

УДК 621.3.011:621.372

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Н.И.Супруновская, канд.техн.наук, А.А.Щерба, чл.-корр. НАН Украины
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. E-mail: iednat@ied.org.ua

Исследованы процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами различной емкости, заряженными до разных напряжений. Установлены особенности влияния соотношения емкостей конденсаторов, а также их начальных и конечных напряжений на возникающие потери электроэнергии при ее перераспределении между конденсаторами. Определены условия уменьшения таких потерь и увеличения коэффициента передачи электрической энергии от одного конденсатора к другому. Библ. 16, рис. 4, табл. 3.

Ключевые слова: энергетические процессы, конденсаторы, потери электроэнергии, коэффициент передачи энергии.

Введение. Конденсаторы нашли широкое применение в качестве накопителей электрической энергии в электроразрядных установках для реализации в нагрузке импульсной мощности, в десятки – сотни раз превышающей мощность питающей электросети [1, 3–7]. Изменяя дозу электроэнергии в конденсаторах, длительность и частоту их разрядных токов, можно регулировать плотность энергии, выделяемой в нагрузку, и реализовывать технологии, неосуществимые при непрерывном энергетическом воздействии. В настоящее время созданы электроразрядные установки для высокоэффективной электрогидравлической [1], ударной электродуговой [3], магнито-импульсной [7], размерной и объемной электроэрозионной [6, 11–16] и других видов обработки материалов, сред и изделий.

Для оптимизации импульсной мощности и скорости нарастания токов в нагрузке обычно применяют структурно-параметрический синтез цепей накопительных конденсаторов [1, 3–11, 16]. Во многих схемах электроразрядных установок применяют несколько конденсаторов различной емкости, которые разряжают на нагрузку с временной задержкой для регулирования в ней формы импульсных токов [1, 5, 6]. В установках, содержащих полупроводниковые формирователи постоянного напряжения с фильтрующими конденсаторами большой емкости, применяют дополнительные дозирующие конденсаторы для более точного регулирования энергии в нагрузке [1, 3–11, 16]. Дополнительные дозирующие конденсаторы малой емкости применяют также во входных цепях полупроводниковых преобразователей для стабилизации мощности, потребляемой ими от сети [5].

Таким образом, параллельное подключение конденсаторов различной емкости является одним из распространенных методов регулирования динамических параметров электроразрядных установок. При реализации такого метода обычно принимается, что обмен электроэнергией между параллельно соединяемыми конденсаторами происходит без энергопотерь. Но наши исследования показали, что в некоторых случаях такие потери могут быть недопустимо большими, причем их величина зависит от емкостей конденсаторов и их напряжений.

Поэтому целью работы было определение закономерностей влияния соотношения емкостей, а также начальных и конечных напряжений конденсаторов на потери электроэнергии при ее перераспределении между параллельно соединенными конденсаторами.

На рис. 1 показана электрическая схема замещения разрядно-импульсной установки с двумя параллельно-соединенными конденсаторами C_1 и C_2 , между которыми после включения коммутатора K_2 в момент времени $t=0$ может возникать перераспределение электрической энергии, если до коммутации конденсаторы были заряжены до разных напряжений, т.е. если $U_{C_1}(0-) \neq U_{C_2}(0-)$.

Условия и принятые допущения:

– индуктивность конденсаторов и проводов схемы на рис. 1 является пренебрежимо малой;

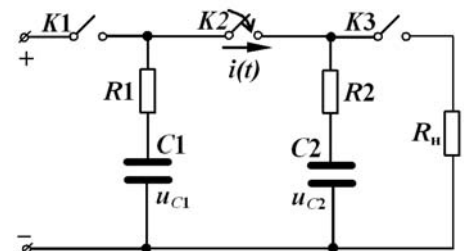


Рис. 1

- внутренние активные сопротивления конденсаторов $R_1 \neq R_2$ и их емкости $C_1 \neq C_2$;
- до включения коммутатора $K2$ в момент времени $t = 0$ для напряжений на конденсаторах выполняется неравенство $|U_{C1}(0-)| > |U_{C2}(0-)|$;
- после включения коммутатора $K2$ коммутаторы $K1$ и $K3$ остаются выключенными до момента времени $t = t_n$, при котором напряжения на конденсаторах устанавливаются одинаковыми $U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n)$ с точностью, необходимой для работы схемы.

Анализ изменения напряжений на конденсаторах. На основании закона о неизменности суммарного заряда на конденсаторах до и после их параллельного соединения [2] можно записать, что

$$q_1(0-) + q_2(0-) = q_1(0+) + q_2(0+) = q_1(t) + q_2(t), \quad (1)$$

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 $t \leq t_n$ в течение процесса заряда конденсатора $C2$ от конденсатора $C1$.

