой связи при практическом использовании высоковольтной сильноточной импульсной техники, базирующейся на ЕНЭ, возможны случаи, когда выделяющаяся за сотни микросекунд (практически мгновенно) на защитном резисторе типа ТВО-60 в аварийном режиме работы мощного ЕНЭ тепловая энергия  $W_p$  будет значительно превышать значение максимальной (критической) тепловой энергии  $W_k$ , многократно рассеиваемой подобным резистором от действия на него импульса тока микросекундного временного диапазона и численно состав-

© М.И. Баранов, 2015

ляющей для такого резистора при скважности импульсов тока в 100 с и более около 2,5 кДж [1,6]. Из опыта эксплуатации мощных ЕНЭ известно, что взрывообразное разрушение при этом на воздухе защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 может приводить к негативным последствиям как для элементов конструкции ЕНЭ, так и обслуживающего его персонала. Поэтому вопросы дальнейшего усовершенствования резистивной схемы защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ остаются актуальными задачами.

**1 Постановка задачи и выбор защитной схемы.** Рассмотрим зарядно-разрядную цепь мощного многомодульного ЕНЭ, содержащего параллельно включенные высоковольтные конденсаторы емкостью  $C$ , образующие  $m$  модулей, в каждом из которых размещено  $n$  данных конденсаторов (рис. 1). При этом  $U_3 = U_0 \leq \pm 50$  кВ – зарядное напряжение параллельно включенных в каждом модуле  $n$  числа конденсаторов емкостью  $C$ ;  $R_3$  – защитное сопротивление, собранное из  $k$  числа параллельно соединенных графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом  $R_{03}$ ;  $R_p$  – междумодульное (развязывающее) сопротивление, выполненное из высоковольтных графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом  $R_{0p}$ ;  $P_1, \dots, P_m$  – короткозамыкатели разрядных цепей отдельных модулей ЕНЭ;  $F$  – общий высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор ЕНЭ [11]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов на напряжение  $\pm 100$  кВ [11];  $C_p$  – высоковольтный разделительный конденсатор (емкостью 180 пФ на напряжение  $\pm 120$  кВ) [11];  $R_H, L_H$  – активное сопротивление и индуктивность электрической нагрузки.

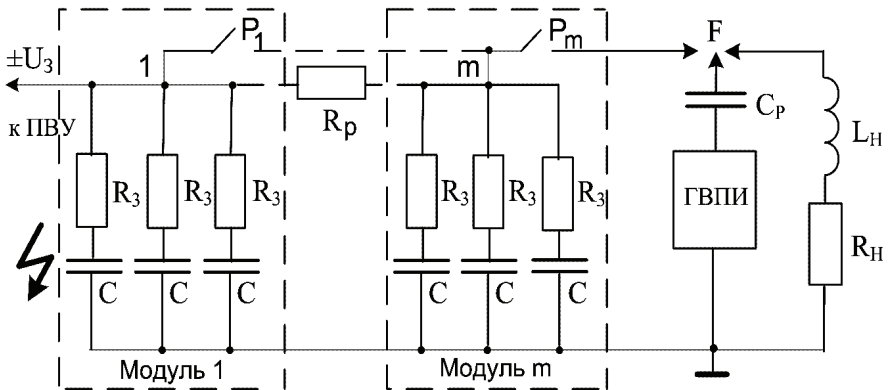


Рисунок 1 – Электрическая схема мощного ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме его работы, вызванном пробоем изоляции одного из конденсаторов накопителя на рабочее напряжение  $U_0$

