

Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 s. Print. **2.** Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 s. Print. **3.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 2, Kn. 1: Teorija jelektrofizicheskikh jeffektov i zadach. Khar'kiv: NTU «HPI», 2009.– 384 s. Print. **4.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispytanij tehnicheskikh ob#ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. №3. S.81–85. Print. **5.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika jelektrofizicheskikh zadach. Khar'kiv: «Tochka», 2014. 400 s. Print. **6.** GOST 11324-76. Rezistory postojannye ob#emnye tipa TVO. Moscow: Izd-vo Gosstandarta SSSR, 1976. 20 s. Print. **7.** Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Predel'nye harakteristiki po rassei-vaemoj impul'snoj moshhnosti i jenerгии vysokovol'tnyh keramicheskikh ob#emnyh rezistorov tipa TVO-60. Visnik NTU «HPI». Zbimik naukovih prac'. Serija: «Tehni-ka ta jelektrofizika visokih naprug». Khar'kiv: NTU «HPI», 2007. № 20. S.45–56. Print. **8.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. Jeksperimental'noe opredelenie aktivnogo soprotivlenija i jelektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v razrjadnoj cepi generatora impul'snoj komponenty toka iskusstvennoj molnii. Elektrotehnika i elektromehanika. 2011. №3. S.51–55. Print. **9.** Baranov M.I., Kravchenko V.I. Jelektrotermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhajushhemu dejstvuju impul'snogo toka molnii. Jelektritchestvo. 2013. №10. S.7–15. Print.

Поступила (received) 01.09.2014

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

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

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЗАРЯДНО–РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ОТ АВАРИЙНЫХ СВЕРХТОКОВ

Приведены результаты расчетной оценки ограничений установленными в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) защитными высоковольтными керамическими резисторами амплитуд аварийного сверхтока, давления и температуры в локальной зоне внутреннего электрического пробоя маслонеполненного высоковольтного импульсного конденсатора указанных цепей ЕНЭ и развития в его жидком диэлектрике сильноточного плазменного канала искрового разряда.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный конденсатор; защитный резистор; оценка ограничений тока, давления и температуры.

Введение. Практика эксплуатации мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), зарядно-разрядные цепи которых содержат высоковольтные импульсные конденсаторы с металлическими или изоляционными корпусами, указывает на необходимость выполнения термомеханической защиты конденсаторов ЕНЭ от аварийных сверхтоков (токов короткого замыкания

© М.И. Баранов, 2014

при электрическом пробое конденсаторов на стадии их заряда или разряда) [1-3]. Отсутствие подобной защиты может приводить к катастрофическим последствиям действия аварийных сверхтоков на пробитые электрическим сильноточным разрядом конденсаторы ЕНЭ: взрывному разрушению металлических (изоляционных) корпусов конденсаторов; возгоранию жидкого диэлектрика конденсаторов и окружающих поврежденные конденсаторы конструкций; травматическому поражению обслуживающего персонала и выходу из строя используемого при исследованиях дорогостоящего электрофизического оборудования из-за воздействия на них разлетающихся продуктов взрыва конденсаторов и элементов их токовой ошиновки. Одним из возможных вариантов практической реализации термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ является жесткая установка на их высоковольтных металлических выводах защитных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 [4,5]. До сих пор слабо исследованными вопросами в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) остаются те, которые связаны с особенностями рассматриваемой термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ, проливающимися свет на показатели ограничения ею (этой защитой) аварийного сверхтока, гидродинамического давления и температуры в зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтных маслонаполненных конденсаторов мощных ЕНЭ и соответственно на показатели термомеханической стойкости указанных конденсаторов. Поэтому данные вопросы термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ остаются актуальными прикладными научно-техническими задачами в области ВИТ.

1. Постановка задачи электрофизического исследования. Рассмотрим зарядно-разрядную цепь мощного ЕНЭ, содержащего параллельно включенные высоковольтные импульсные конденсаторы C в количестве m_C шт. (рис. 1).