Поскольку $q_1 = C_1 U_{C1}$ и $q_2 = C_2 U_{C2}$ [2], тогда выражение (1) можно записать в виде

$$C_1 U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-) = C_1 U_{C1}(t) + C_2 U_{C2}(t), \quad (2)$$

из которого следует, что в моменты времени $t \leq t_n$ после коммутации напряжение на конденсаторе $C2$

$$U_{C2}(t) = U_{C2}(0-) + [U_{C1}(0-) - U_{C1}(t)] \cdot C_1 / C_2. \quad (3)$$

При $t \geq t_n$ процесс заряда конденсатора $C1$ от конденсатора $C2$ будет завершен, напряжения на них будут одинаковыми и согласно выражению (2) равными

$$U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n) = [C_1 U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-)] / (C_1 + C_2). \quad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), для любого напряжения $U_{C1}(t)$ во время разряда конденсатора $C1$ от $U_{C1}(0-)$ до $U_{C1}(t_n)$ можно определить напряжение $U_{C2}(t)$ на конденсаторе $C2$, перераспределение электрической энергии между конденсаторами и возникающие при этом энергопотери.

Для определения закономерностей изменения текущего напряжения на конденсаторах необходимо применять методы анализа переходных процессов в электрических цепях [2]. Согласно второму закону Кирхгофа и с учетом условий $R_1 + R_2 = R$, $|U_{C1}(0-)| > |U_{C2}(0-)|$ для изменяющихся во времени напряжений $u_{C1}(t)$, $u_{C2}(t)$ и тока $i(t)$ в цепи $C1-R1-R2-C2-C1$ на рис. 1 после включения коммутатора $K2$ можно записать уравнение

$$u_{C1}(t) = i(t) R + u_{C2}(t). \quad (5)$$

Так как конденсатор $C1$ разряжается, а конденсатор $C2$ заряжается, то можно записать, что

$$u_{C1} = q_{C1} / C_1 = - \int i dt / C_1, \quad (6) \quad u_{C2} = q_2 / C_2 = \int i dt / C_2. \quad (7)$$

Подставив выражения (6) и (7) в уравнение (5), выполнив его дифференцирование и преобразование, получим дифференциальное уравнение для тока $i(t)$

$$\frac{di(t)}{dt} R + \frac{C_2 + C_1}{C_2 C_1} i(t) = 0. \quad (8)$$

Решением такого уравнения является выражение вида

$$i(t) = [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)] R^{-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{C_2 + C_1}{C_2 C_1 R} \right) t \right]. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6) и (7) и выполнив интегрирование, определим выражения для $u_{C1}(t)$, $u_{C2}(t)$

$$u_{C1}(t) = U_{C1}(0-) - \frac{C_2}{C_2 + C_1} [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)] \cdot \left(1 - \exp \left[- \frac{C_2 + C_1}{C_2 C_1 R} t \right] \right), \quad (10)$$

$$u_{C2}(t) = U_{C2}(0-) + \frac{C_1}{C_2 + C_1} [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)] \cdot \left(1 - \exp \left[- \frac{C_2 + C_1}{C_2 C_1 R} t \right] \right). \quad (11)$$

После окончания переходного процесса при $t \geq t_n$ напряжения на конденсаторах уравниваются и их значения можно определить из выражения (4), а также из (10) и (11) с учетом того, что при $t = t_n$ экспоненциальный член можно считать равным нулю, так как переходной процесс уже завершился

$$U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n) = \frac{C_1 U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-)}{C_2 + C_1}. \quad (12)$$

В случае $C_1 = C_2$ конечные напряжения на конденсаторах не зависят от значений емкостей конденсаторов и согласно (12) могут быть определены как

$$U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n) = \frac{U_{C1}(0-) + U_{C2}(0-)}{2}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что если напряжения $U_{C1}(0-)$ и $U_{C2}(0-)$ равны по величине, но различны по знаку, то после окончания переходного процесса оба конденсатора разрядятся до нуля.

Примечательно, что если активное сопротивление цепи $R = R_1 + R_2 = 0$, то длительность переходного процесса также будет равна нулю, а $t_n = 0+$, тогда при $U_{C2}(0-) = 0$ из (13) получим, что

$$U_{C1}(0+) = U_{C2}(0+) = U_{C1}(0-)/2. \quad (14)$$

Для указанного случая выражение (14) отражает нарушение условия непрерывности напряжения на емкостях $C1$ и $C2$ [2] при мгновенном включении коммутатора $K2$ в схеме на рис. 1. Возникают так называемые "некорректные" условия коммутации конденсаторов $C1$ и $C2$, при которых их напряжения до и после коммутации не равны. В таком случае следует применять более общий закон о сохранении суммарного заряда двух конденсаторов до и после коммутации [2].

Для проверки полученных аналитических зависимостей были проведены экспериментальные исследования, в которых использовались два конденсатора одинаковой емкости 470 мкФ. Один из конденсаторов $C1$ разряжался на второй $C2$ через резистор, активное сопротивление R которого изменялось от 20 до 2000 Ом. Конденсатор $C1$ до начала коммутации во всех экспериментах принудительно подзаряжался до напряжения $U_{C1}(0-)=200$ В. Конденсатор $C2$ перед первой коммутацией был полностью разряжен ($U_{C2}(0-) = 0$) и в ходе исследований больше не подзаряжался.

