

Н. И. СУПРУНОВСКАЯ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
А. А. ЩЕРБА, чл.-корр. НАН Украины, зав. отд., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
Д. С. ИВАЩЕНКО, инженер по разработке ПО, Amazon.com, Inc., Seattle, Washington, United States;
О. А. БЕЛЕЦКИЙ, аспирант, НТУУ «Киевский политехнический институт»

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕПЕЙ РАЗРЯДА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ЛИНЕЙНУЮ АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ ОТ УСЛОВИЙ ПРЕРЫВАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ

Введение. В последние годы большое внимание ученых в области импульсной электротехники направлено на повышение энергетических и динамических параметров емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) для передачи ими в нагрузку больших импульсных мощностей, недоступных для других накопителей электроэнергии [1, 5, 6–8, 11]. Длительное время при разработке электроимпульсных технологий применялись ЕНЭ на основе обычных линейных конденсаторов (ЛК), заряд которых прямо пропорционально (линейно) зависит от напряжения на их клеммах, а постоянным коэффициентом указанной пропорциональной зависимости является их электрическая емкость. В работе [5] исследовались такие энергетические характеристики ЕНЭ, как энергия, передаваемая в линейное активное сопротивление, энергия, накопленная в реактивных элементах и рассеянная на активных сопротивлениях разрядного контура и т.д. В работе [3] анализировались диапазоны изменения коэффициентов полезного действия (КПД) зарядной и разрядной цепей ЛК при изменении активного сопротивления нагрузки, а в [4] – закономерности обмена энергией между нелинейными и линейными конденсаторами. В то же время до настоящего времени не уделялось внимание возможному влиянию условий прерывания разрядных токов суперконденсаторов (СК) на их энергетические характеристики, с учетом того, что емкость СК является линейной, а заряд – нелинейной функциями от напряжения на их клеммах [2, 6, 7–14].

Поэтому **целью работы** было определение закономерностей изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в линейную активную нагрузку при разряде на нее суперконденсатора при различных условиях прерывания разрядных токов.

Результаты исследований. На рис. 1 показана эквивалентная схема замещения цепи разряда суперконденсатора на нагрузку, представляемую активным сопротивлением R_n .

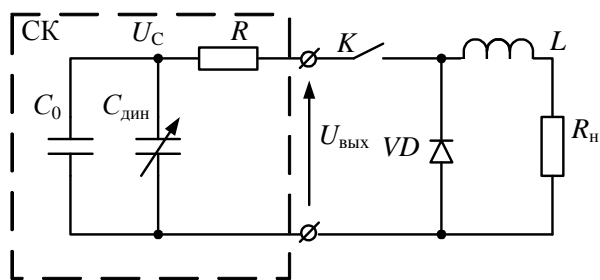


Рис. 1 Эквивалентная схема замещения цепи разряда СК на нагрузку

Индуктивность L отражает индуктивность элементов разрядной цепи СК, а его внутреннее сопротивление представляется активным сопротивлением R . Электрическая схема замещения быстрой емкостной цепочки СК, как и в работах [2, 6–14], представлена двумя параллельно соединенными емкостями: линейной – C_0 и нелинейной динамической – $C_{дин}$, величина которой зависит от напряжения конденсатора U_C и определяется как $C_{дин} = k_0 \cdot U_C$ (где k_0 – постоянный коэффициент, имеющий размерность [Ф/В], а U_C – напряжение на C_0 и $C_{дин}$). Таким образом емкость СК представляется функцией:

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot U_C. \quad (1)$$

Конструкция и технология изготовления суперконденсаторов позволяют изменять полярность напряжения U_C на его клеммах. Поэтому в данной статье проводилось исследование режимов разряда СК при таких значениях емкости $C(U_C)$, индуктивности L и сопротивления R_n , при которых возможен и апериодический, и колебательный разряд СК с изменением полярности напряжения на его клеммах. Такой подход вызвал необходимость вместо формулы (1) для определения значения емкости $C(U_C)$ применить выражение:

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot |U_C|, \quad (2)$$

в котором динамическая емкость $C_{дин} = k_0 |U_C|$ увеличивается с ростом напряжения U_C любой полярности.