Считаем, что в многомодульном мощном ЕНЭ конденсаторы емкостью  $C$  при номинальной энергоемкости  $W_0$  каждого из них содержат резистивную защиту от аварийных сверхтоков, построенную на основе защитных сопротивлений  $R_3$ . Пусть защитные сопротивления  $R_3$  выполнены на основе высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 и установлены на выводах конденсаторов ЕНЭ [1,6,7]. Принимаем, что каждое защитное сопротивление  $R_3$  собрано из  $k$  числа параллельно соединенных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом  $R_{03}$ , а суммарное активное сопротивление низкоомной (высокоомной) сильноточной разрядной цепи мощного ЕНЭ с учетом влияния защитных сопротивлений  $R_3$  оказывается равным  $R_C$ . Полагаем, что рассматриваемый ЕНЭ при общей номинальной энергоемкости  $W_{mn}$  состоит из  $m$  модулей с номинальной запасаемой энергией  $W_m$ , а каждый модуль содержит  $n$  число параллельно включенных конденсаторов с номинальной запасаемой энергией  $W_0$ . Пусть в режиме заряда от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ) конденсаторов модули ЕНЭ между собой соединены междумодульными активными сопротивлениями  $R_p \gg R_3$ , выполненными также из высоковольтных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом  $R_{0p}$ . Для предотвращения влияния междумодульных сопротивлений  $R_p$  на амплитудно-временные параметры (АВП) формируемых на активно-индуктивной нагрузке при разряде конденсаторов отдельных модулей ЕНЭ импульсов тока в разрядных цепях его модулей применим короткозамыкатели  $P_1, \dots, P_m$  с электроприводом, подключающие в разрядном режиме согласно рис. 1 данные модули к общему управляемому коммутатору  $F$  ЕНЭ. Требуется применительно к предлагаемой резистивной схеме защиты высоковольтных конденсаторов ЕНЭ от аварийных сверхтоков разработать инженерно-технический подход по приближенному выбору величины сопротивлений  $R_3$ , числа  $n$  защитных сопротивлений  $R_3$ , выполненных из графито-керамических резисторов типа ТВО-60 (соответственно и числа параллельно включенных конденсаторов в каждом  $m$ -ом модуле ЕНЭ), а также числа  $m$  параллельно работающих модулей ЕНЭ с суммарной энергоемкостью  $W_{mn}$  его конденсаторной батареи на общую  $RL$ -нагрузку без электротеплового разрушения (взрыва) в аварийном режиме на стадии заряда от ПВУ ее конденсаторов используемых в ней защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60.

**2 Приближенный расчет величины защитного сопротивления  $R_3$  в модуле ЕНЭ.** В аварийном режиме работы мощного ЕНЭ модульной конструкции с резистивной защитой его высоковольтных импульсных конденсаторов от аварийного сверхтока, вызванного пробоем изоляции одного из конденсаторов ЕНЭ на стадии заряда от ПВУ их электрических емкостей  $C$  и достигающего в слабозатухающем колебательном режиме амплитуд в сотни килоампер [1], для аварийной сильноточной цепи поврежденного модуля ЕНЭ будет всегда выполняться неравенство, характерное для аperiodического

го режима разряда его неповрежденных конденсаторов [8,9]:  $R_3 > 2[L_p/(n-1)C]^{1/2}$ , где  $L_p$  – собственная индуктивность модуля ЕНЭ. Поэтому величина защитного сопротивления  $R_3$  может быть найдена из следующего соотношения:

$$R_3 \approx U_3 / I_{mp}, \quad (1)$$

где  $U_3$  – зарядное напряжение конденсаторов в модулях ЕНЭ;  $I_{mp}$  – амплитуда максимально допустимого для конденсаторов ЕНЭ аварийного тока.

Известно, что для наиболее характерных типов силовых импульсных конденсаторов (например, ИК-50-3 и ИМ2-5-140), используемых в схемах мощных ЕНЭ при формировании больших импульсных токов, величины их зарядного напряжения  $U_3$  изменяются в диапазоне  $\pm 5 \text{ кВ} \leq U_3 \leq \pm 50 \text{ кВ}$ , а величины максимально допустимых амплитуд  $I_{mp}$  их разрядного тока – в диапазоне  $\pm 2,5 \text{ кА} \leq I_{mp} \leq \pm 50 \text{ кА}$  [10]. Тогда из (1) для характерного применительно к рассматриваемой высоковольтной проблематике электрофизического случая ( $U_3 = \pm 50 \text{ кВ}$ ;  $I_{mp} = \pm 10 \text{ кА}$  [1,9]) следует, что значение защитного сопротивления  $R_3$ , устанавливаемого на высоковольтный вывод каждого из конденсаторов  $m$ -го модуля мощного ЕНЭ, должно численно составлять около 5 Ом.