Таблица 1

$C_1 = C_2 = 470$ мкФ, $U_{C1}(0-) = 200$ В, $R = \text{var}$						
№ эксперимента	1	2	3	4	5	6
$U_{C2}(0-)$, В	0	100	149,8	174,6	186,9	193,1
$U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n)$, В	100	149,8	174,6	186,9	193,1	196,8

В табл. 1 приведены результаты экспериментов, которые с учетом погрешностей измерения подтверждают полученную аналитическую зависимость (13) между начальными и конечными напряжениями конденсаторов $C1$ и $C2$.

Анализ перераспределения энергии между конденсаторами $C1$ и $C2$ при $|U_{C1}(0-)| > |U_{C2}(0-)|$.

Для анализа энергетических процессов между конденсаторами введем такие характеристики:

– энергопотери W_R в сопротивлении R , определяемые как разность суммарных энергий в конденсаторах до коммутации и после завершения переходного процесса при $t=t_n$

$$W_R = W_{C1}(0-) + W_{C2}(0-) - W_{C1}(t_n) - W_{C2}(t_n); \quad (15)$$

– коэффициент преобразования энергии K , равный отношению общей энергии конденсаторов $C1$ и $C2$ после энергообмена между ними к их суммарной энергии до коммутации

$$K = [W_{C1}(t_n) + W_{C2}(t_n)] / [W_{C1}(0-) + W_{C2}(0-)]; \quad (16)$$

– коэффициент полезного действия η , равный отношению энергии, поступившей в конденсатор $C2$, к энергии, отобранной у конденсатора $C1$ при энергообмене между ними

$$\eta = [W_{C2}(t_n) - W_{C2}(0-)] / [W_{C1}(0-) - W_{C1}(t_n)], \quad (17)$$

где $W_{C1}(0-)$, $W_{C2}(0-)$, $W_{C1}(t_n)$ и $W_{C2}(t_n)$ – энергии, накопленные в конденсаторах $C1$ и $C2$ соответственно до коммутации и после окончания переходного процесса.

Эти энергии определяются следующими формулами:

$$W_{C1}(0-) = C_1 U_{C1}^2(0-)/2, \quad (18) \quad W_{C1}(t_n) = C_1 U_{C1}^2(t_n)/2, \quad (19)$$

$$W_{C2}(0-) = C_2 U_{C2}^2(0-)/2, \quad (20) \quad W_{C2}(t_n) = C_2 U_{C2}^2(t_n)/2. \quad (21)$$

Подставив (18) – (21) в (15) – (17) и выполнив преобразования с учетом (12), получим

$$W_R = \frac{C_2 C_1}{2(C_2 + C_1)} [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)]^2. \quad K = \frac{[C_1 U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-)]^2}{(C_1 + C_2) [C_1 U_{C1}^2(0-) + C_2 U_{C2}^2(0-)]}, \quad (22, 23)$$

$$\eta = \frac{C_1 U_{C1}(0-) + (C_1 + 2C_2) U_{C2}(0-)}{(2C_1 + C_2) U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-)}. \quad (24)$$

Из формул (22) – (24) видно, что потери энергии W_R , коэффициент ее преобразования K и КПД η заряда конденсатора $C2$ от $C1$ не зависят от величины активного сопротивления R .

Если емкости конденсаторов одинаковы ($C_1 = C_2 = C$), то выражения (22) – (24) упрощаются:

$$W_R = \frac{C}{4} [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)]^2, \quad K = \frac{[U_{C1}(0-) + U_{C2}(0-)]^2}{2[U_{C1}^2(0-) + U_{C2}^2(0-)]} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{U_{C1}(0-) + 3U_{C2}(0-)}{3U_{C1}(0-) + U_{C2}(0-)}. \quad \text{В этом случае значения коэффициентов } K \text{ и } \eta \text{ зависят только от начальных напряжений конденсаторов.}$$

При условии, что емкость $C_1 \neq C_2$, а напряжение до коммутации $U_{C_2}(0^-) = 0$, то выражения (22) – (24) преобразуются в формулы: $W_R = \frac{C_1 C_2}{2(C_1 + C_2)} U_{C_1}^2(0^-)$, $K = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ и $\eta = \frac{C_1}{C_2 + 2C_1}$, из которых видно, что коэффициенты K и η зависят лишь от соотношения емкостей конденсаторов.

Для случая $U_{C_2}(0^-) = 0$ и $C_1 = C_2 = C$ из (22) – (24) получим, что $K = 1/2$ и $\eta = 1/3$ при всех значениях $C_1 = C_2$, $U_{C_1}(0^-)$ и $U_{C_1}(t_n) = U_{C_2}(t_n)$, а энергия потерь $W_R = C U_{C_1}^2(0^-)/4$ зависит от начального напряжения $U_{C_1}(0^-)$ на разряжаемом конденсаторе C_1 и емкости конденсаторов C .

Для сравнения отметим, что при заряде полностью разряженного конденсатора от идеального источника постоянного напряжения КПД цепи заряда η всегда равен $1/2$ [2].

