

УДК 621.3.011:621.372

**ПРОЦЕССЫ ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ МЕЖДУ НЕЛИНЕЙНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ
ЗВЕНЬЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ**

Н.И.Супруновская¹, канд.техн.наук, **А.А.Щерба¹**, чл.-корр. НАН Украины, **Д.С.Иващенко²**,
О.А.Белецкий³

¹ Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, E-mail: jednat1@gmail.com

² Amazon.com, Inc., Terry Ave N, Seattle, Washington, United States,

³ Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Исследованы процессы обмена предварительно накопленной электрической энергией между параллельно соединенными линейным и нелинейным конденсаторами или звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов, электрическая емкость которых зависит от напряжения на обкладках. Установлены закономерности влияния начальных напряжений на нелинейных и линейных конденсаторах (или звеньях электрической схемы замещения суперконденсаторов), а также соотношений их емкостей на возникающие при этом энергообмене потери электроэнергии. Определены условия уменьшения потерь электроэнергии и увеличения коэффициента ее передачи от нелинейного емкостного элемента к линейному и наоборот. Библ. 20, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: суперконденсатор, электроэнергия, емкость, нелинейность, напряжение, коэффициент передачи энергии.

В работах [1, 2, 7, 9–18, 20] большое внимание уделяется улучшению энергетических характеристик суперконденсаторов (СК) для передачи ими в нагрузку больших импульсных мощностей, недоступных для других накопителей электроэнергии. В некоторых публикациях утверждается, что для энергообеспечения автономного электротранспорта наиболее эффективным решением является объединение СК и аккумуляторной батареи в один комбинированный блок электропитания [4, 7, 9–11]. В таком блоке СК формирует большие импульсные токи и мощности для запуска электродвигателя, разгона, подъема транспорта и обеспечения других подобных режимов, а стабильные режимы энергопотребления обеспечивает аккумуляторная батарея. Такое решение должно существенно повысить надежность работы всего электрооборудования, маневренность и ресурс транспорта. Однако широкое применение СК в тяговом электроприводе и другом силовом электротехническом оборудовании ограничивается низким напряжением единичных элементов СК (~ 2,7 В), резким уменьшением их емкости с увеличением частоты зарядно-разрядных циклов, большим внутренним сопротивлением батарей СК на напряжения в десятки – сотни вольт и высокой их стоимостью.

Отметим, что функционально СК является гибридом емкостного накопителя электроэнергии и электрохимического источника тока с обкладками в виде двойного электрического слоя, образованного на границе нанопористого электрода и электролита [14, 17]. Площадь обкладок СК во много раз больше, а расстояние между ними меньше, чем у обычного линейного конденсатора (ЛК), что позволяет во много раз увеличить емкость, заряд, накапливаемую энергию, импульсную мощность, токи заряда и разряда, а также уменьшить внутреннее электрическое сопротивление СК. Первый патент на энергоемкий конденсатор с пористыми угольными электродами в 1957 году получила фирма General Electric (USA), указав, что электроэнергия запасается в порах электродов [16]. В 1966 году фирма SOHIO (USA) получила новый патент, в котором уточнила, что увеличение плотности накапливаемой электроэнергии происходит за счет образования двойного слоя на границе раздела нанопористых электродов и электролита такого конденсатора [17]. В 1971 году лицензию на это изделие купила фирма NEC (Japan), которая стала его производить под названием Supercapacitor. Подключение СК параллельно аккумуляторам мобильных телефонов, ноутбуков, цифровых фотоаппаратов и других автономных электроустройств обеспечило увеличение их ресурса в 1,5–2 раза [9, 13].

Современные СК имеют внутреннее сопротивление от 0,1 до 1,5 мОм, реализуют удельную мощность до 90 кВт/кг, что в 30–300 раз больше, чем у пускового свинцового аккумулятора [10, 12]. Фирма "Юнаско" (Украина) создала СК с внутренним сопротивлением 0,1 мОм, удельной мощностью

более 90 кВт/кг и удельной энергией 30 Вт·ч/кг, которая в тысячи раз больше, чем у линейных конденсаторов, сравнима с удельной энергией свинцовых аккумуляторов, и всего в 6,7 раза меньше литий-полимерных аккумуляторов фирмы NEC [11, 13]. Такие СК применяют в портативных аппаратах импульсной точечной электросварки, формирующих импульсные токи до 7 кА [13].

В то же время, в работе [4] на основании экспериментальных исследований показано, что непосредственное параллельное соединение СК и аккумуляторной батареи (АБ) в один блок электропитания практически не решает проблему снижения нагрузки на АБ в нагруженных режимах работы, а потери электроэнергии в цепи разряда и заряда СК могут быть весьма большими. В работах [1, 2, 4, 9–18, 20] не учитываются также внутренние потери электроэнергии в СК при протекании разрядно-зарядных процессов между его параллельно соединенными емкостными ячейками. Однако, в работе [3] показано, что при обмене электрической энергией параллельно соединенных ЛК могут возникать большие ее потери. Таким образом, возникла необходимость исследовать процессы обмена электроэнергией между параллельно соединенными нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения СК при разных условиях их заряда и разряда.

Целью работы было определение закономерностей уменьшения потерь электроэнергии и увеличения коэффициента ее передачи при энергообмене между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов при различных условиях их заряда и разряда.

Для анализа нелинейных параметров суперконденсаторов при различных условиях их заряда и разряда необходимо составлять систему неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих электрофизические процессы в неоднородной электролитической среде между пористыми электродами СК. Решение такой системы обычно требует больших упрощений и применения численных методов интегрирования. Еще более затрудняется анализ нелинейных параметров емкостных накопителей при необходимости учета скорости нарастания тока в контуре конденсатора [6], стохастического изменения нелинейного сопротивления нагрузки [5, 6, 8, 19].