Для известного типа высоковольтных импульсных конденсаторов с заданными величинами  $U_3$  и  $I_{mp}$ , применяемых в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ, и определенного по (1) защитного сопротивления  $R_3$  для числа  $k$  параллельно соединенных на каждом высоковольтном выводе используемых конденсаторов графито-керамических резисторов типа ТВО-60 находим:

$$k \approx R_{03}/R_3. \quad (2)$$

Из (2) при  $R_3 \approx 5 \text{ Ом}$  и широко применяемом на практике номинале  $R_{03}$  защитного высоковольтного резистора типа ТВО-60-24 Ом [7] получаем, что численное значение числа  $k$  будет находиться в диапазоне  $4 \leq k \leq 5$ . Из опыта разработки и создания в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в последние годы мощных одномодульных ЕНЭ на основе высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 следует, что наиболее технологичным вариантом при практической реализации резистивной защиты их силовых импульсных конденсаторов от аварийных свертков является тот, при котором  $k \approx 4$  [11].

**3 Приближенный расчет числа защитных сопротивлений  $R_3$  в модуле ЕНЭ.** Результаты проведенных ранее в нашем институте экспериментальных исследований показали, что при нагреве в термическом шкафу графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом в диапазоне температур от 20 до 160 °С их номинальное активное сопротивление  $R_{03} = 24 \text{ Ом}$  изменяется не более чем на 5 % [6]. Причем, эти изменения имели знак «минус», что свидетельствует о незначительном уменьшении номинального активного сопротивления  $R_{03}$  этих резисторов при их нагреве в указанном температурном диапазоне. В связи с этим для тепловой энергии  $W_p$ , выделяющейся в защит-

ном сопротивлении  $R_3$  при аварийном режиме работы мощного ЕНЭ много-модульного исполнения, можно записать такое приближенное соотношение:

$$W_p \approx R_3 \int_0^{\tau_p} i_p^2(t) dt, \quad (3)$$

где  $i_p(t)$  – аperiodический разрядный ток длительностью  $\tau_p$  на уровне  $0,5 \cdot I_{mp}$ , проходящий в аварийном случае через графито-керамические резисторы типа ТВО-60  $m$ -го модуля рассматриваемого мощного ЕНЭ.

Расчетно-экспериментальные данные, приведенные в [1,6,12], указывают на то, что аperiodический импульс разрядного тока  $i_p(t)$  в аварийном режиме работы рассматриваемого мощного ЕНЭ (при пробое одного из его конденсаторов) с резистивной защитой конденсаторов при  $U_3 \leq \pm 50$  кВ достигает амплитудных значений до  $\pm 10$  кА, обычно имеет короткий микросекундный фронт и длинный миллисекундный спад. Такие АВП аварийного импульса тока  $i_p(t)$  с заданной амплитудой  $I_{mp}$  в защитном сопротивлении  $R_3$  позволяют с учетом упрощения (3) представить выражение для баланса тепловой энергии в графито-керамических резисторах типа ТВО-60, входящих в состав одного защитного сопротивления  $R_3$   $m$ -го модуля ЕНЭ, в следующем виде:

$$R_3 I_{mp}^2 \tau_p / 4 \approx k W_k, \quad (4)$$

где  $\tau_p \approx 0,7 \cdot R_3 (n-1)C$  – длительность аварийного разрядного тока, протекающего через защитные резисторы типа ТВО-60 в схеме согласно рис. 1.

С учетом (2) после преобразований в (4) для числа  $n$  защитных сопротивлений  $R_3 \approx R_{03}/k$  и соответственно числа конденсаторов емкостью  $C$  в каждом высоковольтном  $m$ -модуле ЕНЭ получаем следующее соотношение:

$$n \approx 6 k^3 W_k / (R_{03}^2 I_{mp}^2 C) + 1. \quad (5)$$

Видно, что полученное соотношение (5) при выбранных для каждого модуля мощного ЕНЭ численных значениях таких его параметров как емкости  $C$  конденсатора, амплитуды  $I_{mp}$  допустимого аварийного тока, номинала  $R_{03}$  защитного резистора типа ТВО-60, критического значения  $W_k$  рассеиваемой тепловой энергии одним защитным резистором типа ТВО-60 и числа  $k$  параллельно соединенных в одном защитном сопротивлении  $R_3$  резисторов типа ТВО-60 определяет то максимальное число  $n$  параллельно включенных высоковольтных конденсаторов емкостью  $C$ , которое по условиям электротепловой стойкости защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 может находиться в одном из  $m$ -ом модуле рассматриваемого нами ЕНЭ. Из (5) при использовании в мощном ЕНЭ импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 ( $U_3 = U_0 = \pm 50$  кВ;  $C = 3$  мкФ),  $R_{03} = 24$  Ом,  $I_{mp} = \pm 10$  кА,  $k = 4$  и  $W_k = 2,5$  кДж находим, что число  $n$  защитных сопротивлений  $R_3$  и соответственно максимальное количество параллельно включенных силовых конденсаторов в каждом  $m$ -ом модуле ЕНЭ принимает значение, равное примерно 7.