Для определения закономерностей изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в нагрузку были рассмотрены режимы разряда СК, как с нерегулируемой, так и с регулируемой длительностью. Регулирование длительности разряда осуществляется путем принудительного его прерывания (размыканием ключа K). При размыкании ключа K накопленная в индуктивности энергия рассеивается в сопротивлении нагрузки R_n через обратный диод VD .

Ввиду сложности получаемых аналитических выражений для исследования энергетических процессов в нелинейной электрической цепи, содержащей СК, в работе [4] была построена ее математическая модель в пакете программ Matlab/Simulink. В ней СК моделируется управляемым источником напряжения, величина напряжения на котором в произвольный момент времени $t_{пр}$ задается математическим уравнением, отражающим зависимость напряжения на СК $U_C(t_{пр})$ от тока i , протекающего через СК:

© Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, 2015

$$U_C(t_{\text{нр}}) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0 \left(C_0 U_0 + k_0 U_0^2 + \int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (3)$$

где U_0 – начальное напряжение на СК C .

Однако эта математическая модель была разработана при допущении, что напряжение на СК U_C всегда больше или равно нулю, поскольку в разрядной цепи не учитывалась индуктивность (которая может в некоторых случаях быть достаточно большой), а, следовательно, разряд не мог иметь колебательный характер и напряжение на СК не могло изменять свою полярность. Поэтому для электрических цепей разряда СК, которые могут содержать большую индуктивность, была разработана математическая модель, учитывающая, что разрядный процесс может носить как апериодический, так и колебательный характер.

С учетом выражения (2) для определения величины заряда q СК можно записать уравнение:

$$q = C(U_C) \cdot U_C = (C_0 + k_0 |U_C|) \cdot U_C. \quad (4)$$

Тогда значение тока в разрядной цепи СК можно определять из выражения:

$$i(t) = dq/dt = d(C_0 U_C + k_0 |U_C| U_C) / dt. \quad (5)$$

Проинтегрировав (5) по времени на интервале от $t = 0$ до произвольного момента времени $t = t_{\text{нр}}$, получим выражение:

$$\int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt = \int_{U_C(0)}^{U_C(t_{\text{нр}})} d(C_0 U_C(t) + k_0 |U_C(t)| U_C(t)), \quad (6)$$

из которого следует, что

$$\int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt = \left(C_0 U_C(t) + k_0 |U_C(t)| U_C(t) \right) \Big|_{U_C(0)}^{U_C(t_{\text{нр}})} = C_0 U_C(t_{\text{нр}}) + k_0 |U_C(t_{\text{нр}})| U_C(t_{\text{нр}}) - C_0 U_C(0) - k_0 |U_C(0)| U_C(0). \quad (7)$$

Рассмотрим следующие варианты полярности напряжений $U_C(0)$ и $U_C(t_{\text{нр}})$:

1. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_{\text{нр}}) \geq 0$.

В этом случае $|U_C(t_{\text{нр}})|$ и $|U_C(0)|$ в уравнении (7) можно заменить соответственно на $U_C(t_{\text{нр}})$ и $U_C(0)$:

$$k_0 U_C^2(t_{\text{нр}}) + C_0 U_C(t_{\text{нр}}) - C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) - \int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt = 0, \quad (8)$$

т.е. получим квадратное уравнение относительно напряжения $U_C(t_{\text{нр}})$:

$$a \cdot (U_C(t_{\text{нр}}))^2 + b \cdot U_C(t_{\text{нр}}) + c = 0, \quad (9)$$

где $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) - \int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt$.

С учетом принятого допущения, что $U_C(0) > 0$ и при условии положительного дискриминанта квадратного уравнения (т.е. $b^2 - 4ac > 0$), решением уравнения (9) будет уравнение (3), реализованное в модели [4].

2. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_{\text{нр}}) < 0$.