Для анализа быстрых и медленных процессов заряда и разряда СК были разработаны электрические схемы замещения СК с параллельно соединенными нелинейными и линейными RC ветвями – так в работах [1, 2, 15] применялась схема, имеющая две, в статье [20] – три, а в [12] – десять таких ветвей. Постоянные времена разных ветвей отличались на 1–2 порядка и более, а количество ветвей увеличивалось с возрастанием длительности анализируемых переходных процессов.

Как и в работах [1, 2, 15] мы исследовали процессы такой длительности, при которой в качестве электрической схемы замещения СК можно выбирать схему с двумя параллельными RC ветвями, показанную на рис. 1. В первом звене схемы нелинейный конденсатор (НК) $C1$ последовательно соединен с линейным резистором $R1$, причем $C1$ состоит из двух параллельно соединенных емкостных ячеек: линейной – емкостью C_0 и нелинейной – имеющей дифференциальную емкость $C_{диф} = k_0 \cdot U_1$ (где $k_0 = \text{const}$ и имеет размерность $[\text{Ф/В}]$, а U_1 – напряжение на C_0 и $C_{диф}$). Таким образом емкость НК конденсатора $C1$ зависит от емкости C_0 , коэффициента k_0 и напряжения U_1 и может представляться функцией [1,2,9,15,20]

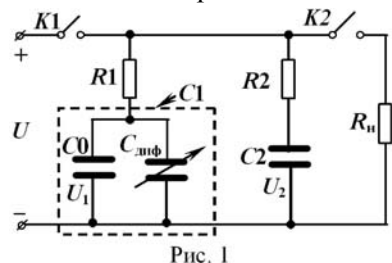


Рис. 1

где $C_1(U_1) = C_0 + k_0 \cdot U_1$.

Вторая ветвь состоит из последовательно соединенных линейного конденсатора $C2$ и резистора $R2$. Сопротивление R_n в схеме представляет собой активное сопротивление нагрузки, на которую подключается СК посредством замыкания ключа $K2$.

Параметры ветви $C1$ – $R1$ отражают быстрые процессы заряда и разряда приэлектродных слоев СК, а ветви $C2$ – $R2$ – более медленные (глубинные) процессы, поэтому значение R_2 выбирают в тысячи раз больше, чем R_1 [1, 2, 10–12, 15, 18, 20], чтобы постоянная времени переходных процессов первой ветви $\tau_1 = R_1 (C_0 + C_{диф})$ была в 200 – 400 раз меньше, чем постоянная $\tau_2 = R_2 C_2$ второй ветви.

В работе определяется влияние значений емкостей C_1 , C_2 и их начальных напряжений на коэффициент передачи электроэнергии от одной емкости к другой (т.е. внутри СК) и на возникающие при этом энергопотери. Такие процессы в схеме на рис. 1 возникают, когда ключ $K2$ разомкнут, а глубоко разряженные емкости C_1 и C_2 замыканием ключа $K1$ подключаются к зарядному устройству лишь на время, достаточное для зарядки C_1 до напряжения U_1 . Если по истечении указанного времени ключ $K1$ разомкнуть, то емкость C_2 будет заряжена до напряжения $U_2 \ll U_1$ и между емкостями начнется переходный процесс зарядки емкости C_2 от емкости $C_1 = C_0 + k_0 U_1$.

Условия и принятые допущения при расчете:

- индуктивность конденсаторов и проводов схемы на рис. 1 является пренебрежимо малой;
- для внутренних сопротивлений конденсаторов $C1$ и $C2$ выполняется условие $R_1 \ll R_2$;
- в последний момент перед отключением коммутатора $K1$ (т.е. в момент времени $t = 0^-$) для напряжений на конденсаторах выполняется неравенство $U_1(0^-) > U_2(0^-) \geq 0$;
- коммутаторы $K1$ и $K2$ остаются выключенными до момента времени $t = t_n$, при котором напряжения на конденсаторах становятся одинаковыми, т.е. $U_1(t_n) = U_2(t_n)$ с точностью, достаточной для оценки энергетических характеристик схемы.

Анализ изменения напряжений на конденсаторах. Согласно неизменности суммарного заряда на конденсаторах $C1$ и $C2$, как и в работе [3], можно записать, что

$$q_1(0^-) + q_2(0^-) = q_1(0^+) + q_2(0^+) = q_1(t) + q_2(t), \quad (2)$$

где $q_1(0^-)$, $q_2(0^-)$, $q_1(0^+)$, $q_2(0^+)$, $q_1(t)$ и $q_2(t)$ – заряды на конденсаторах $C1$ и $C2$ до и после коммутации, а также в моменты времени $t \leq t_n$ при заряде емкости $C2$ от $C1$.

Накопленный заряд на нелинейной емкости $C_1 = C_0 + k_0 U_1$, заряженной до напряжения U_1 , определяется как $q_1 = (C_0 + k_0 U_1) U_1$ [1, 2, 7, 9, 15, 20], а заряд на линейной емкости C_2 , заряженной до напряжения U_2 , равен $q_2 = C_2 U_2$, поэтому выражение (2) можно записать в виде

$$[C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) + C_2 U_2(0^-) = [C_0 + k_0 U_1(t)] U_1(t) + C_2 U_2(t), \quad (3)$$

из которого следует, что для произвольного момента времени $t \leq t_n$ после размыкания коммутатора $K1$ напряжение на линейной емкостной ячейке $C2$ будет равно

$$U_2(t) = U_2(0^-) + \{ [C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) - [C_0 + k_0 U_1(t)] U_1(t) \} / C_2. \quad (4)$$

По окончании переходного процесса в момент времени $t = t_n$ напряжения на ячейках $C1$ и $C2$ установятся одинаковыми $U_1(t_n) = U_2(t_n) = U(t_n)$ и согласно выражению (3) будут равны

$$U(t_n) = \{ [C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) + C_2 U_2(0^-) \} / \{ [C_0 + k_0 U(t_n)] + C_2 \}. \quad (5)$$

Выполнив в выражении (5) определенные преобразования, можно относительно $U(t_n)$ получить квадратное уравнение вида

$$a \cdot (U(t_n))^2 + b \cdot U(t_n) + c = 0, \quad (6)$$

где $a = k_0$, $b = (C_0 + C_2)$, $c = - \{ [C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) + C_2 U_2(0^-) \}$.