Из полученных результатов можно также сделать вывод, что при перераспределении энергии между параллельно соединенными конденсаторами ее потери W_R , коэффициент преобразования K и КПД η не зависят от величины суммарного сопротивления конденсаторов, соединительных проводов и включенного коммутатора R , включая идеальный случай $R = 0$, соответствующий бесконечно малой длительности послекоммутационного переходного процесса ($t_n \rightarrow 0$).

В таком случае в работе [2] осуществляют интегрирование изменяющихся параметров электрической цепи за время коммутации от $t=0^-$ до $t=0^+$, принимая таким образом, что это время не равно нулю. Учет времени коммутации, которое может быть каким угодно малым, но конечным, сводится к анализу процесса обмена энергией между конденсаторами, который должен завершаться за время коммутации. При этом энергия потерь должна выделяться в коммутаторе, контактное сопротивление которого уменьшается от бесконечного до нулевого значения. Таким образом, такой подход основывается на анализе коммутационных процессов при быстро изменяющемся сопротивлении коммутатора, а не на исследовании переходных процессов после его мгновенного включения.

Введение безразмерных относительных характеристик, независимых от абсолютных значений напряжений $U_{C_1}(0^-)$ и $U_{C_2}(0^-)$. Введем коэффициент $k = C_2/C_1$ и вместо энергии потерь W_R – приведенную энергию, определяемую по формуле $W_R^* = W_R/W_{C_1}(0^-)$, подставляя в которую выражения (22) и (18) и $C_2 = kC_1$, получим

$$W_R^* = k(U_{C_2}^*(0^-) - 1)^2 / (1 + k), \quad (25)$$

где приведенное начальное напряжение конденсатора C_2 определено как $U_{C_2}^*(0^-) = U_{C_2}(0^-)/U_{C_1}(0^-)$.

Таблица 2

$k = C_2/C_1$	$k = 0,1$			$k = 1$			$k = 10$		
$U_{C_2}^*(0^-)$	W_R^*	K	η	W_R^*	K	η	W_R^*	K	η
1	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00
0,9	0,00	1,00	0,95	0,01	1,00	0,95	0,01	1,00	0,95
0,8	0,00	1,00	0,90	0,02	0,99	0,89	0,04	1,00	0,89
0,7	0,01	0,99	0,85	0,05	0,97	0,84	0,08	0,99	0,83
0,6	0,01	0,99	0,80	0,08	0,94	0,78	0,15	0,97	0,76
0,5	0,02	0,98	0,74	0,13	0,90	0,71	0,23	0,94	0,68
0,4	0,03	0,97	0,69	0,18	0,84	0,65	0,33	0,87	0,59
0,3	0,04	0,96	0,64	0,25	0,78	0,58	0,45	0,77	0,49
0,2	0,06	0,94	0,58	0,32	0,69	0,50	0,58	0,58	0,37
0,1	0,07	0,93	0,53	0,41	0,60	0,42	0,74	0,33	0,24
0	0,09	0,91	0,48	0,50	0,50	0,33	0,91	0,09	0,08
-0,1	0,11	0,89	0,42	0,61	0,40	0,24	1,10	0,00	0
-0,2	0,13	0,87	0,37	0,72	0,31	0,14	1,31	0,06	0
-0,3	0,15	0,85	0,31	0,85	0,22	0,04	1,54	0,19	0
-0,4	0,18	0,82	0,25	0,98	0,16	0	1,78	0,31	0
-0,5	0,20	0,80	0,20	1,13	0,10	0	2,05	0,42	0
-0,6	0,23	0,78	0,14	1,28	0,06	0	2,33	0,49	0
-0,7	0,26	0,75	0,08	1,45	0,03	0	2,63	0,55	0
-0,8	0,29	0,72	0,02	1,62	0,01	0	2,95	0,60	0
-0,9	0,33	0,70	0	1,81	0,00	0	3,28	0,64	0
-1	0,36	0,67	0	2,00	0,00	0	3,64	0,67	0

Разделив числитель и знаменатель выражения (23) на $U_{C_1}^2(0^-)$, а выражения (24) – на $U_{C_1}(0^-)$, и выполнив преобразование с учетом $C_2 = kC_1$, выразим K и η через приведенное напряжение $U_{C_2}^*(0^-)$ и k

$$K = \left(1 + kU_{C_2}^*(0^-)\right)^2 / \left(1 + k\right) \left(1 + kU_{C_2}^{*2}(0^-)\right), \quad (26)$$

$$\eta = \left(1 + (1 + 2k)U_{C_2}^*(0^-)\right) / \left(2 + k + kU_{C_2}^*(0^-)\right). \quad (27)$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов W_R^* , K и η по формулам (25) – (27) при изменении $U_{C_2}^*(0^-)$ от -1 до $+1$ и при $k = C_2/C_1 = 0,1; 1; 10$. Отметим, что согласно (27) существуют условия, при которых $\eta \leq 0$

$$U_{C_2}^*(0^-) = \frac{U_{C_2}(0^-)}{U_{C_1}(0^-)} \leq -1/(1 + 2k). \quad (28)$$

КПД $\eta \leq 0$ при соблюдении трех условий: 1) согласно (28) начальные напряжения на C_1 и C_2 имеют разную поляр-