В таком случае знак модуля $|U_C(t_{\text{нр}})|$ в уравнении (7) можно опустить, но одновременно с этим нужно изменить знак напряжения $U_C(t_{\text{нр}})$, стоящего под модулем (т.е. $|U_C(t_{\text{нр}})|$ заменить на $-U_C(t_{\text{нр}})$). При этом $|U_C(0)|$ можно заменить на $U_C(0)$. Тогда уравнение (7) преобразуется к виду:

$$k_0 U_C^2(t_{\text{нр}}) - C_0 U_C(t_{\text{нр}}) + C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt = 0 \quad (10)$$

В этом случае квадратное уравнение относительно напряжения $U_C(t_{\text{нр}})$ имеет такие коэффициенты a , b , c :

$$a = k_0, \quad b = -C_0, \quad c = C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{нр}}} i(t) dt.$$

При условии положительного дискриминанта квадратного уравнения (т.е. $b^2 - 4ac > 0$) уравнение (10) имеет два решения:

$$U_C(t_{\text{пр}})_1 = C_0 + \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (11)$$

$$U_C(t_{\text{пр}})_2 = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt \right)} / 2k_0. \quad (12)$$

Поскольку $U_C(t_{\text{пр}})$ согласно (11) (в отличие от (12)) всегда будет иметь положительное значение, что не соответствует рассматриваемому варианту, то в усовершенствованной математической модели будем реализовывать выражение (12).

3. $U_C(0) < 0, U_C(t_{\text{пр}}) \geq 0$.

В этом случае в выражении (7) $|U_C(0)|$ нужно заменить на $-U_C(0)$, а $|U_C(t_{\text{пр}})|$ – на $U_C(t_{\text{пр}})$:

$$k_0 U_C^2(t_{\text{пр}}) + C_0 U_C(t_{\text{пр}}) - C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt = 0. \quad (13)$$

Коэффициенты квадратного уравнения (13): $a = k_0, b = C_0, c = -C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt$.

Решением (13) является следующее уравнение:

$$U_C(t_{\text{пр}}) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0 \left(C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (14)$$

(т. к. второй корень уравнения (13) всегда отрицателен, и поэтому не удовлетворяет исходным условиям).

4. $U_C(0) < 0, U_C(t_{\text{пр}}) < 0$.

В таком случае в (7) можно опустить обозначения модуля, но одновременно нужно изменить знаки напряжений, стоящих под знаком модуля (т.е. заменить $|U_C(t_{\text{пр}})|$ и $|U_C(0)|$ соответственно на $-U_C(t_{\text{пр}})$ и $-U_C(0)$):

$$k_0 U_C^2(t_{\text{пр}}) - C_0 U_C(t_{\text{пр}}) + C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt = 0 \quad (15)$$

Коэффициенты уравнения (15): $a = k_0, b = -C_0, c = C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt$.

При условии $b^2 - 4ac > 0$ уравнение (15) имеет два решения. Но только одно из них может принимать отрицательные значения (т.е. удовлетворяет исходным условиям):

$$U_C(t_{\text{пр}}) = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t) dt \right)} / 2k_0. \quad (16)$$

Таким образом новая математическая модель будет учитывать все возможные варианты полярности напряжения на СК, используя для расчета текущего значения $U_C(t_{\text{пр}})$ одно из уравнений (3), (12), (14), (16) в зависимости от сочетания полярностей напряжений $U_C(0)$ и $U_C(t_{\text{пр}})$.

Определим КПД передачи энергии в нагрузку η как отношение дозы энергии, переданной в нагрузку ΔW_{R_n} , к дозе энергии, отобранной от конденсатора ΔW_C (т.е. $\eta = \Delta W_{R_n} / \Delta W_C$).

При этом энергию потерь при разряде $W_{\text{потерь}}$ можно рассчитать как разность доз энергии, отобранной от конденсатора ΔW_C , и энергии, переданной в нагрузку ΔW_{R_n} (т.е. $W_{\text{потерь}} = \Delta W_C - \Delta W_{R_n}$).