Дискриминантом квадратного уравнения (6) является $D = b^2 - 4ac$, поэтому при $b^2 > 4ac$ данное уравнение будет иметь два решения

$$U(t_n)_1 = \left[-(C_0 + C_2) + \sqrt{(C_0 + C_2)^2 + 4k_0 \{ [C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) + C_2 U_2(0^-) \}} \right] / 2k_0, \quad (7)$$

$$U(t_n)_2 = \left[-(C_0 + C_2) - \sqrt{(C_0 + C_2)^2 + 4k_0 \{ [C_0 + k_0 U_1(0^-)] U_1(0^-) + C_2 U_2(0^-) \}} \right] / 2k_0. \quad (8)$$

Согласно ранее принятым допущениям $U_1(0^-) > U_2(0^-) \geq 0$, и мы рассматриваем аperiodические процессы заряда одного конденсатора от второго. Следовательно, во все моменты времени после коммутации напряжения на обоих конденсаторах не могут быть отрицательными. Поскольку из выражения (8) следует, что напряжение $U(t_n)_2 < 0$, то для расчета $U(t_n)$ будем применять только выражение (7).

В работе [3] было показано, что при энергообмене двух параллельно соединенных ЛК одинаковой емкости их конечное напряжение не зависит от величины этой емкости. В то же время конечное напряжение на параллельно соединенных НК и ЛК при равенстве их начальных емкостей, т.е. при равенстве $C_1(0^-) = C_0 + k_0 U_1(0^-) = C_2$, согласно выражению (7) будет равно

$$U(t_n)_1 = \left[-(C_0 + C_2) + \sqrt{(C_0 + C_2)^2 + 4k_0 C_2 [U_1(0^-) + U_2(0^-)]} \right] / 2k_0. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что при энергообмене между НК и ЛК одинаковой начальной емкости их конечное напряжение зависит от начальных емкостей и напряжений.

Анализ процессов энергообмена между НК и ЛК разных емкостей и начальных напряжений.

Разряд НК на ЛК. По аналогии с работой [3] введем энергетические характеристики:

– энергопотери W_R в сопротивлении $R = R_1 + R_2$, которые будем определять как разность суммарных энергий в НК и ЛК до коммутации и по завершению переходного процесса при $t = t_n$

$$W_R = W_1(0^-) + W_2(0^-) - W_1(t_n) - W_2(t_n); \quad (10)$$

– коэффициент преобразования энергии K , равный отношению общей энергии в НК и ЛК после энергообмена между ними к их суммарной энергии до коммутации

$$K = [W_1(t_n) + W_2(t_n)] / [W_1(0-) + W_2(0-)]; \quad (11)$$

– коэффициент передачи энергии η , равный отношению энергии, поступившей в ЛК C_2 , к энергии, отобранной у НК C_1 за все время энергообмена между ними

$$\eta = [W_2(t_n) - W_2(0-)] / [W_1(0-) - W_1(t_n)], \quad (12)$$

где $W_1(0-)$, $W_2(0-)$, $W_1(t_n)$ и $W_2(t_n)$ – энергии, накопленные в НК C_1 и ЛК C_2 соответственно до коммутации и после окончания переходного процесса.

Энергии $W_1(0-)$ и $W_1(t_n)$ в НК C_1 согласно [6] и $W_2(0-)$ и $W_2(t_n)$ в ЛК C_2 определяются как:

$$W_1(0-) = C_0 (U_1(0-))^2 / 2 + 2k_0 (U_1(0-))^3 / 3, \quad W_1(t_n) = C_0 (U(t_n))^2 / 2 + 2k_0 (U(t_n))^3 / 3, \quad (13,14)$$

$$W_2(0-) = C_2 (U_2(0-))^2 / 2, \quad W_2(t_n) = C_2 (U(t_n))^2 / 2. \quad (15,16)$$

После подстановки (13)–(16) в (10)–(12) получим

$$W_R = \left[C_0 (U_1(0-))^2 + C_2 (U_2(0-))^2 - (C_0 + C_2) (U(t_n))^2 \right] / 2 + 2k_0 \left[(U_1(0-))^3 - (U(t_n))^3 \right] / 3. \quad (17)$$

$$K = \frac{(C_0 + C_2) (U(t_n))^2 + 4k_0 (U(t_n))^3 / 3}{C_0 (U_1(0-))^2 + 4k_0 (U_1(0-))^3 / 3 + C_2 (U_2(0-))^2}, \quad (18)$$

$$\eta = \frac{C_2 \left[(U(t_n))^2 - (U_2(0-))^2 \right]}{C_0 \left[(U_1(0-))^2 - (U(t_n))^2 \right] + 4k_0 \left[(U_1(0-))^3 - (U(t_n))^3 \right] / 3}, \quad (19)$$

где напряжение $U(t_n)$ рассчитывается по формуле (7).

