

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМ РЕЗИСТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ОТ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ

Приведені результати розробки нових схем резистивного захисту високовольтних імпульсних конденсаторів потужних ємкісних накопичувачів енергії від руйнівної дії на них аварійних імпульсних струмів амплітудою до сотень кілоампер, що протікають за відсутності подібного захисту через дані конденсатори при електричному пробі їх внутрішньої або зовнішньої ізоляції. Бібл. 14, рис. 3.

Ключові слова: потужний ємкісний накопичувач енергії, аварійний струм, резистивна схема захисту високовольтних конденсаторів, високовольтні постійні графіто-керамічні резистори.

Приведены результаты разработки новых схем резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от разрушающего действия на них аварийных импульсных токов амплитудой до сотен килоампер, протекающих при отсутствии подобной защиты через данные конденсаторы при электрическом пробое их внутренней или наружной изоляции. Библ. 14, рис. 3.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии, аварийный ток, резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов, высоковольтные постоянные графито-керамические резисторы.

Введение. Сейчас в технике высоких напряжений, больших импульсных токов и сильных импульсных электрических (магнитных) полей, а также в экспериментальной физике, силовоточной электронике и современных электротехнологиях достаточно широкое применение нашли мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ), зарядно-разрядные цепи которых содержат параллельно-последовательно соединенные высоковольтные импульсные конденсаторы с металлическими (изоляционными) корпусами общим числом в десятки и сотни штук [1–4]. Накопленный отечественный опыт при эксплуатации подобных ЕНЭ непосредственно указывает на необходимость выполнения защиты их конденсаторов от аварийных токов – токов короткого замыкания при электрическом пробое изоляции конденсаторов ЕНЭ на стадии их заряда или разряда [5–7]. Отсутствие подобной защиты в мощных ЕНЭ может приводить к катастрофическим последствиям для них действия аварийных импульсных токов амплитудой в сотни килоампер на пробитые электрическим силовоточным 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 и испытаниях дорогостоящего электрофизического оборудования из-за ударного воздействия на них разлетающихся продуктов взрыва конденсаторов и др. В этой связи разработка и создание схем защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных токов являются актуальными задачами.

Постановка задачи. Одним из возможных вариантов практической реализации рассматриваемой защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ является тот, который базируется на применении в составе их зарядно-разрядных цепей резистивных защитных схем [5,6]. Рассмотрим зарядно-разрядную

цепь мощного ЕНЭ, содержащую высоковольтные импульсные конденсаторы и защитные резисторы, выполненные на основе высоковольтных объемных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 на номинальное постоянное напряжение ± 25 кВ, изготавливаемых в промышленных масштабах при рассеиваемой мощности 60 Вт для постоянного тока различного номинала R_{03} по активному сопротивлению в РФ [8,9]. Принимаем, что указанные защитные резисторы установлены непосредственно на высоковольтных выводах конденсаторов ЕНЭ. Такое размещение защитных резисторов позволяет минимизировать габаритные размеры соответствующих многочисленных защитных устройств мощных ЕНЭ и конструкционно выполнить их наиболее технологичным путем, а также снизить их паразитное влияние на протекающие в силовоточной разрядной цепи ЕНЭ с электрической нагрузкой электромагнитные процессы. Следует указать то, что такие собственные электрические параметры разрядных цепей мощных ЕНЭ как активное сопротивление R_C и индуктивность L_C реально могут изменяться в широких пределах [1,10]: по R_C – от десятков миллиом до единиц Ом, а по L_C – от единиц микрогенри до десятков миллигенри. В этой связи использование защитных резистивных схем для малоиндуктивных и низкоомных силовоточных разрядных цепей мощных высоковольтных ЕНЭ на практике сопряжено с выполнением жестких требований по их электрическим параметрам R_C и L_C . Требуется разработать инженерно-технические подходы по приближенному выбору основных параметров новых резистивных схем защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных токов, содержащих графито-керамические резисторы типа ТВО-60 с номиналом их сопротивления R_{03} в зарядно-разрядных цепях таких ЕНЭ различного исполнения.