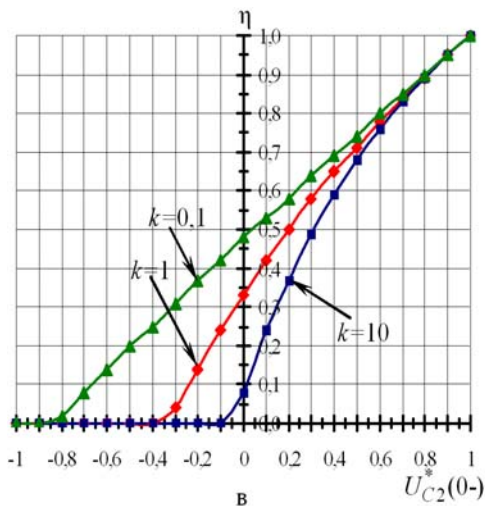
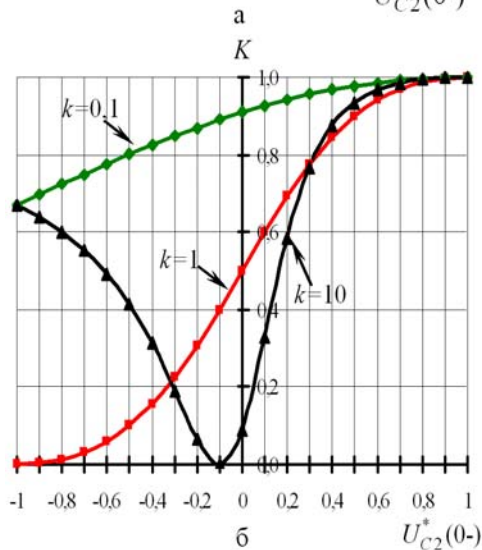
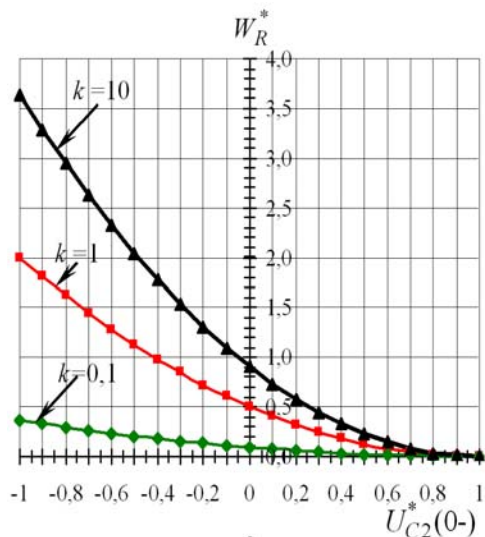


Рис. 2

Таким образом для уменьшения потерь и повышения КПД и коэффициента преобразования энергии конденсаторов при энергообмене между ними необходимо увеличивать отношение емкостей разряжаемого и заряжаемого конденсаторов (т.е. C_1/C_2) и отношение их начальных напряжений (т.е. $U_{C1}(0-)/U_{C2}(0-)$).

На рис. 3, а – в показаны зависимости W_R^* , K , η от коэффициента k при $U_{C2}^*(0-)=1; 0,5; 0; -0,5; -1$.

ность; 2) по окончании процесса энергообмена конечное напряжение на C_1 остается той же полярности, а на C_2 изменяет свою полярность; 3) когда $|U_{C2}(t_n)| \leq |U_{C2}(0-)|$. При $|U_{C2}(t_n)| = |U_{C2}(0-)|$ из (20) и (21) $W_{C2}(t_n) = W_{C2}(0-)$ и согласно (17) значение η будет равно нулю. Если же выполняется условие $|U_{C2}(t_n)| < |U_{C2}(0-)|$, то получим, что $W_{C2}(t_n) < W_{C2}(0-)$ и $\eta < 0$. Таким образом, при соблюдении условий 1) – 3) в активном сопротивлении цепи рассеивается энергия, отобранная либо только от C_1 (тогда $\eta = 0$), либо – от обоих конденсаторов (тогда $\eta < 0$). Но, поскольку при этом полезного действия (передачи энергии от C_1 в C_2) нет, а вся отобранная энергия уходит в потери, то принято, что для всех таких режимов $\eta = 0$.

На рис. 2 результаты расчетов представлены в виде зависимостей от приведенного напряжения $U_{C2}^*(0-)$:

а – приведенной энергии потерь W_R^* , б – коэффициента K , в – КПД η .

Из табл. 2 и рис. 2, а видно, что при изменении напряжения $U_{C2}^*(0-)$ от +1 до –1 приведенная энергия потерь W_R^* для всех рассматриваемых случаев возрастает от нуля до своего максимального значения. Причем, чем больше k (емкость заряжаемого конденсатора C_2 относительно C_1), тем значение W_R^* больше. Так при увеличении k в 10 раз от 0,1 до 1 максимальная приведенная энергия потерь W_R^* возрастает в 5,6 раз, а от 1 до 10 – в 1,8 раза.