**4 Приближенный расчет числа модулей в ЕНЭ с резистивной защитой.** При заданных величинах энергоемкостей всех модулей ЕНЭ  $W_{mn}$  и каждого конденсатора ЕНЭ  $W_0$  для числа  $m$  высоковольтных модулей в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ с резистивной защитой его конденсаторов от аварийного сверхтока можно записать следующее расчетное соотношение:

$$m \approx W_{mn} / (n W_0). \quad (6)$$

Из (6) с учетом (5) и указанных исходных данных ( $C = 3$  мкФ;  $R_{03} = 24$  Ом;  $I_{mp} = \pm 10$  кА;  $k = 4$ ;  $W_k = 2,5$  кДж) следует, что применительно к мощному ЕНЭ ( $W_{mn} \approx 420$  кДж) с резистивной защитой от аварийного сверхтока, содержащему импульсные конденсаторы типа ИК-50-3 ( $W_0 = 3,75$  кДж [10]) и предназначенному для получения импульса тока искусственной линейной молнии [11], при  $n \approx 7$  следует, что  $m \approx 16$ . Кольцевое соединение подобного числа модулей ЕНЭ между собой с их дальнейшим параллельным подключением согласно рис. 1 к общему коммутатору  $F$  и общей  $RL$ -нагрузке, размещенной в центральной части «кольца» модулей ЕНЭ, позволяет обеспечить достижение минимальных значений индуктивности цепи разряда модулей ЕНЭ.

#### **5 Приближенный выбор междумодульного сопротивления $R_p$ в ЕНЭ.**

При выборе параметров междумодульных высоковольтных сопротивлений  $R_p$  в составе мощного ЕНЭ с резистивной защитой его конденсаторов от аварийного сверхтока требуется исключать возможность разряда конденсаторов числом  $(m - 1)n$  неповрежденных модулей ЕНЭ на аварийный модуль с пробитым конденсатором. При этом междумодульные сопротивления  $R_p$  должны обеспечивать от ПВУ с собственным зарядным резистором через защитные сопротивления  $R_3$  практически равномерный заряд параллельно включенных конденсаторов всех модулей мощного ЕНЭ до зарядного напряжения  $U_3$ . С учетом указанных требований предлагается в многомодульном мощном ЕНЭ значение активного сопротивления всех междумодульных сопротивлений  $R_p$ , изготавливаемых на основе графито-керамических резисторов типа ТВО-60, определять из следующего приближенного соотношения:

$$R_p \approx 10 R_3. \quad (7)$$

Из (7) при ранее найденном в разделе 2 для мощного многомодульного ЕНЭ значении активного сопротивления высоковольтного защитного сопротивления  $R_3 \approx 5$  Ом получаем, что активное сопротивление междумодульного сопротивления должно составлять примерно  $R_p \approx 50$  Ом. Этому значению  $R_p$  соответствует графито-керамический резистор типа ТВО-60-51 Ом, рассчитанный на длительное воздействие постоянного рабочего напряжения до  $\pm 25$  кВ и рассеиваемую тепловую мощность по постоянному току до 60 Вт [6,7].

**6 Приближенная оценка правильности выбора параметров резистивной защиты ЕНЭ.** Оценивать правильность проведенного выбора основных параметров резистивной схемы защиты конденсаторов мощного ЕНЭ

от аварийного сверхтока на основе приведенных выше расчетных соотношений (1)–(7) предлагается по следующим двум инженерным критериям.