Из формул (17) – (19) видно, что энергопотери W_R , коэффициент преобразования энергии K и коэффициент передачи энергии η при энергообмене между НК и ЛК также не зависят от величины сопротивления R , как и при энергообмене между двумя параллельно включенными ЛК, рассмотренном в работе [3].

При равенстве начальных емкостей НК и ЛК (т.е. при $C_1(0-) = C_0 + k_0 U_1(0-) = C_2$) выражения (18) и (19) примут вид

$$K = \frac{(C_0 + C_2 + 4k_0 U(t_n)/3) (U(t_n))^2}{(U_1(0-))^2 (4C_2 - C_0)/3 + C_2 (U_2(0-))^2}, \quad \eta = \frac{C_2 \left[(U(t_n))^2 - (U_2(0-))^2 \right]}{(U_1(0-))^2 (4C_2 - C_0)/3 - (U(t_n))^2 (C_0 + 4k_0 U(t_n)/3)}, \quad (20,21)$$

где напряжение $U(t_n)$ определяется по формуле (9).

Таким образом, если при энергообмене между двумя ЛК с одинаковыми емкостями значения коэффициентов K и η зависят только от начальных напряжений на конденсаторах [3], то при энергообмене между НК и ЛК величины K и η зависят еще от значений емкостей C_0 , C_2 и коэффициента k_0 . Если $U_2(0-) = 0$, то коэффициенты K и η при энергообмене между двумя ЛК зависят лишь от соотношения C_1 / C_2 (а при $C_1 = C_2$ являются константами – $K = 1/2$ и $\eta = 1/3$ [3]), тогда как при энергообмене между НК и ЛК значения K и η по прежнему зависят от всех указанных выше параметров (C_0 , C_2 , k_0).

Ввиду сложности получаемых аналитических выражений для исследования энергетических процессов в электрической цепи, содержащей СК, в работе была построена ее математическая модель в пакете программ Matlab/Simulink. В такой модели нелинейный конденсатор C_1 заменяется управляемым источником напряжения, величина напряжения на котором равна напряжению на C_1 при данном токе в цепи. Таким образом, задача моделирования НК сводилась к составлению уравнения для определения зависимости напряжения на C_1 от протекающего тока в цепи $C_1 - R_1 - R_2 - C_2$ и последующей реализации этого уравнения в блоке управляемого источника напряжения.

С учетом того, что ток в СК $i_1(t) = dq_1/dt$, а $q_1 = (C_0 + k_0 U_1) U_1$ [3], получим, что

$$i_1(t) = d(C_0 U_1 + k_0 (U_1)^2) / dt. \quad (22)$$

Проинтегрировав (22) от $t = 0-$ до произвольного момента времени $t = t_{np}$, получим выражение

$$\int_{0-}^{t_{np}} i_1(t) dt = \int_{U_1(0-)}^{U_1(t_{np})} d(C_0 U_1(t) + k_0 U_1^2(t)), \quad (23)$$

из которого следует, что

$$\int_{0-}^{t_{np}} i_1(t) dt = (C_0 U_1(t) + k_0 U_1^2(t)) \Big|_{U_1(0-)}^{U_1(t_{np})} = C_0 U_1(t_{np}) + k_0 U_1^2(t_{np}) - C_0 U_1(0-) - k_0 U_1^2(0-). \quad (24)$$

Преобразовав уравнение (24) к виду

$$k_0 U_1^2(t_{\text{нп}}) + C_0 U_1(t_{\text{нп}}) - C_0 U_1(0-) - k_0 U_1^2(0-) - \int_{0-}^{t_{\text{нп}}} i_1(t) dt = 0, \quad (25)$$

получим квадратное уравнение относительно напряжения на НК $C_1 U_1(t_{\text{нп}})$

$$a \cdot (U_1(t_{\text{нп}}))^2 + b \cdot U_1(t_{\text{нп}}) + c = 0, \quad (26)$$

где $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0 U_1(0-) - k_0 U_1^2(0-) - \int_{0-}^{t_{\text{нп}}} i_1(t) dt$.

При $b^2 > 4ac$ уравнение (26) имеет два решения

$$U_1(t_{\text{нп}})_1 = -C_0 + (2k_0)^{-1} \sqrt{C_0^2 + 4k_0(C_0 U_1(0-) + k_0 U_1^2(0-) + \int_{0-}^{t_{\text{нп}}} i_1(t) dt)}, \quad (27)$$

$$U_1(t_{\text{нп}})_2 = -C_0 - (2k_0)^{-1} \sqrt{C_0^2 + 4k_0(C_0 U_1(0-) + k_0 U_1^2(0-) + \int_{0-}^{t_{\text{нп}}} i_1(t) dt)}. \quad (28)$$

Ранее было принято, что $U_1(0-) > U_2(0-) \geq 0$, а из (28) следует, что $U(t_{\text{нп}})_2 < 0$. Поэтому в математической модели реализовывалось только выражение (27).

По аналогии с коэффициентом $k = C_2 / C_1$, $U_2^*(0-)$ и W_R^* , введенными в работе [3], при анализе процессов энергообмена между НК и ЛК были введены коэффициент $k_1 = C_2 / C_0$, приведенное напряжение $U_2^*(0-) = U_2(0-) / U_1(0-)$ и приведенная энергия потерь $W_R^* = W_R / W_1(0-)$.

С использованием данной математической модели были проанализированы переходные процессы при разряде НК на ЛК.

На рис. 2 показаны результаты расчета приведенной энергии потерь (W_R^*), коэффициентов ее преобразования и передачи (K и η) при неизменных $C_0 = 270$ Ф, $k_0 = 190$ Ф/В и $U_1(0-) = 2,3$ В (как в работах [7, 10, 11, 20]), но разных k_1 и $U_2^*(0-)$. При выбранных параметрах НК ($C_0 = 270$ Ф, $k_0 = 190$ Ф/В, $U_1(0-) = 2,3$ В) была рассчитана также емкость ЛК, при которой после окончания энергообмена на C_1 и C_2 уравнивались бы не только напряжения, но и заряды. Этот режим соответствует $k_1 \approx 2$.

