

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 ± 100 кВ [11]; C_p – высоковольтный разделительный конденсатор (емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ) [11]; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность электрической нагрузки.

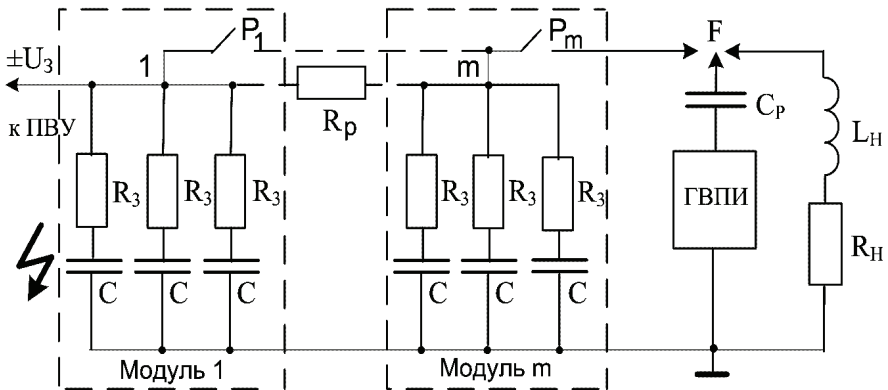


Рисунок 1 – Электрическая схема мощного ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме его работы, вызванном пробоем изоляции одного из конденсаторов накопителя на рабочее напряжение U_0

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) силовоточной 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 силовоточной 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 $i_p(t)$ – апериодический разрядный ток длительностью τ_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 апериодический 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 ± 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 ± 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 исключаяющей 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 cepjakh moshhnykh emkostnykh 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'shix 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 emkostnykh 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 keramicheskikh 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 zashhitnykh vysokovol'tnykh keramicheskikh rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjakh moshhnykh emkostnykh 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 naturalnykh ispytanij tehniceskikh ob'ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. No 3. 81–85 Print. **12.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Vol. 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach. Kharkiv: Tochka, 2014. 400 Print.

Надійшла (received) 19.03.2015