Из выражения (26) следует, что коэффициент преобразования энергии $K=0$ при $U_{C2}^*(0-) = -1/k$. Это видно на рис. 2, б при $k=10$ и $U_{C2}^*(0-) = -0,1$, а также при $k=1$ и $U_{C2}^*(0-) = -1$. В этих случаях конечные напряжения $U_{C1}(t_n) = U_{C2}(t_n) = 0$, и соответственно суммарная конечная энергия в конденсаторах также равна нулю.

Примечательно, что при $k=10$ и дальнейшем уменьшении напряжения $U_{C2}^*(0-)$ ниже значения –0,1 коэффициент K снова начинает возрастать. Это объясняется тем, что при $U_{C2}^*(0-) < -0,1$ происходит изменение полярности конечного напряжения на C_2 , и, следовательно, конечные напряжения на конденсаторах и их суммарная конечная энергия уже не будут равны нулю.

Из (28) следует, что для $k=0,1; k=1; k=10$, КПД $\eta=0$ соответственно при $U_{C2}^*(0-) \leq -0,83; \leq -0,33; \leq -0,05$ (рис. 2, в).

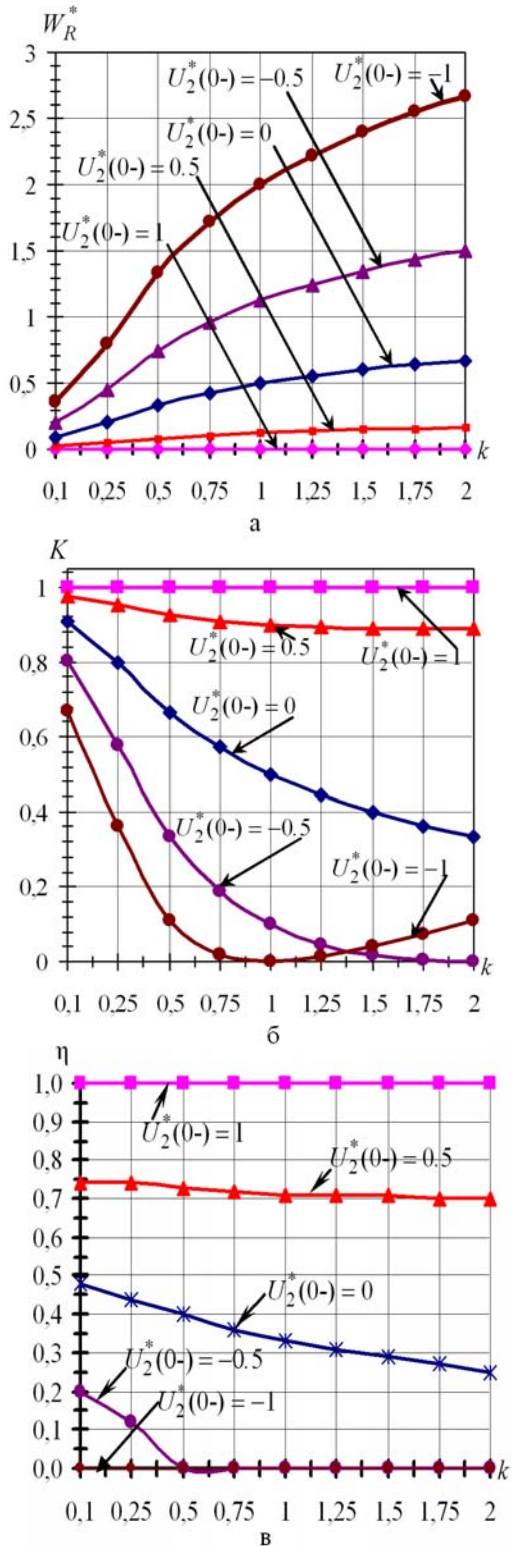


Рис. 3

В табл. 3 приведены расчетные значения, $W_R^*(t_{\text{пр}})$, $K(t_{\text{пр}})$ и $\eta(t_{\text{пр}})$ для трех значений $k=0,5; 1; 2$ (соответствующих случаям $C_1 > C_2$; $C_1 = C_2$; $C_1 < C_2$) и двух значений $U_{C_2}^*(0-) = 0; 0,5$. При расчетах учитывалось, что приведенное конечное напряжение на конденсаторах согласно (4) и с учетом, что $k = C_2/C_1$ и $U_{C_2}^*(0-) = U_{C_2}(0-)/U_{C_1}(0-)$, не может быть ниже величины $(1 + kU_{C_2}^*(0-))/(1 + k)$ (что отражено крестиками в таблице).

Рис. 3, а подтверждает, что уменьшение отношения C_1/C_2 (т.е. увеличение k) увеличивает энергию потерь в цепи. На рис. 3, б значение $K=0$ при $k=2$, $U_{C_2}^*(0-) = -0,5$ и $k=1$, $U_{C_2}^*(0-) = -1$, в соответствии с условием $U_{C_2}^*(0-) = -C_1/C_2 = -1/k$. Из рис. 3, в видно, что КПД $\eta=0$ при $U_{C_2}^*(0-) = -0,5$ и $k \geq 0,5$, а при $U_{C_2}^*(0-) = -1$ при всех k (т.к. из (28) $\eta \leq 0$ при $U_{C_2}^*(0-) \leq -1/(1 + 2k)$ или при $k \geq -(1 + 1/U_{C_2}^*(0-))/2$).