При моделировании разряда СК на линейную нагрузку с активным сопротивлением R_n использовались следующие параметры цепи: $R_n = 0,12 \text{ Ом} = \text{const}, R = 0,01 \text{ Ом}, U_0 = 200 \text{ В}, C_0 = 10^{-4} \text{ Ф}, k_0 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/В},$

$L = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Начальная добротность цепи при таких ее параметрах равна $Q_0 = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{(C_0 + k_0 U_0)(R + R_n)}} \approx 1,36$.

Для сравнения энергетических характеристик при разряде нелинейного и линейного конденсаторов на одну и ту же линейную нагрузку R_n промоделируем разряд не нее суперконденсатора емкостью $C = C_0 + k_0 \cdot U_C$, и разряд ЛК емкостью $C_{\text{ЛК}} = C_0$ (при одном и том же начальном напряжении на конденсаторах $U(0) > 0$).

В табл. 1 представлены результаты расчета потерь электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ и КПД ее передачи в нагрузку η , а на рис. 2 представлено изменение напряжений на конденсаторе (U_C) и нагрузке ($U_{Rн}$) при разряде СК и ЛК на линейную нагрузку при разрядном переходном процессе с нерегулируемой длительностью.

Таблица 1 – Энергетические характеристики цепей разряда СК и ЛК на активную нагрузку

Энергетические характеристики	Разряд ЛК на нагрузку R_n	Разряд СК на нагрузку R_n
W_C , Дж	2,0	3,6
$W_{Rн}$, Дж	1,85	3,34
$W_{\text{потерь}}$, Дж	0,15	0,26
КПД η	0,92	0,93

Из табл. 1 видно, что КПД передачи энергии в нагрузку η при нерегулируемой длительности разрядного переходного процесса имеет практически одинаковое значение, как при разряде СК, так и при разряде ЛК.

При этом энергия, отобранная от конденсатора, и энергия, поступившая в нагрузку, при разряде СК в 1,8 раза больше, чем при разряде ЛК на ту же нагрузку.

Также были исследованы энергетические характеристики разряда СК при регулировании длительности переходного процесса.

Регулирование осуществлялось принудительным прерыванием разряда с помощью ГТО-коммутатора при достижении тока в нагрузке величин, равных $I_{\text{max}}/4$, $I_{\text{max}}/3$, $I_{\text{max}}/2$ и I_{max} . Также анализировался режим, когда ГТО-коммутатор закрывался при прохождении напряжения на нем через ноль. При этом ток в нагрузке достигал значения $I_{Rн \text{ откл}} \approx 530$ А.

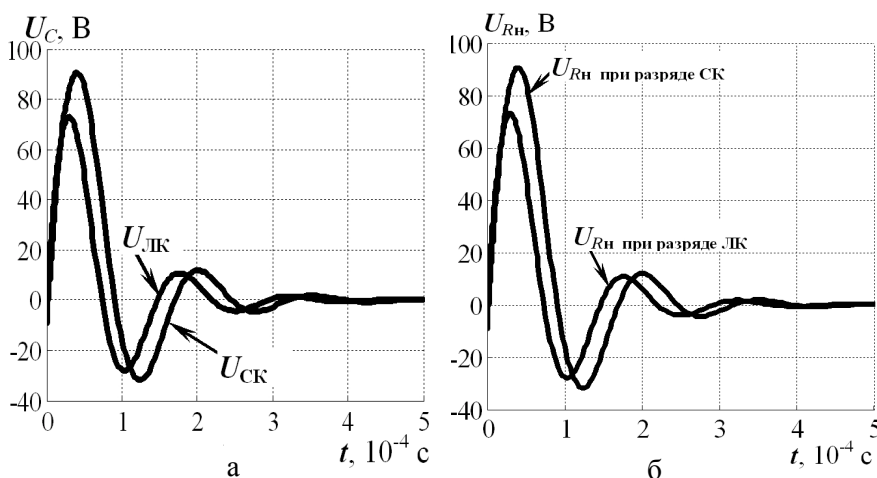


Рис. 2 Изменение напряжений на конденсаторе (U_C) и нагрузке ($U_{Rн}$) при разряде СК и ЛК на линейную нагрузку

Таблица 2 – Энергетические характеристики цепей регулируемого разряда СК и ЛК на активную нагрузку