Из рис. 2 следует, что увеличение соотношения емкостей разряжаемой и заряжаемой емкостных ячеек суперконденсатора (т.е. уменьшение k_1), а также уменьшение отношения их начальных на-

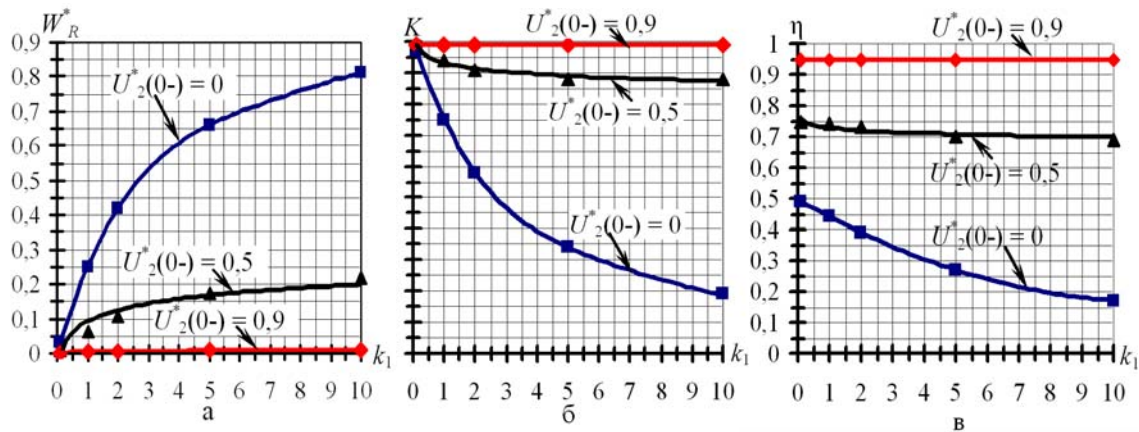


Рис. 2

пряжений ($U_2^*(0-)$) вызывают повышение коэффициентов преобразования и передачи энергии (K и η) и уменьшение приведенной энергии потерь W_R^* при обмене электрической энергией между ячейками.

Так, если коэффициент $k_1 = C_2 / C_0$ уменьшается от 10 до 0,1 (т.е. в 100 раз), то при разряде НК емкостью $C_1 = C_0 + k_0 U_1(t)$ на полностью разряженный ЛК емкостью C_2 коэффициент передачи энергии η увеличится от 0,17 до 0,49 (\approx в 3 раза), коэффициент ее преобразования K – от 0,19 до 0,97 (в 5,1 раз). При этом приведенная энергия потерь W_R^* уменьшится от 0,81 до 0,03 (в 27 раз).

При соотношении начальных напряжений на конденсаторах $U_2(0-) = 0,5 \cdot U_1(0-)$ и тех же изменениях k_1 величина η возрастет от 0,69 до 0,75 (в 1,1 раза), величина K – от 0,88 до 0,99 (в 1,1 раза), а величина W^*_R уменьшится от 0,22 до 0,008 (в 27,5 раза).

При $U_2(0-) = 0,9 \cdot U_1(0-)$ коэффициенты преобразования и передачи энергии (K и η) остаются приблизительно равными (соответственно 0,95 и 0,99) при всех значениях коэффициента k_1 .

В табл. 1 и на рис. 3 отражены зависимости коэффициента передачи энергии η от соотношения емкостей конденсаторов при разряде НК на ЛК (k_1) и при разряде ЛК на ЛК (k) и от их начальных напряжений ($U^*_2(0-) = U_2(0-) / U_1(0-)$).

Таблица 1

$U^*_2(0-)$	η	k, k_1				
		0,1	1	2	5	10
0	НК–ЛК	0,49	0,44	0,39	0,27	0,17
	ЛК–ЛК	0,48	0,33	0,25	0,14	0,08
0,5	НК–ЛК	0,75	0,74	0,73	0,70	0,69
	ЛК–ЛК	0,74	0,71	0,70	0,68	0,68
0,9	НК–ЛК	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	ЛК–ЛК	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

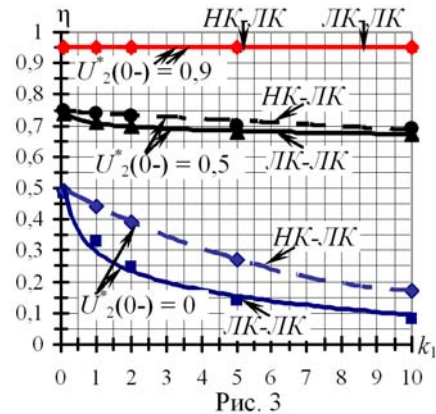


Рис. 3

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что коэффициент передачи энергии η разряда НК на ЛК выше, чем ЛК на ЛК. С увеличением начального напряжения на заряжаемом ЛК оба коэффициента увеличиваются, а разность между ними уменьшается так, что при $U_2(0-) \approx 0,9 U_1(0-)$ (т.е. $U^*_2(0-) = 0,9$) оба коэффициента становятся практически равными $\eta \approx 0,95$.