Считаем, что в качестве защитных резисторов в рассматриваемой зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ используются высоковольтные керамические резисторы типа ТВО-60 [4,5]. Пусть данные резисторы номиналом R_0 установлены на высоковольтных выводах защищаемых от аварийных сверхтоков маслонаполненных импульсных конденсаторов электрической емкостью C . Причем, при числе n_P параллельно включенных защитных резисторов на каждом высоковольтном выводе конденсатора защитное сопротивление R_3 согласно схеме на рис. 1 будет определяться выражением R_0/n_P . Принимаем, что при заряде до напряжения $U_3 = U_0 \leq 50$ кВ или разряде заряженных высоковольтных конденсаторов емкостью C общим числом m_C мощного ЕНЭ возможно наступление его аварийного режима работы, обусловленного к примеру внутренним электрическим пробоем секций одного из конденсаторов рассматриваемого нами ЕНЭ. Требуется разработать научно-технический подход по приближенной расчетной оценке ограничения установленными в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ защитными высоко-

вольтными керамическими резисторами аварийного сверхтока (тока короткого замыкания), гидродинамического давления и температуры в локальной области электрического пробоя маслонаполненного конденсатора такого ЕНЭ.

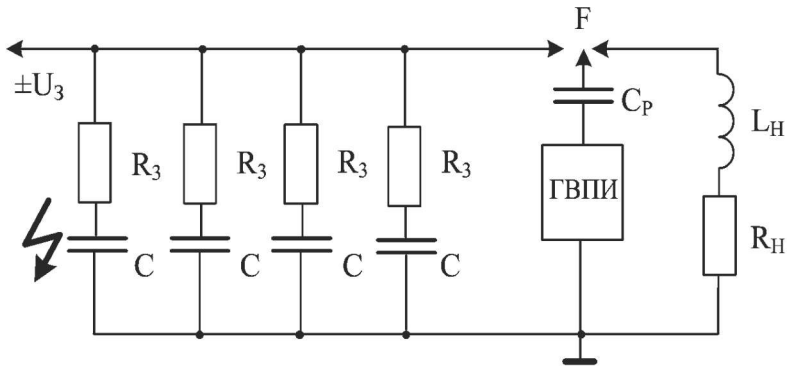


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема мощного ЕНЭ в аварийном режиме работы, вызванном электрическим пробоем одного из его высоковольтных маслонаполненных конденсаторов на напряжение U_0 ($U_3 = U_0 \leq 50$ кВ – зарядное напряжение параллельно включенных числом m_C конденсаторов емкостью C ; R_3 – защитное сопротивление, собранное из высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом R_0 ; F – управляемый высоковольтный коммутатор [5]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение ± 100 кВ [5]; C_P – высоковольтный разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ [5]; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность нагрузки)

2. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами аварийного сверхтока в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. В аварийном режиме работы мощного ЕНЭ (например, в случае пробоя одного из его заряженных конденсаторов), каждый из высоковольтных конденсаторов которого снабжен защитными резисторами с суммарным активным сопротивлением $R_3 = R_0/n_p$, для расчетной оценки амплитуды I_{mp} протекающего в апериодическом режиме ($R_0/n_p > 2[L_p/(m_C - 1)C]^{1/2}$ [6], где L_p – собственная индуктивность ошиновки ЕНЭ) через пораженный электрическим разрядом конденсатор сверхтока можно воспользоваться следующим выражением:

$$I_{mp} = U_0 [R_0/n_p(m_C - 1) + R_0/n_p]^{-1}. \quad (1)$$

Из (1) при $m_C \gg n_p$, что для мощных высоковольтных ЕНЭ выполняется практически всегда, для расчетного определения в рассматриваемом случае величины амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока получаем соотношение:

$$I_{mp} = U_0 n_p/R_0. \quad (2)$$

Так как для используемой нами схемы термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ ($U_0 \leq 50$ кВ; $m_C \gg n_p$) величина

параметра $n_p \leq 4$ шт., а номинал активного сопротивления R_0 защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 практически изменяется в диапазоне $24 \text{ Ом} \leq R_0 \leq 100 \text{ Ом}$, то из (2) следует, что при применении в мощном ЕНЭ защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 указанного номинала R_0 амплитуда I_{mp} аварийного сверхтока в случае внутреннего электрического пробоя секций одного из его конденсаторов не будет превышать численного значения 10 кА. Такая величина амплитуды I_{mp} импульсного разрядного тока для высоковольтных импульсных конденсаторов, обычно используемых в мощных ЕНЭ, с позиций их термомеханической стойкости, как известно, является безопасной для них величиной [1,7].

3. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами давления внутри пробитого конденсатора зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. Амплитуда давления P_m , возникающего внутри металлического или изоляционного корпуса пораженного внутренним сильноточным электрическим разрядом высоковольтного маслонеполненного конденсатора мощного ЕНЭ, может быть приближенно найдена из следующего выражения [5]:

$$P_m = \mu_0 I_{mp}^2 / (4\pi^2 r_m^2), \quad (3)$$

где $r_m \approx 0,024(I_{mp})^{1/3}(t_m)^{1/2}$ – максимальное значение радиуса канала сильноточного электрического разряда в жидком диэлектрике пробитого высоковольтного конденсатора ЕНЭ [8,9]; t_m – время, соответствующее амплитуде I_{mp} аварийного сверхтока, протекающего через пораженный искровым разрядом конденсатор ЕНЭ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [10].

Заметим, что при получении приближенного расчетного соотношения (3) были использованы условие несжимаемости жидкого диэлектрика (например, минерального масла) высоковольтного конденсатора ЕНЭ и следствия, вытекающие из закона Паскаля [10]. Из (3) видно, что имеющее место в используемом способе термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ согласно (2) ограничение защитными резисторами амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока обеспечивает соответственно и ограничение возникающего внутри корпуса его электрически пробитого конденсатора гидродинамического давления в рассматриваемом аварийном режиме работы ЕНЭ.

4. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами температуры внутри пробитого конденсатора зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. Максимальное значение термодинамической температуры T_m (с размерностью в градусах Кельвина) в зоне электрического пробоя секций маслонеполненного конденсатора ЕНЭ с алюминиевыми обкладками и соответственно приэлектродным падением напряжения в разрядном промежутке не более 10 В определим из следующего приближенного соотношения [5,9]:

$$T_m = 11,49 \sqrt[4]{I_{mp}^{1/3} / (\sigma_c t_m)}, \quad (4)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$ – постоянная Стефана-Больцмана [10].

Из (4) вытекает то положение, что ограничение по (2) защитными резисторами амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока в пораженном сильноточным искровым разрядом конденсаторе мощного ЕНЭ вызывает соответственно и ограничение температуры в локальной зоне его внутреннего электрического пробоя, что положительно сказывается на показателях термомеханической стойкости маслонаполненных высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ.

5. Взрывообразное разрушение защитных резисторов и прерывание аварийного сверхтока в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. В аварийном режиме работы рассматриваемого ЕНЭ на стадии заряда (чаще всего) или разряда его высоковольтных конденсаторов (например, в случае электрического пробоя внутренней изоляции одного из конденсаторов ЕНЭ) может возникать высокоскоростное разрушение защитных керамических резисторов R_3 типа ТВО-60, сопровождающееся взрывообразным разлетом раздробленных на мелкие части таких их составных элементов как наружной массивной фарфоровой оболочки и внутреннего малогабаритного графитового стержня. Подобное явление наступает тогда, когда выделяемая в защитном резисторе тепловая энергия W_p существенно превышает критическое значение W_k тепловой энергии, многократно рассеиваемой одним защитным резистором в разрядной цепи мощного ЕНЭ [4]. При этом взрывообразное разрушение защитного керамического резистора будет выполнять роль высокоскоростного размыкателя аварийной цепи, способствующего защите пробитого конденсатора от механического разрушения. Согласно [4] численное значение величины W_k для высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 составляет около 2,5 кДж. Определение значения W_p требует знания времени t_B , при котором может происходить по сути электрический взрыв защитного резистора, и амплитудно-временных параметров аварийного тока. С учетом затруднений, возникающих при нахождении параметра t_B , ограничимся определением величины W_p на участке $[0, \tau_{II}]$ протекания в зарядно-разрядной цепи генератора ГИТ-А с мощным ЕНЭ [4,5,11], предназначенным для формирования тока искусственной молнии на низкоомной активно-индуктивной нагрузке, аварийного аperiodического импульса тока длительностью τ_{II} на уровне 0,5 I_{mp} по защитному резистору типа ТВО-60-24 Ом. Расчет для данного случая ($U_0 = 50 \text{ кВ}$; $R_0 = 24 \text{ Ом}$; $n_p = 4 \text{ шт.}$; $m_c = 111 \text{ шт.}$; $I_{mp} = 8,4 \text{ кА}$; $t_m = 3,3 \text{ мкс}$; $\tau_{II} = 0,76 \text{ мс}$) величины W_p с учетом соотношений из [5] показывает, что при этом интеграл действия J_{dA} аварийного тока для указанного резистора принимает численное значение около $2,21 \cdot 10^3 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$. Тогда тепловая энергия, выделяющаяся на указанном временном участке в защитном резисторе, составит примерно $R_0 \cdot J_{dA} = 53 \text{ кДж}$. Приведенные оценочные расчетные данные показывают, что при используемых в зарядно-разрядной