Мощный высоковольтный ЕНЭ одномодульного исполнения с резистивной защитой конденсаторов. На рис. 1 приведена в упрощенном виде элек-

трическая схема такого мощного ЕНЭ, содержащего в своей зарядно-разрядной цепи защитные сопротивления R_3 , установленные прямо на высоковольтных выводах параллельно соединенных конденсаторов общим числом n и собранные из k числа параллельно включенных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 с номиналом активного сопротивления R_{03} . Приведенные в [9] результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при длительном протекании по этим резисторам импульсы тока микро- и миллисекундной длительности максимальное (критическое) значение рассеиваемой тепловой энергии W_k для высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом составляет примерно 2,5 кДж. Из имеющегося в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” опыта эксплуатации мощных ЕНЭ с резистивной защитой их конденсаторов, выполненной на основе резисторов типа ТВО-60, следует, что значение $W_k \approx 2,5$ кДж может быть использовано в первом приближении и для других их номиналов из диапазона $24 \text{ Ом} \leq R_{03} \leq 100 \text{ Ом}$ [6,7].



Рис. 1. Принципиальная электрическая схема мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения с резистивной защитой его высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме работы, вызванном пробоем изоляции его конденсатора на рабочее напряжение U_0 ($U_3 = U_0 \pm 50$ кВ – зарядное напряжение параллельно включенных в количестве n конденсаторов емкостью C ; R_3 – защитное сопротивление, собранное из высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60; F – высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор [10]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение ± 100 кВ [10]; C_p – высоковольтный разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ [10]; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность электрической нагрузки) [7,10]

В рассматриваемом случае для аварийного режима работы ЕНЭ, вызванного, как правило, электрическим пробоем одного из его конденсаторов на стадии их заряда от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ), для сильноточной цепи разряда неповрежденных конденсаторов ЕНЭ на поврежденный (пробитый) конденсатор с аperiодическим импульсом аварийного тока будет всегда выполняться следующее неравенство [11]: $R_3 > 2[LC/(n-1)C]^{1/2}$. Поэтому величина защитного сопротивления R_3 может быть найдена из следующего приближенного соотношения:

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

где U_3 – зарядное напряжение конденсаторов ЕНЭ; I_{mp} – амплитуда максимально допустимого для импульсных конденсаторов ЕНЭ аварийного тока [2].

Согласно [2] для характерных типов высоковольтных импульсных конденсаторов (например, ИК-50-3 и ИМ-5-140), широко используемых в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ при формировании больших импульсных токов различных амплитудно-временных параметров (АВП), величины их зарядного постоянного напряжения U_3 изменяются в диапазоне $\pm 5 \text{ кВ} \leq U_3 \leq \pm 50 \text{ кВ}$, а величины максимально допустимых для них амплитуд I_{mp} разрядного тока – в диапазоне $\pm 2,5 \text{ кА} \leq I_{mp} \leq \pm 50 \text{ кА}$. Из (1) для характерно в области высоковольтной импульсной техники электрофизического случая ($U_3 = \pm 50$ кВ; $I_{mp} = \pm 10$ кА [1,7]) следует, что значение защитного сопротивления R_3 , устанавливаемого на высоковольтный вывод каждого из конденсаторов мощного ЕНЭ одномодульного исполнения, должно численно составлять около $R_3 \approx 5$ Ом. Тогда при априори известном числе n параллельно включенных в высоковольтных зарядно-разрядных цепях мощного ЕНЭ импульсных конденсаторов ($U_3 = \pm 50$ кВ; $I_{mp} = \pm 10$ кА) с номинальной емкостью C и соответственно с заданной номинальной энергоемкостью $W_n = nCU_3^2/2$ конденсаторной батареи ЕНЭ для числа k параллельно соединенных на высоковольтном выводе каждого из конденсаторов такого ЕНЭ графито-керамических резисторов типа ТВО-60 находим:

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

В результате с учетом (1) и (2) для общего числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60 в используемой резистивной схеме защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ одномодульного исполнения от аварийного тока получаем:

$$N_3 = nk. \quad (3)$$

Для мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения проверка правильности осуществленного выбора по приведенным приближенным формулам (1)–(3) числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60, устанавливаемых в его резистивную схему защиты силовых импульсных конденсаторов от аварийного тока, может быть выполнена по следующим критериальным соотношениям:

$$W_0(n-1) / N_3 \leq W_k; \quad (4)$$

$$R_{03} / N_3 \leq R_C, \quad (5)$$

где $W_0 = CU_3^2/2$ – номинальное значение электрической энергии, запасаемой в одном конденсаторе ЕНЭ.