• *Энергетический критерий.* Этот критерий для  $m$ -го модуля мощного ЕНЭ, в котором может наступить пробой изоляции одного из его высоковольтных импульсных конденсаторов, можно записать в следующем виде:

$$W_0(n-1)/(kn) \leq W_k. \quad (8)$$

• *Резистивный критерий.* Данный критерий, учитывающий сравнение реального и требуемого по разработанной конструкторской документации значений активного сопротивления в сильноточной (особенно низкоомной) разрядной цепи ЕНЭ, можно сформулировать в таком приближенном виде:

$$R_{03}/(kmn) \leq R_C. \quad (9)$$

При не выполнении критериев (8) и (9) разработчику высоковольтной импульсной техники, к которой в полной мере относятся мощные ЕНЭ, необходимо, прежде всего, по расчетным соотношениям (2), (5) и (6) уточнить выбор соответственно параметров  $k$ ,  $n$  и  $m$ . Затем с учетом соответствующего уточнения снова вернуться к указанным критериям (8) и (9) для окончательной оценки достоверности выбора количественных характеристик резистивной схемы защиты ЕНЭ, приведенной на рис. 1. При этом надо помнить то одно обстоятельство, что основным параметром в используемой нами схеме резистивной защиты ЕНЭ от аварийного сверхтока, подлежащим определенной первоочередной коррекции, будет являться номинал  $R_{03}$  защитного графито-керамического резистора типа ТВО-60, определяющий по (2) численное значение параметра  $k$  и далее соответственно по (5) и (6) –  $n$  и  $m$ .

**Выводы.** Предложена новая резистивная схема защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков, возникающих в отдельных модулях ЕНЭ при внутреннем (внешнем) пробое изоляции их конденсаторов. Разработан инженерно-технический подход по приближенному выбору основных параметров данной защитной схемы, обеспечивающей как существенное ограничение (в десятки раз) амплитуды аварийного сверхтока, протекающего через поврежденный конденсатор, так и исключающей взрывообразное разрушение на стадии заряда конденсаторов отдельных модулей ЕНЭ защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, установленных на каждом высоковольтном выводе используемых в ЕНЭ силовых импульсных конденсаторов.

**Список литературы:** 1. *Баранов М.И.* Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 20-27. 2. *Месля Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с. 3. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 4. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. *В.С. Комелькова*. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 5. *Колушико Г.М.* Исследование и разработка систем защиты для емкостных накопителей энер-

гии. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Х.: 1981. – 218 с. **6.** Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО-60 // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2007. – № 20. – С. 45–56. **7.** ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1976. – 20 с. **8.** Нейман Л.П., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Т. 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с. **9.** Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 13–20. **10.** Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с. **11.** Баранов М.И., Колюшко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81–85. **12.** Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Т. 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Baranov M.I. Osnovnye pokazateli termomechanicheskoy zashhity vysokovol'tnykh kondensatorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej jenerгии ot avarijnyh sverhtokov. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. No 50 (1092). 20–27 Print. **2.** Mesjac G.A. Impul'snaja energetika i elektronika. Moscow: Nauka, 2004. 704 Print. **3.** Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 Print. **4.** Tehnika bol'shij impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 Print. **5.** Koliushko G.M. Issledovanie i razrabotka sistem zashhity dlja emkostnyh nakopitelej energii. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Kharkiv: 1981. 218 Print. **6.** Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Predel'nye harakteristiki po rasseivaemoj impul'snoj moshhnosti i energii vysokovol'tnykh keramicheskij ob'emnyh rezistorov tipa TVO-60. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. No 20. 45–56 Print. **7.** ГОСТ 11324-76. Rezistory postojannye ob'emnye tipa TVO. Moscow: Izd-vo Gosstandarta SSSR, 1976. 20 Print. **8.** Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 2-h t. Uchebnik dlja vuzov. Vol. 1. Leningrad: Energoizdat, 1981. 536 Print. **9.** Baranov M.I. Vybory i ustanovka zashhitnyh vysokovol'tnykh keramicheskij rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej energii. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. No 50 (1092). 13–20 Print. **10.** Berzan V.P., Gelikman B.Ju., Guraevskij M.N. i dr. Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki: Spravochnik. Pod red. G.S. Kuchinskogo. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 656 Print. **11.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturalnyh ispytanij tehniceskij ob'ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. No 3. 81–85 Print. **12.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Vol. 3: Teorija i praktika elektrofizicheskij zadach. Kharkiv: Tochka, 2014. 400 Print.

*Надійшла (received) 19.03.2015*