Величина тока в нагрузке $I_{Rн \text{ СК}} / I_{Rн \text{ ЛК}}$, А	$I_{\text{max}}/4$	$I_{\text{max}}/3$	$I_{\text{max}}/2$	I_{max}	$I_{Rн \text{ откл}}$
$W_{\text{потерь СК}}$, Дж	1,22	1,66	2,46	2,72	0,39
$W_{\text{потерь ЛК}}$, Дж	0,12	0,2	0,36	1,0	0,75
КПД $\eta_{СК}$	0,06	0,08	0,13	0,48	0,89
КПД $\eta_{ЛК}$	0,07	0,1	0,15	0,44	0,62

В табл. 2 приведены результаты расчетов потерь электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ и КПД ее передачи в нагрузку η при разрядах нелинейного и линейного конденсаторов и регулировании длительности разрядов посредством полностью управляемого ключа (ГТО-коммутатора).

Как следует из табл. 2 при принудительном прерывании разряда как линейного, так и нелинейного конденсатора до момента, когда ток в цепи достигнет своего максимального значения потери электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ увеличиваются, достигая своего максимального значения при I_{max} , после чего начинают уменьшаться. При этом КПД передачи энергии в нагрузку η (и ЛК, и СК) увеличивается во всем рассматриваемом диапазоне. Отметим, что КПД СК превышают соответствующие КПД ЛК.

Сравнивая КПД η СК и ЛК при нерегулируемом (табл. 1) и регулируемом разряде (табл. 2) можно сделать вывод, что при-

нудительное прерывание разрядного процесса понижает величину η . Однако во многих высокочастотных технологических процессах требуется уменьшение длительности разряда (в частности для искроэрозионной обработки материалов), что вызывает необходимость использования управляемых полупроводниковых коммутаторов. При использовании полупроводникового ключа (ГТО) и прерывании разряда при прохождении напряжения на ключе через ноль, КПД СК достаточно высок ($\eta_{СК} = 0,89$, табл. 2) и сравним с КПД СК нерегулируемого разряда ($\eta_{СК} = 0,92$, табл. 1), тогда как для ЛК соответствующие КПД значительно отличаются ($\eta_{ЛК} = 0,89$ с ГТО и $\eta_{ЛК} = 0,62$ без ГТО).

Выводы. 1. Определены закономерности изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в нагрузку при разряде (как с нерегулируемой, так и с регулируемой длительностью) суперконденсатора, являющегося нелинейным элементом электрической цепи.

Установлено, что КПД передачи электроэнергии в линейную активную нагрузку от суперконденсатора и линейного конденсатора увеличиваются во всем рассмотренном временном диапазоне прерывания разрядного тока конденсаторов, причем КПД СК во все моменты времени разряда остается большим, чем КПД ЛК.

2. Показано, что энергия, поступившая в нагрузку, при разряде суперконденсатора в 1,8 раза больше, чем при разряде обычного линейного конденсатора, заряженного до такого же напряжения. Причем при прерывании тока разряда как линейного, так и нелинейного конденсаторов во временном диапазоне до момента достижения разрядным током максимального значения потери электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ увеличиваются, достигая максимального значения при $I=I_{\text{max}}$, после чего начинают уменьшаться.

Установлено, что при нерегулируемом и регулируемом разряде обычного и нелинейного конденсаторов на линейную активную нагрузку принудительное прерывание разрядного тока снижает величину КПД передачи энергии от конденсаторов в нагрузку, что необходимо учитывать при оптимизации законов регулирования длительности импульсных токов в нагрузке.