цепи генератора ГИТ-А защитных резисторах типа ТВО-60-24 Ом и исходных параметрах аварийного тока при $t_B \gg t_m$ будет наблюдаться взрывообразное разрушение керамических резисторов, установленных на выводе пораженного конденсатора типа ИК-50-3 [5,11]. Отметим, что вопросы взрывообразного разрушения резисторов типа ТВО-60 в мощных ЕНЭ требуют своего дальнейшего исследования.

6. Результаты апробации предложенных расчетных оценок основных показателей термомеханической защиты конденсаторов мощного ЕНЭ на основе применения защитных резисторов. Полученные расчетные соотношения (2)–(4) были апробированы на зарядно-разрядной цепи действующего натурного образца мощного ЕНЭ, используемого в качестве генератора импульсной А- компоненты тока искусственной молнии (генератора импульсного тока ГИТ-А) [11]. Данный генератор на номинальные значения зарядного напряжения $U_0 = 50$ кВ и запасаемой электрической энергии $W_{ЕНЭ} = 420$ кДж в своей сильнооточной низкоомной разрядной цепи имеет собственное активное сопротивление $R_p \approx 0,057$ Ом и собственную индуктивность $L_p \approx 2,5$ мкГн [5,11]. Генератор ГИТ-А содержит параллельно включенные высоковольтные импульсные конденсаторы типа ИК-50-3 ($C = 3$ мкФ; $m_C = 111$ шт. [5]) с установленными на их потенциальных металлических выводах защитными высоковольтными керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом ($R_0 = 24$ Ом; $n_p = 4$ шт. [5, 11]). Численная оценка по (2) амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока (тока короткого замыкания при электрическом пробое одного из конденсаторов ЕНЭ) в аperiодическом режиме разряда заряженных конденсаторов ЕНЭ в количестве $(m_C - 1) = 110$ шт. на один пробитый конденсатор ЕНЭ применительно к генератору ГИТ-А ($U_0 = 50$ кВ; $L_p \approx 2,5$ мкГн; $R_0 = 24$ Ом; $n_p = 4$ шт.; $m_C = 111$ шт. [5, 11]) показывает, что она не превышает 8,4 кА. Расчетная оценка согласно [6] временного параметра разрядного тока t_m и радиуса плазменного канала r_m по (3) применительно к рассматриваемому аварийному режиму работы генератора ГИТ-А приводит нас к тому, что $t_m = 3,3$ мкс и $r_m = 1,4$ мм. Тогда в соответствии с (3) амплитуда P_m гидродинамического давления внутри пробитого маслонаполненного конденсатора типа ИК-50-3 численно составит около $11,5 \cdot 10^5$ Па (11,3 атм). При этом максимальная термодинамическая температура T_m в локальной зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтного конденсатора типа ИК-50-3 согласно (4) будет примерно равной $37,1 \cdot 10^3$ К, что хорошо согласуется с известными расчетно-экспериментальными данными для температуры низкотемпературной плазмы сильнооточных каналов искровых разрядов в конденсированных средах [2,9].

Важно отметить то одно обстоятельство, что при отсутствии в зарядно-разрядных цепях мощного высоковольтного генератора ГИТ-А защитных высоковольтных керамических резисторов амплитуда аварийного сверхтока для слабозатухающего колебательного режима разряда его конденсаторов в