Разряд ЛК на НК. Рассмотрим энергообмен между емкостными ячейками СК при отсутствии его подзарядки (ключ $K1$ разомкнут) и в случае, когда после замыкания ключа $K2$ полностью заряженный СК отдал в нагрузку дозу энергии, накопленную в нелинейной ячейке емкостью $C_1 = C_0 + k_0 U_1$, за время гораздо меньшее постоянной времени разряда емкости C_2 линейной ячейки СК. Тогда после завершения разряда на нагрузку нелинейной емкости C_1 (напряжение на которой снизится до некоторого значения U_1) и отключения нагрузки коммутатором $K2$ начнется заряд нелинейной емкости C_1 от линейной емкости C_2 при условии, что напряжение на ней $U_2 > U_1$.

На рис. 4 показаны результаты расчета приведенной энергии потерь (W^*_R), коэффициентов ее преобразования и передачи (K и η) при $U_2(0-) = 2,3$ В, $C_0 = 270$ Ф, $k_0 = 190$ Ф/В и разных значениях $k_2 = C_0/C_2$ и $U^*_1(0-) = U_1(0-)/U_2(0-)$.

Из рис. 4 следует, что увеличение соотношения емкостей разряжаемого ЛК и заряжаемого НК (т.е. уменьшение k_2), а также уменьшение отношения их начальных напряжений ($U^*_1(0-)$) вызывают повышение коэффициентов преобразования и передачи энергии (K и η) и уменьшение приведенной энергии потерь W^*_R при разряде ЛК на НК так же, как и при разряде НК на ЛК, рассмотренном выше.

Так, например, если коэффициент $k_2 = C_0/C_2$ уменьшается от 10 до 0,1 (т.е. в 100 раз), то при разряде ЛК емкостью C_2 на полностью разряженный НК емкостью $C_1 = C_0 + k_0 U_1(t)$ величина коэффициента передачи энергии η увеличится от 0,08 до 0,53 (в 6,6 раза), коэффициента ее преобразова-

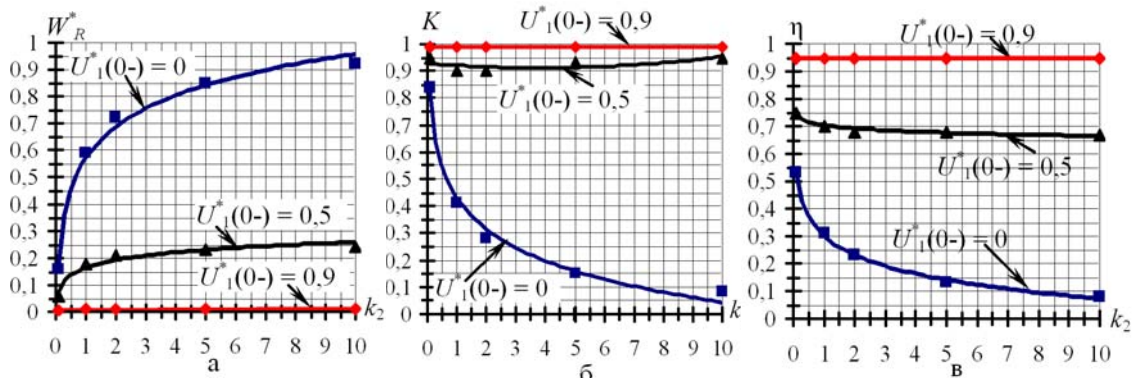


Рис. 4

ния K – от 0,08 до 0,84 (в 10,5 раз). При этом приведенная энергия потерь W^*_R уменьшится от 0,92 до 0,16 (в 5,8 раз).

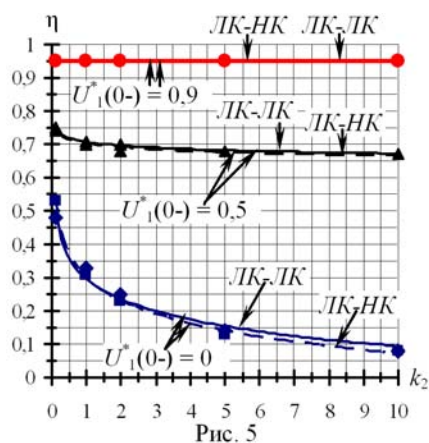
При соотношении начальных напряжений на конденсаторах $U_1(0-) = 0,5 \cdot U_2(0-)$ и тех же изменениях k_2 величина η возрастет от 0,67 до 0,75 (в 1,1 раза), величина K практически не изменится, а величина W^*_R уменьшится от 0,24 до 0,06 (в 4 раза).

При $U_1(0-) = 0,9 \cdot U_2(0-)$ коэффициенты преобразования и передачи энергии (K и η), равные соответственно 0,95 и 0,99, не изменяются при всех коэффициентах k_2 .

Значения коэффициента передачи энергии η разряда ЛК на НК и ЛК на ЛК при разных k_2 и $U^*_1(0-)$ приведены в табл. 2. Соответствующие зависимости, построенные на рис. 5, показывают, что коэффициенты передачи энергии η при разряде ЛК на ЛК и ЛК на НК практически одинаковы во всем анализируемом диапазоне изменения $U_1(0-)$.

Таблица 2

$U^*_1(0-)$	η	k_2				
		0,1	1	2	5	10
0	ЛК–НК	0,53	0,31	0,23	0,13	0,08
	ЛК–ЛК	0,48	0,33	0,25	0,14	0,08
0,5	ЛК–НК	0,75	0,70	0,68	0,68	0,67
	ЛК–ЛК	0,74	0,71	0,70	0,68	0,68
0,9	ЛК–НК	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	ЛК–ЛК	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95



Анализ зависимостей на рис. 2–5 показывает, что коэффициент передачи энергии η при разряде НК на ЛК несколько выше, чем ЛК на ЛК и ЛК на НК, а для уменьшения потерь и повышения коэффициентов преобразования и передачи энергии (K и η) при разряде одного конденсатора на другой целесообразно как увеличивать отношение емкостей разряжаемого и заряжаемого конденсаторов, так и уменьшать отношение их начальных напряжений. В то же время возможны режимы, когда η заряда одной электрической емкости от другой будет составлять 8 – 49 %, т.е. от 51 до 92 % отбираемой от разряжаемой емкости энергии может рассеиваться на активных элементах электрической цепи, что необходимо учитывать при анализе перераспределения зарядов и энергии между емкостными ячейками СК.