При указанном выше защитном сопротивлении $R_3 \approx 5$ Ом и применении в резистивной схеме защиты конденсаторов ЕНЭ графито-керамических резисторов типа ТВО-60 с номиналом активного сопротивления $R_{03} = 24$ Ом из (2) вытекает, что для числа k будет справедливо следующее неравенство: $4 \leq k \leq 5$. Из опыта разработки и создания в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” в последние годы уникальных мощных одномодульных ЕНЭ с R_C в десятки миллиом и L_C в единицы микрогенри на основе высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 ($U_3 = \pm 50$ кВ; $I_{mp} = \pm 10$ кА) следует, что наиболее технологичным вариантом при практической реализации резистивной схемы защиты их импульсных конденсаторов от аварийных сверхтоков с применением высоковольтных

постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом является тот, при котором $k=4$ [7,10].

На рис. 2 приведен внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения ($W_n=420$ кДж; $W_0=3,75$ кДж) разработки НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” с жестко установленными на высоковольтных выводах их конденсаторов типа ИК-50-3 ($n=112$; $k=4$; $N_3=448$) защитными графито-керамическими резисторами типа ТВО-60 номиналом $R_{03}=24$ Ом ($W_k \approx 2,5$ кДж) [7,10]. Данный ЕНЭ согласно расшифровке соответствующих осциллограмм затухающего синусоидального тока в его разрядной цепи имеет собственное активное сопротивление $R_C \approx 0,057$ Ом [10]. Подставив в (4) и (5) соответствующие численные данные для указанного мощного одномодульного ЕНЭ ($W_0=3,75$ кДж; $n=112$; $k=4$; $N_3=448$), убеждаемся, что выбранные параметры резистивной защиты высоковольтных конденсаторов этого ЕНЭ от аварийных токов удовлетворяют указанным выше критериям.



Рис. 2. Внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ одномодульного исполнения на номинальное напряжение ± 50 кВ и номинальную запасаемую электрическую энергию $W_n=420$ кДж с высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИК-50-3 и установленными на их высоковольтных выводах защитными постоянными графито-керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом [10]

Расчетную оценку амплитуды I_m аperiodического импульса аварийного тока, протекающего в рассматриваемом мощном ЕНЭ через его поврежденный (пробитый) конденсатор типа ИК-50-3, выполним по следующему приближенному соотношению [7]:

$$I_m \approx U_3 k / R_{03}. \quad (6)$$

Из (6) при $U_3=\pm 50$ кВ, $R_{03}=24$ Ом и $k=4$ следует, что $I_m \approx \pm 8,33$ кА. Видно, что в данном случае $I_m < I_{mp}$. Этот результат может говорить о том, что в случае электрического пробоя на стадии заряда одного из конденсаторов типа ИК-50-3 указанного мощного ЕНЭ аварийный ток не вызовет опасное для него и персонала разрушение поврежденного конденсатора.

Расчетную оценку АВП слабозатухающего синусоидального аварийного тока, протекающего через пробитый электрическим разрядом конденсатор типа ИК-50-3 рассматриваемого мощного ЕНЭ ($U_0=U_3=\pm 50$ кВ; $L_C \approx 2,5$ мкГн; $C=3$ мкФ; $n=112$) в режиме короткого замыкания, при отсутствии в нем резистивной защиты выполним по следующему соотношению [7,11]:

$$I_m \approx U_3 \beta_A^{-1} [L_C / (n-1)C]^{-1/2}, \quad (7)$$

где β_A – нормирующий коэффициент (в нашем случае

$\beta_A \approx 1,59$), рассчитываемый согласно [12].