Определение энергетических характеристик W_R , W_R^* , K и η при принудительном прерывании послекоммутационного переходного процесса. Предположим, что разряд конденсатора C_1 принудительно прерывается в произвольный момент времени $t_{\text{пр}}$ ($0 < t_{\text{пр}} < t_n$). При этом приведенное напряжение $U_{C_1}^*(t_{\text{пр}})$ запишем как

$$U_{C_1}^*(t_{\text{пр}}) = U_{C_1}(t_{\text{пр}})/U_{C_1}(0-) = m, \quad (29)$$

где $0 < m < 1$.

Из выражения (3) с учетом k и (29) для напряжения $U_{C_1}^*(t_{\text{пр}})$ получим выражение

$$U_{C_2}^*(t_{\text{пр}}) = U_{C_2}^*(0-) + (1 - m)/k. \quad (30)$$

Из (15) для энергии потерь $W_R(t_{\text{пр}})$ получим

$$W_R(t_{\text{пр}}) = \frac{C_1(U_{C_1}^2(0-) - U_{C_1}^2(t_{\text{пр}}))}{2} + \frac{C_2(U_{C_2}^2(0-) - U_{C_2}^2(t_{\text{пр}}))}{2}. \quad (31)$$

С учетом (29) и (30) выражение (31) преобразуется к виду

$$W_R^*(t_{\text{пр}}) = 1 + m - \frac{1 - m}{k} - 2U_{C_2}^*(0-). \quad (32)$$

Из (16) выражение для $K(t_{\text{пр}})$ запишется как

$$K(t_{\text{пр}}) = \frac{C_1 U_{C_1}^2(t_{\text{пр}}) + C_2 U_{C_2}^2(t_{\text{пр}})}{C_1 U_{C_1}^2(0-) + C_2 U_{C_2}^2(0-)}. \quad (33)$$

Подставляя в (33) выражения (29), (30), получим

$$K(t_{\text{пр}}) = \frac{m^2 + k(U_{C_2}^*(0-) + (1 - m)/k)^2}{1 + k(U_{C_2}^*(0-))^2}. \quad (34)$$

Из (17) выведем выражение для КПД передачи $\eta(t_{\text{пр}})$

$$\eta(t_{\text{пр}}) = \frac{C_2 U_{C_2}^2(t_{\text{пр}}) - C_2 U_{C_2}^2(0-)}{C_1 U_{C_1}^2(0-) - C_1 U_{C_1}^2(t_{\text{пр}})}. \quad (35)$$

С учетом (29), (30) выражение (35) примет вид

$$\eta(t_{\text{пр}}) = (2U_{C_2}^*(0-) + (1 - m)/k)/(1 + m). \quad (36)$$

Таблица 3

$U_{C2}^*(0-)$	$m=U_{C1}(t_{np})/U_{C1}(0-)$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	
$U_{C2}^*(0-)=0$	$U_{C2}^*(t_{np})$	$k=0,5$	0,2	0,4	0,6	×	×	×
		$k=1$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	×
		$k=2$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
	$W_R^*(t_{np})$	$k=0,5$	1,7	1,4	1,1	×	×	×
		$k=1$	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	×
		$k=2$	1,85	1,7	1,55	1,4	1,25	1,1
	$K(t_{np})$	$k=0,5$	0,83	0,72	0,67	×	×	×
		$k=1$	0,82	0,68	0,58	0,52	0,50	×
		$k=2$	0,82	0,66	0,54	0,44	0,38	0,34
	$\eta(t_{np})$	$k=0,5$	0,11	0,22	0,35	×	×	×
		$k=1$	0,05	0,11	0,18	0,25	0,33	×
		$k=2$	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,21
$U_{C2}^*(0-)=0,5$	$U_{C2}^*(t_{np})$	$k=0,5$	0,7	×	×	×	×	×
		$k=1$	0,6	0,70	×	×	×	×
		$k=2$	0,55	0,60	0,65	×	×	×
	$W_R^*(t_{np})$	$k=0,5$	0,7	×	×	×	×	×
		$k=1$	0,8	0,6	×	×	×	×
		$k=2$	0,85	0,7	0,55	×	×	×
	$K(t_{np})$	$k=0,5$	0,94	×	×	×	×	×
		$k=1$	0,94	0,9	×	×	×	×
		$k=2$	0,94	0,91	0,89	×	×	×
	$\eta(t_{np})$	$k=0,5$	0,63	×	×	×	×	×
		$k=1$	0,47	0,67	×	×	×	×
		$k=2$	0,55	0,61	0,68	×	×	×

На рис. 4 результаты расчетов принудительно прерываемого разрядного процесса представлены в виде зависимостей от $m = U_{C1}^*(t_{np}) : a - W_R^*(t_{np}), b - K(t_{np}), в - \eta(t_{np})$. Зависимости построены для значений $k=0,5; 1; 2$ и $U_{C2}^*(0-)=0; 0,5$.