количестве $(m_C - 1) = 110$ шт. на один электрически пробитый высоковольтный конденсатор типа ИК-50-3 при численном значении по [12,13] нормирующего коэффициента $\beta_A \approx 1,59$ для кривой изменения разрядного тока в нашем случае окажется примерно равной [6]: $I_{mp} \approx U_0 \cdot \beta_A^{-1} / [L_p / (m_C - 1)C]^{1/2} \approx 361$ кА. Эти расчетные данные для амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока наглядно показывают нам, что принятая в мощном генераторе ГИТ-А схема установки защитных керамических резисторов ТВО-60-24 Ом обеспечивает практически 43-х кратное ограничение аварийного сверхтока при электрическом пробое одного из его высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3. Приведенные выше результаты могут свидетельствовать о высокой эффективности используемой в мощном высоковольтном генераторе ГИТ-А тока молнии разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» термомеханической защиты его высоковольтных импульсных конденсаторов от аварийных сверхтоков, возникающих в случае электрического пробоя их наружной или внутренней изоляции, то есть в случае наступления режима короткого замыкания в цепи мощного ЕНЭ.

Выводы

1. Разработан инженерно-технический подход к приближенному расчету основных показателей термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ от аварийного сверхтока, основанной на применении в его зарядно-разрядных цепях защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60. В число таких показателей рассматриваемой защиты конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ входит ограничение амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока, амплитуды P_m гидродинамического давления внутри пробитого маслonaполненного конденсатора и максимального значения T_m термодинамической температуры в локальной зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтного конденсатора мощного ЕНЭ, а также прерывание аварийного сверхтока за счет возможного взрывообразного разрушения защитных керамических резисторов на высоковольтном выводе пробитого сильноточным электрическим разрядом конденсатора ЕНЭ.

2. Предложенные в рамках расчетной оценки основных показателей термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощных ЕНЭ приближенные соотношения (2)–(4) прошли определенную практическую апробацию на действующем натурном образце мощного высоковольтного ЕНЭ разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (высоковольтном генераторе ГИТ-А [11,13]), активно используемого в настоящее время на экспериментальной базе института при испытаниях объектов авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к прямому воздействию на них тока искусственной молнии с нормированными в соответствии с международными требованиями амплитудно-временными параметрами.

Список литературы: 1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 2. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с. 4. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 13-20. 5. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: «Точка», 2014. – 400 с. 6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с. 7. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гурьевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с. 8. Лозанский Э.Д., Фирсов О.В. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. 9. Баранов М.И., Лысенко В.О. Основные характеристики сильнооточного плазменного канала подводного электрического разряда // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 2-8. 10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 11. Баранов М.И., Колиушко 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. Расчет процесса энергосыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения // Электричество. – 1992. – № 4. – С. 6-10. 13. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – 407 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tehnika bol'shikh impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 s. Print. 2. Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 s. Print. 3. Mesjac G.A. Impul'snaja jenergetika i jelektronika. Moscow: Nauka, 2004. 704 s. Print. 4. Baranov M.I. Vybory i ustanovka zashhitnyh vysokovol'tnyh keramicheskikh rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjakh moshhnyh emkostnyh nakopitelej jenergii. Visnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Khar'kiv: NTU «HPI», 2014. № 50 (1092). S. 13–20. Print. 5. Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika jelektrofizicheskikh zadach. Khar'kiv: «Tochka», 2014. 400 s. Print. 6. Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: V 2-h t. Uchebnyk dlja vuzov. Tom 1. Leningrad: Jenergoizdat, 1981. 536 s. Print. 7. Berzan V.P., Gelikman B.Ju., Guraevskij M.N. i dr. Jelektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Moskva: Jenergoatomizdat, 1987. 656 s. Print. 8. Lozanskij Je.D., Firsov O.V. Teorija iskry. Moskva: Atomizdat, 1975. 272 s. Print. 9. Baranov M.I., Lysenko V.O. Osnovnye karakteristiki sil'notochnogo plazmennogo kanala podvodnogo jelektricheskogo razrjada. Jelektrichestvo. 2012. №4. S.2–8. Print. 10. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki. Otv. red. V.K. Tartakovskij. Kiev: Naukova dumka, 1989. 864 s. Print. 11. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja na-turnyh ispytanij tehniceskikh ob#ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. № 3. S.81–85. Print. 12. Baranov M.I. Raschet processa jenergovydelenija v cilindricheskikh tokoprovodah jelektrofizicheskikh ustanovok vysokogo naprjazhenija. Jelektrichestvo. 1992. № 4. S. 6-10. Print. 13. Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teorija jelektrofizicheskikh jeffektov i zadach. Khar'kiv: NTU «HPI», 2010. 407 s. Print.

Поступила (received) 08.09.2014