Из (7) при указанных выше исходных электрических параметрах для исследуемого мощного высоковольтного ЕНЭ ($W_n=420$ кДж; $U_3=\pm 50$ кВ) получаем, что $I_m \approx \pm 363$ кА. Отсюда можно аргументировано заключить, что применяемая в составе этого мощного одномодульного ЕНЭ резистивная защита обеспечивает 43-х кратное ограничение амплитуды I_m аварийного тока, протекающего через его поврежденный (пробитый электрическим разрядом) конденсатор.

Мощный высоковольтный ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой конденсаторов. Одним из недостатков конструкционного варианта одномодульного исполнения мощного ЕНЭ, содержащего в своем составе сотни параллельно соединенных, заряжающихся и разряжающихся на общую электрическую нагрузку высоковольтных импульсных конденсаторов, является вероятная опасность взрывообразного разрушения в аварийном режиме его работы (случай электрического пробоя одного из его конденсаторов на стадии их заряда) защитных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 [13]. Наличие в таких ЕНЭ большого количества параллельно включенных конденсаторов приводит к их большой электрической емкости $C_n=nC$ и соответственно к появлению большой длительности τ_p аварийного тока, лежащей в миллисекундном временном диапазоне. В подобных случаях выделяемая в указанных защитных резисторах, ограничивающих амплитуду I_m аварийного тока, тепловая энергия W_p может значительно превышать значение максимальной (критической) тепловой энергии W_k , многократно рассеиваемой графито-керамическими резисторами типа ТВО-60 от действия на них аperiodического импульса аварийного тока. Несмотря на высокоскоростную “отсечку” при этом аварийного тока, вызванную взрывообразным разрушением защитных графито-керамических резисторов на высоковольтном выводе электрически пробитого конденсатора, подобное разрушение защитного сопротивления R_3 влечет за собой опасность поражения осколками от его взрыва как элементов ЕНЭ, так и окружающего оборудования. Для исключения на практике таких случаев, снижающих безопасность функционирования мощных ЕНЭ и несущих угрозу травматизма для их обслуживающего персонала, конденсаторную батарею ЕНЭ целесообразно разбивать на отдельные модули [13].

На рис. 3 приведена в упрощенном виде электрическая схема мощного ЕНЭ многомодульного исполнения, содержащая в составе резистивную защиту его высоковольтных импульсных конденсаторов, выполненную на основе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60. В соответствии с рис. 3 в режиме заряда от ПВУ до постоянного напряжения $U_0=\pm U_3 \leq \pm 50$ кВ высоковольтных конденсаторов емкостью C , разбитых на m модулей по n параллельно соединенных конденсаторов в каждом из модулей ЕНЭ, его $1, \dots, m$ модули между собой соединены высоковольтными междумодульными сопротивлениями R_p , выполненными также как и защитные сопротивления R_3 ЕНЭ из постоянных гра-

фито-керамических резисторов типа ТВО-60. В режиме разряда конденсаторов ЕНЭ на общую электрическую RL -нагрузку его отдельные модули при помощи короткозамыкателей P_1, \dots, P_m с электромагнитным приводом будут через общий высоковольтный коммутатор F [14], сравнительно малоиндуктивную и низкоомную электрическую цепь параллельно разряжаться на указанную нагрузку. В аварийном режиме, обусловленном электрическим пробоем одного из конденсаторов m -го модуля ЕНЭ на стадии их заряда (наихудший случай аварийного режима), на поврежденный конденсатор будут разряжаться практически лишь высоковольтные конденсаторы общим числом $(n-1)$ аварийного модуля данного мощного ЕНЭ [13].



Рис. 3. Принципиальная электрическая схема мощного высоковольтного ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме работы, вызванном пробоем изоляции одного из его конденсаторов на рабочее напряжение $U_0 = \pm U_3 \leq \pm 50$ кВ (R_p – междумодульное сопротивление, выполненное на основе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60; $1, \dots, m$ – число модулей в ЕНЭ; P_1, \dots, P_m – короткозамыкатели разрядных цепей отдельных модулей ЕНЭ; F – общий высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор ЕНЭ [10,14])

Выбор для схемы на рис. 3 величины защитного сопротивления R_3 и числа k параллельно соединенных в нем графито-керамических резисторов типа ТВО-60 осуществляется, как и для схемы на рис. 1, по приближенным формулам (1) и (2). Что касается общего числа N_3 используемых в предлагаемой согласно рис. 3 резистивной защите высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения от аварийного тока постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, то оно может быть определено по следующему соотношению:

$$N_3 = nkm. \quad (8)$$

Число модулей m в зарядно-разрядных цепях мощного ЕНЭ многомодульного исполнения при известном типе его высоковольтных конденсаторов находим по следующему приближенному выражению:

$$m \approx W_{mn} / (n W_0), \quad (9)$$

где W_{mn} – энергоемкость многомодульного ЕНЭ.