Список литературы: 1. Винниченко Д.В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / Винниченко Д.В. // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 129–131. 2. Изотов В.Ю. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2008. – № 6. – С. 114–118. 3. Супруновская Н.И. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–12. 4. Супруновская Н.И. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, Д.С. Ivashchenko, О.А. Белецкий // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3–11. 5. Шидловский А.К. Энергетические процессы в электрических цепях разрядноимпульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда / А.К. Шидловский, Н.И. Супруновская // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 42–48. 6. Щерба А.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. –К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 65–74. 7. Beguin F. Supercapacitors: Materials, Systems and Applications / Beguin F., Frackowiak E. / First Edition, 2013. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 527 p. 8. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / Burke A. // Proc. of the IEEE. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. 9. Burke A. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / Burke A., Miller M. // Journ. of the Power Sources. Iss. 1. V. 196. Jan. 2011. 514–522. 10. Burke A. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / Burke A., Miller M., Zhao H. // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. 11. Maletin Y. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles / Maletin Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobnyi D. // Journ. of Energy and Power Engineering. No. 9. 2015. 585–591. 12. Mihailescu B. Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / Mihailescu B., Svasta P., Varzaru G // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C. Iss. 2. V. 75. 2013. P. 277–290. 13. Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A. // Journ. of Power Sources. No. 2. V. 165. 2007. P. 928–934. 14. Zubieta L. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / Zubieta L., Bonert R. // IEEE Trans. On Industry Applications. No. 1. V. 36. January-February 2000. 199–205.

Bibliography (transliterated): 1. Vinnychenko, D.V. «Vyznachennya optymal'nyh harakterystyk vysokovol'noyi elektrorozryadnoyi systemy dlya realizatsiyi tehnologiyi elektroimpul'snogo syntezu nanovugletsyu.» *Theknichna. elektrodynamika*. No. 4. 2014. 129–131. Print. 2. Izotov, V.Yu., D.G. Gromadsky and Yu.A. Maletin «Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor.» *Naukovi visti NTUU «KPI»*. No. 6. 2008. 114–118. Print. 3. Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A. «Protsepsy pereraspredeleniya jelektricheskoy jenergii mezhdru parallel'no soedinyonnymi kondensatorami.» // *Theknichna. elektrodynamika*. No. 4. 2015. 3–12. Print. 4. Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A., Ivashchenko, D.S. and Beletsky, O.A. «Protsepsy obmena jenergiej mezhdru nelineynymi i lineynymi zven'yami jelektricheskoy shemy zameshcheniya superkondensatorov.» *Theknichna elektrodynamika*. No. 5. 2015. 3–11. Print. 5. Shydlovsky, A.K., Suprunovskaya, N.I. «Jenergeticheskie protsepsy v jelektricheskikh tsepyah razryadnoimpul'snyh ustanovok s emkostnymi nakopitelyami jenergii pri ogranichenii dlitel'nosti ego razryada na jelektoiskrovuyunagruzku i nenulevyh usloviyah ego zaryada.» *Theknichna elektrodynamika*. No. 1. 2010. 42–48. Print. 6. Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Beletsky, O.A. «Jenergeticheskie harakteristiki superkondensatorov pri ih zaryade otistochnika napryazheniya i razryade na rezistivnyuyu nagruzku.» *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Zbimyk nauk. prats. Kiev: IED NANU*. No. 39. 2014. 65 – 74. Print. 7. Beguin, F., Frackowiak, E. *Supercapacitors: Materials, Systems and Applications*. First Edition, 2013. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 527 p. Print. 8. Burke, A. «Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles.» *Proc. of the IEEE*. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. Print. 9. Burke, A., Miller, M. «The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications.» *Journ. of the Power Sources*. 1. 196. (Jan. 2011). 514–522. Print. 10. 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. Print. 11. Maletin, Y., Stryzhakova, N., Zelinskyi, S., Chernukhin, S., Tretyakov, D., Mosqueda, H., Davydenko, N., and Drobnyi, D. «New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles.» *Journ. of Energy and Power Engineering*. No. 9. 2015. 585–591. Print. 12. Mihailescu, B., Svasta, P., Varzaru, G. «Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications.» *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C*. 2.75. 2013. 277–290. Print. 13. Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Crausaz, A., and Berthon, A. «Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling.» *Journ. of Power Sources*. No. 2. 165. 2007. 928–934. Print. 14. Zubieta, L., Bonert, R. «Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications.» *IEEE Trans. On Industry Applications*. No. 1. 36. January-February 2000. 199–205. Print.

Поступила (received) 31.08.2015