Выводы. 1. Установлено, что при энергообмене между нелинейными и линейными емкостными звеньями суперконденсатора коэффициенты передачи и преобразования энергии (η и K), а также энергия потерь в цепи всегда без исключения зависят как от соотношения емкостей разряжаемых и заряжаемых звеньев, так и от их начальных напряжений. Тогда как ранее установлено, что если при энергообмене между двумя линейными емкостями напряжение на одной из них равно нулю, то указанные энергетические параметры зависят только от соотношения емкостей, а если при этом еще и емкости равны, то K и η становятся константами: $K = 1/2$ и $\eta = 1/3$ [3].

2. Обосновано, что увеличение соотношения емкостей разряжаемой и заряжаемой емкостных ячеек суперконденсатора (как при разряде нелинейных ячеек на линейные, так и наоборот), а также уменьшение отношения их начальных напряжений вызывают повышение коэффициентов передачи и преобразования энергии и уменьшение возникающих энергопотерь, причем их величины не зависят от активного сопротивления электрической цепи.

3. Если соотношение заряжаемой и разряжаемой емкостей уменьшать от 10 до 0,1 (т.е. в 100 раз), то при разряде нелинейной емкости на линейную емкость, коэффициенты передачи и преобразования энергии (η и K) могут возрасти максимально в 3 и в 5 раз соответственно, при этом приведенные потери энергии W^*_R уменьшатся в 27 раз. При тех же изменениях соотношения емкостей, но разряде линейной емкости на нелинейную емкость, η и K могут возрасти максимально в 6,6 и в 10,5 раз соответственно при уменьшении W^*_R в 5,8 раза.

4. Установлено, что коэффициент передачи энергии разряда нелинейной емкости на линейную всегда выше, чем при разряде линейной емкости на линейную или нелинейную емкости. При уменьшении разности между начальными напряжениями разряжаемой и заряжаемой емкостей коэффициенты передачи энергии всех процессов энергообмена возрастают и разность между ними

уменьшается. Если разность между начальными напряжениями заряжаемых конденсаторов, отнесенная к абсолютной величине начального напряжения разряжаемого конденсатора, не превышает 10 %, то коэффициенты передачи энергии всех трех процессов энергообмена становятся практически равными $\eta \approx 0,95$.

5. Показано, что для всех рассмотренных случаев энергообмена между емкостями существуют режимы, когда КПД заряда одной электрической емкости от другой будет составлять 8 – 49 %, т.е. от 51 до 92 % энергии, отбираемой от разряжаемой емкости, может рассеиваться на активных элементах электрической цепи, что необходимо учитывать при анализе перераспределения зарядов и энергии между емкостными ячейками СК.

1. *Изотов В.Ю.* Зависимость интегральной емкости конденсаторов двойного электрического слоя от потенциала // *Наук. вісті НТУУ "КПІ"*. – 2011. – № 3. – С. 119–122.
2. *Изотов В.Ю., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А.* Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора // *Наук. вісті НТУУ "КПІ"*. – 2008. – № 6. – С. 114–118.
3. *Супруновская Н.И., Щерба А.А.* Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // *Техн. електродинаміка*. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
4. *Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е.* Суперконденсаторы в системах электропитания электромобилей // *Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність"*. – 2010. – Ч. 1. – С. 48–51.
5. *Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И.* Развитее метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки // *Техн. електродинаміка*. – 2013. – № 3. – С. 3 – 11.
6. *Щерба А.А., Супруновская Н.И.* Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // *Техн. електродинаміка*. – 2012. – № 5. – С. 3 – 9.
7. *Щерба А.А., Супруновская Н.И., Белецкий О.А.* Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку // *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. – 2014. – № 39. – С. 65–74.
8. *Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И.* Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // *Техн. електродинаміка*. – 2014. – № 3. – С. 12 – 18.
9. *Beguín F., Frackowiak E.* Supercapacitors: Materials, Systems and Applications. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. – 527 p.
10. *Burke A.* Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles // *Proc. of the IEEE*. – 2007. – Vol. 95. – No 4. – Pp. 806–820. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.ID=40>. (Accessed 27.09.2014)
11. *Burke A., Miller M., Zhao H.* Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density. – Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. – 8 p.
12. *Harzfeld E., Gallay R., Hahn M., and Kötz R.* Capacitance and Series Resistance determination in high power ultracapacitors / ESSCAP 04, Maxwell Proceeding, Belfort, France, 2004. – Pp. 1–4.
13. <http://www.ubergizmo.com/2013/03/yunasko-ultracapacitors/>, <http://www.yunasko.com> (Accessed 27.09.2014)
14. *Levie R. de.* Electrochemical Responses of Porous and Rough Electrodes // *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*. – 1967. – Vol. 6. – Pp. 329–397.
15. *Maletín Y., Novak P., Shembel E., Izotov V., Strizhakova N., Mironova A., Danilin V., Podmogilny S.* Matching the Nanoporous Carbon Electrodes and Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors // *Appl. Phys. A: Material Science and Processing*. – 2006. – Vol. 82. – No 4. – Pp. 653–657.
16. *Becker H.I.* Low voltage electrolytic capacitor. *Patent US № 2800616 A*. – Patented: July, 23, 1957.
17. *Rightmire R.A.* Electrical energy storage apparatus. *Patent US № 3288641 A*. – Patented: Nov. 29, 1966.
18. *Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A.* Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling // *Journal of Power Sources*. – 2007. – Vol. 165. – No 2. – Pp. 928–934.
19. *Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I.* Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kyiv, Ukraine. – 2014. – Pp. 50–54.
20. *Zubieta L., Bonert R.* Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // *IEEE Trans. On Industry Applications*. – 2000. – Vol. 36. – No 1. – Pp. 199–205.