Число n параллельно соединенных в каждом модуле мощного ЕНЭ высоковольтных конденсаторов емкостью C на зарядное постоянное напряжение $U_3 \leq \pm 50$ кВ с учетом требований по предотвращению взрывообразного разрушения защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 в аварийном режиме работы ЕНЭ находим из соотношения [13]:

$$n \approx 6k^3 W_k / (R_{03}^2 I_{mp}^2 C) + 1. \quad (10)$$

Критериальные соотношения (4) и (5), по которым можно оценить достоверность проведенного выбора n, k, m и числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60, устанавливаемых в резистивную схему защиты от аварийного тока высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения, в этом случае приобретают вид:

$$W_0(n-1)/(nk) \leq W_k; \quad (11)$$

$$R_{03}/(nkm) \leq R_C. \quad (12)$$

Величина междумодульного сопротивления R_p в схеме мощного ЕНЭ на рис. 3 может быть выбрана из следующего приближенного соотношения [13]:

$$R_p \approx 10 R_3. \quad (13)$$

Рассмотрим работоспособность расчетных соотношений (1), (2) и (8)–(13) применительно к мощному высоковольтному ЕНЭ многомодульного исполнения с конденсаторами типа ИК-50-3 и резистивной схемой их защиты от аварийного тока на основе постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, характеризующемуся следующими электрическими параметрами: $W_{mn} = 420$ кДж; $U_3 = \pm 50$ кВ; $I_{mp} = \pm 10$ кА; $C = 3$ мкФ; $W_0 = 3,75$ кДж; $R_C \approx 0,057$ Ом; $L_C \approx 2,5$ мкГн; $R_{03} = 24$ Ом; $W_k \approx 2,5$ кДж. Из (1) при указанных исходных данных для исследуемого мощного ЕНЭ получаем, что $R_3 \approx 5$ Ом, а из (2) и приведенных рекомендаций следует, что $k \approx 4$. Тогда из (10) находим, что в каждом модуле такого ЕНЭ должно размещаться не более семи параллельно соединенных конденсаторов указанного типа ($n \approx 7$). Из (9) для числа модулей m в ЕНЭ получаем, что $m \approx 16$. В результате из (8) для общего числа N_3 постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом, установленных на высоковольтных выводах конденсаторов типа ИК-50-3 рассматриваемого мощного многомодульного ЕНЭ, следует, что $N_3 \approx 448$. Подставив полученные расчетные данные в (11) и (12), убеждаемся, что рекомендуемые критериальные соотношения выполняются.

Расчетная оценка для мощного многомодульного ЕНЭ амплитуды I_m аварийного аperiodического импульса тока длительностью $\tau_p \approx 0,7 \cdot k^{-1} \cdot R_{03} \cdot (n-1) \cdot C \approx 75,6$ мкс, выполненная по (6), показывает, что и в этом электрофизическом случае $I_m \approx \pm 8,33$ кА (амплитуде I_m при этом соответствует время $t_m \approx 1,33$ мкс), а $I_m < I_{mp}$. Величина междумодульного сопротивления R_p согласно (13) принимает численное значение около 50 Ом, которому соответствует промышленно выпускаемый в РФ высоковольтный объемный постоянный графито-керамический резистор типа ТВО-60-51 Ом [8]. При отсутствии же рассматриваемой резистивной защиты на высоковольтных выводах конденсаторов в указанном многомодульном ЕНЭ, модули которого на стадии заряда их конденсаторов разделены между собой лишь междумодульными сопротивлениями $R_p \approx 50$ Ом, первая амплитуда I_m аварийного слабозатухающего синусоидального тока в таком режиме короткого замыкания в его m -ом модуле согласно (7) окажется примерно равной ± 120 кА ($\beta_A \approx 1,12$). Это дает основание говорить о том, что применение предлагаемой резистивной защиты в мощном высоковольт-

тном ЕНЭ многомодульного исполнения (см. рис. 3) с указанными выше электрическими параметрами обеспечивает 14-ти кратное ограничение амплитуды I_m аварийного тока в пробитом конденсаторе ЕНЭ.

ВЫВОДЫ

1. Мощные высоковольтные ЕНЭ, содержащие в зарядно-разрядных цепях десятки и сотни параллельно-последовательно включенных силовых импульсных конденсаторов, в целях повышения своей функциональной безопасности и обеспечения безопасных условий труда для обслуживающего их персонала должны содержать специальные устройства защиты высоковольтных конденсаторов от аварийных импульсных токов амплитудой до сотен килоампер, протекающих через поврежденные (пробитые) электрическим разрядом конденсаторы подобных ЕНЭ.

2. Предложены две новые схемы резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ одно- и многомодульного исполнения от аварийных импульсных токов, базирующиеся на использовании в их составе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом от 24 до 100 Ом, устанавливаемых прямо на высоковольтных выводах конденсаторов ЕНЭ. Резистивная схема защиты от аварийных токов высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 для мощного одномодульного ЕНЭ ($W_n=420$ кДж; $U_3=\pm 50$ кВ; $n=112$; $k=4$) прошла практическую апробацию.

3. Показано, что предложенные схемы резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных импульсных токов способны в аварийных режимах работы подобных ЕНЭ (электрической пробой внутренней или наружной изоляции конденсаторов на стадии их заряда или разряда) обеспечить многократное ограничение по амплитуде аварийных токов и тем самым предотвратить опасное для дорогостоящего высоковольтного электрофизического оборудования и обслуживающего его персонала взрывообразное разрушение силовых конденсаторов (как правило, с жидким минеральным диэлектриком), сопровождающееся обычно их воспламенением и поражающим действием разлетающихся от них осколков разрушаемых металлических и изоляционных элементов их конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
3. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.
4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
5. Колиушко Г.М. Исследование и разработка систем защиты для емкостных накопителей энергии. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Х.: 1981. – 218 с.
6. 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.

7. 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.
8. ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Госстандарт СССР, 1976. – 20 с.
9. 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.
10. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С.81–85.
11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ “ХП”, 2010. – 407 с.
13. Баранов М.И. Новая резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Серія: “Техніка та електрофізика високих напруг”. – Х.: НТУ “ХП”, 2015. – №20 (1129). – С.3–10.
14. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1–2010 амплитудно-временными параметрами // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С.51–56.

REFERENCES

1. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej / Pod red. V.S. Komel'kova [Technique large pulsed currents and magnetic fields / Ed. V.S. Komelkov]. Moscow, Publ. Atomizdat, 1970, 472 p.
2. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki: Spravochnik / Pod red. G.S. Kuchinskogo [Power capacitors and capacitor banks: Directory / Ed. G.S. Kuchinsky]. Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1987, 656 p.
3. Guly G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Publ. Naukova Dumka, 1990, 208 p.
4. Mesyats G.A. Impul'snaja energetika i elektronika [Pulsed power and elektronika]. Moscow, Publ. Nauka, 2004, 704 p.
5. Koliushko G.M. Issledovanie i razrabotka sistem zashhity dlja emkostnyh nakopitelej jenergii. Dissertacija na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk [Research and development of security systems for capacitive energy storage. Dissertation on a competition degree of PhD of engineering sciences]. Kharkiv, 1981, 218 p.
6. Baranov M.I. Vybora i ustanovka zashhitnyh vysokovol'tnyh keramicheskikh rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjakh moshhnyh emkostnyh nakopitelej energii [Selection and installation of

high-voltage ceramic protective resistors in the charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage]. *Visnyk NTU "KhPI"–Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no.50 (1092), pp.13-20.

7. Baranov M.I. Osnovnye pokazateli termomechanicheskoy zashhity vysokovol'tnyh kondensatorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej jenerгии o avarijnyh sverhtokov [Key indicators thermo protection in high-voltage capacitors charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage of emergency overcurrent]. *Visnyk NTU "KhPI"–Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no.50 (1092), pp.20-27.