УДК 621.3.011:621.372

ПРОЦЕСИ ОБМІНУ ЕНЕРГІЄЮ МІЖ НЕЛІНІЙНИМИ Й ЛІНІЙНИМИ ЛАНКАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

Н.І.Супруновська¹, канд.техн.наук, А.А.Щерба¹, чл.-кор. НАН України, Д.С.Івашенко², О.О.Білецький³

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: jednat1@gmail.com

² – Amazon.com, Inc., Terry Ave N, Seattle, Washington, United States,

³ – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Досліджено процеси обміну попередньо накопиченою електричною енергією між паралельно з'єднаними лінійним і нелінійним конденсаторами або ланками електричної схеми заміщення суперконденсаторів, електрична ємність яких залежить від напруги на обкладках. Установлено закономірності впливу початкових напруг на нелінійних і лінійних конденсаторах

(або ланках електричної схеми заміщення суперконденсаторів), а також співвідношень їхніх ємностей на втрати електроенергії, що виникають при цьому енергообміні. Визначено умови зменшення втрат електроенергії й збільшення коефіцієнта її передачі від нелінійного ємнісного елемента до лінійного й навпаки. Бібл. 20, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: суперконденсатор, електроенергія, ємність, нелінійність, напруга, коефіцієнт передачі енергії.

PROCESSES OF ENERGY EXCHANGE BETWEEN NONLINEAR AND LINEAR LINKS OF ELECTRIC EQUIVALENT CIRCUIT OF SUPERCAPACITORS

N.I. Suprunovskaya¹, A.A. Shcherba¹, D.S. Ivashchenko², O.A. Beletsky³

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: iednat1@gmail.com

² Amazon.com, Inc., Terry Ave N, Seattle, Washington, United States,

³ National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The exchange processes of previously accumulated electrical energy between parallel connected linear capacitor and nonlinear one or between links of electrical equivalent circuit of supercapacitors, electric capacity of which depends on the voltage on the capacitor plates are studied. It is determined the regularities of the influence of initial voltages and capacities ratio of the linear capacitor and nonlinear one (or links of an electrical equivalent circuit of supercapacitors), on energy loss arising at this energy exchange. Conditions for decrease of losses of the electric power and increase in energy-transfer coefficient at transfer from a nonlinear capacitor element to linear one and vice versa are defined. References 20, figures 5, tables 2.

Keywords: supercapacitor, electric power, capacity, nonlinearity, voltage, energy-transfer coefficient.

1. Izotov V.Yu. Dependence of integrated capacity of capacitors of a double electric layer on potential // Naukovi Visti Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Ukrainy "Kyivskiy Politekhnichnyi Instytut". – 2011. – No 3. – Pp. 119–122. (Rus)
2. Izotov V.Yu., Gromadsky D.G., Maletin Yu.A. Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor // Naukovi Visti Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Ukrainy "Kyivskiy Politekhnichnyi Instytut". – 2008. – No 6. – Pp. 114–118. (Rus)
3. Suprunovskaya N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 4. – Pp. 3–11. (Rus)
4. Shydlovsky A.K., Pavlov V.B., Popov A.V., Pavlenko V.Ye. Supercapacitors in systems for power supplies of electric vehicle // Tekhnichna Elektrodynamika. – Spetsialnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2010. – Part 1. – Pp. 48–51. (Rus)
5. Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Suprunovskaya N.I. Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 3. – Pp. 3 – 11. (Rus)
6. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 3 – 9. (Rus)
7. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., Beletsky O.A. Power characteristics of supercapacitors during their charge from a source of voltage and discharge on resistive load // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – No 39. – Pp. 65–74. (Rus)
8. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 3. – Pp. 12 – 18. (Rus)
9. Beguin F., Frackowiak E. Supercapacitors: Materials, Systems and Applications. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. – 527 p.
10. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles // Proc. of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – No 4. – Pp. 806–820. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.ID=40>. (Accessed 27.09.2014)
11. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density. – Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. – 8 p.
12. Harzfeld E., Gallay R., Hahn M., and Kötz R. Capacitance and Series Resistance determination in high power ultracapacitors / ESSCAP 04, Maxwell Proceeding, Belfort, France, 2004. – Pp. 1–4.
13. <http://www.ubergizmo.com/2013/03/yunasko-ultracapacitors/>, <http://www.yunasko.com> (Accessed 27.09.2014).
14. Levie R. de. Electrochemical Responses of Porous and Rough Electrodes // Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering. – 1967. – Vol. 6. – Pp. 329–397.
15. Maletin Y., Novak P., Shembel E., Izotov V., Strizhakova N., Mironova A., Danilin V., Podmogilny S. Matching the Nanoporous Carbon Electrodes and Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors // Appl. Phys. A: Material Science and Processing. – 2006. – Vol. 82. – No 4. – Pp. 653–657.
16. Becker H.I. Low voltage electrolytic capacitor. Patent US № 2800616 A. – Patented: July, 23, 1957.
17. Rightmire R.A. Electrical energy storage apparatus. Patent US № 3288641 A. – Patented: Nov. 29, 1966.
18. Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A. and Berthon A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 165. – No 2. – Pp. 928–934.
19. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine. – 2014. – Pp. 50–54.
20. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – 2000. – Vol. 36. – No 1. – Pp. 199–205.

Надійшла 31.03.2015