8. GOST 11324-76. Rezistory postojannye ob'emnye tipa TVO [Resistors constant volume type TVO]. Moscow, Publ. USSR State Standard, 1976, 20 p.

9. Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Predel'nye harakteristiki po rasseivaemoj impul'snoj moshhnosti i energii vysokovol'tnyh keramicheskikh ob'emnyh rezistorov tipa TVO-60 [Limit characteristics of the scattered pulse power and high-power ceramic resistors bulk type TVO-60]. *Visnyk NTU "KhPI"–Bulletin of NTU "KhPI"*, 2007, no.20, pp.45-56.

10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S., Dnyshchenko V.N. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnykh ispytanj tehniceskikh ob'ektov [The current generator artificial lightning for full-scale tests of technical objects]. *Pribory i tehnika eksperimenta–Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp.81-85.

11. Neiman L.R., Demirchyan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 2-h t. Uchebnik dlja vuzov. Tom 1 [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: In 2-th t. Textbook for high schools. Volume 1]. Leningrad, Publ. Energoizdat, 1981, 536 p.

12. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teorija elektrofizicheskikh effektov i zadach [Selected topics of Electrophysics. Volume 2, Book 2: The theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkiv, Publ. NTU "KhPI", 2010, 407 p.

13. Baranov M.I. Novaja rezistivnaja shema zashhity vysokovol'tnyh kondensatorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej energii [New resistive circuit protection in high-voltage capacitors charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage]. *Visnyk NTU "KhPI"–Bulletin of NTU "KhPI"*, 2015, no.20 (1129), pp.3-10.

14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Moshhnyj vysokovol'tnyj generator aperiodicheskikh impul'sov toka iskusstvennoj molnii s normirovannymi po mezhdunarodnomu standartu IEC 62305-1-2010 amplitudno-vremennymi parametrami [Powerful high-current pulse generator aperiodic artificial lightning with normalized by the international standard IEC 62305-1-2010 amplitude-time parameters]. *Elektrotehnika i elektromehanika–Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp.51-56.

Поступила (received) 29.07.2015

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с., НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Украина, 61013, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ".

тел./phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Рудakov Сергей Валерьевич, к.т.н., доц.,

Национальный университет гражданской защиты Украины. 61023, г. Харьков, ул. Чернышевского, 94, НУГЗ Украины.

тел./phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov, S.V. Rudakov

Research & Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevskogo Str, Kharkiv, 61023, Ukraine.

Development of new charts of capacitance-resistance defence of high-voltage condensers of powerful capacity stores of energy from emergency currents.

Purpose. Development of new charts of capacitance-resistance defence of high-voltage condensers of powerful capacity stores of energy (CSE) from emergency large impulsive currents (LIC) at the electric hasp of one of condensers of such CSE on the stage of their charge or discharge. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high-voltage and large impulsive currents, and also scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulsive technique. **Results.** Two new charts of capacitance-resistance defence of high-voltage impulsive condensers are offered for powerful CSE of one- and multimodule execution from emergency LIC, being based on the use of high-voltage permanent graphite-ceramic resistors of type of TVO-60 a face value from 24 to 100 Ohm, set on the high-voltage conclusions of all of condensers of CSE. One of the developed capacitance-resistance charts of defence of condensers for powerful onemodule CSE passed practical approbation.

Originality. It is rotined that application of the developed charts of capacitance-resistance defence of high-voltage condensers of powerful CSE is provided by frequent limitation of amplitude of emergency LIC, flowing through broken through an electric discharge condenser of CSE on the stage of his charge or discharge. Such limitation emergency LIC is prevented by explosion destruction of the damaged condenser of high-voltage CSE.. **Practical value.** The use of the developed charts of capacitance-resistance defence of high-voltage condensers from emergency LIC allows substantially to promote functional safety of powerful CSE of one- and multimodule execution and provide the safe terms of labour for a scientific and technical personnel, attendant similar CSE. References 14, figures 3.

Key words: powerful capacity store of energy, emergency current, capacitance-resistance chart of defence of high-voltage condensers, high-voltage permanent graphite-ceramic resistors.