Как следует из табл. 3 и рис. 4, чем раньше прерывается разрядный процесс (т.е. чем больше m), тем ниже его КПД и выше K и W_R^* . Это объясняется тем, что ток в цепи максимален в начале переходного процесса энергообмена между конденсаторами и снижается до нуля к его окончанию. При этом мощность отбора энергии из конденсатора $C1$ уменьшается пропорционально току, а мощность потерь энергии на активном сопротивлении цепи уменьшается пропорционально квадрату тока, поэтому разность этих мощностей, равная мощности поступления энергии в заряжаемый конденсатор $C2$, к концу процесса увеличивается. Поэтому КПД, равный отношению указанной разности этих мощностей к мощности отбора энергии из конденсатора $C1$, является минимальным в начале процесса, а затем увеличивается к его окончанию. Значение коэффициента K уменьшается к концу

процесса энергообмена потому, что суммарные потери в цепи со временем увеличиваются, а соответственно общая энергия в конденсаторах – уменьшается.

Выводы. 1. Установлено, что уменьшение разности начальных напряжений заряжаемого и разряжаемого параллельно соединенных конденсаторов, а также уменьшение соотношения их емкостей вызывает уменьшение потерь электрической энергии и повышение КПД при ее перераспределении между конденсаторами. При этом потери энергии и КПД не зависят от величины активных сопротивлений анализируемой электрической цепи.

В частности, при начальных напряжениях на заряжаемом конденсаторе $U_{C2}(0-)=0$ и разряжаемом конденсаторе – $U_{C1}(0-)>0$, а также изменении коэффициента $k=C_2/C_1$ от 10 до 0,1 (т.е. в 100 раз) значение КПД возрастает от 0,08 до 0,48 (табл. 2). В то же время при $U_{C2}(0-)=0,5 \cdot U_{C1}(0-)$ и тех же изменениях коэффициента k КПД возрастает от 0,68 до 0,74, а при $U_{C2}(0-)=0,9 \cdot U_{C1}(0-)$ – КПД практически не изменяется и равняется 0,95.

2. Определены закономерности изменения КПД и коэффициента преобразования энергии при

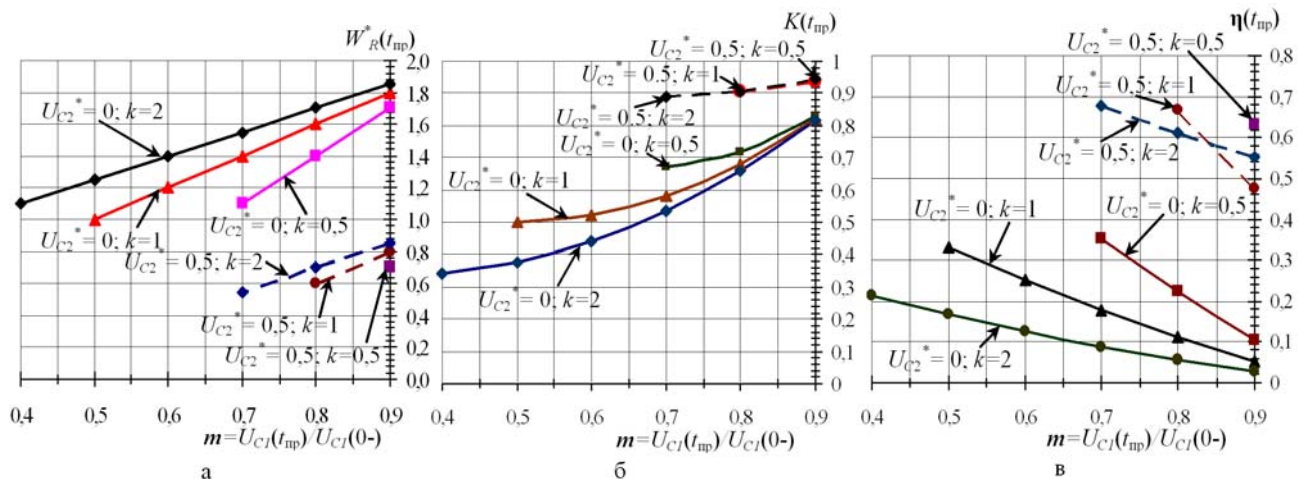


Рис. 4

принудительном прерывании разрядно-зарядного процесса в произвольный момент времени до того, как напряжения на конденсаторах уравниваются. Установлено, что чем раньше прерывается такой процесс, тем больше снижается КПД и повышается коэффициент преобразования энергии.

3. При равенстве емкостей разряжаемого и заряжаемого конденсаторов КПД и коэффициент преобразования энергии зависят лишь от их начальных напряжений и не зависят от их емкости и активного сопротивления цепи конденсаторов. В таком случае при начальном напряжении на заряжаемом конденсаторе $U_{C2}(0^-)=0$ коэффициент преобразования энергии K равен $1/2$, а КПД – $1/3$.

При $U_{C2}(0^-)=0$ и $C_1 \neq C_2$ КПД и коэффициент преобразования энергии зависят лишь от емкостей конденсаторов и не зависят от начального напряжения разряжаемого конденсатора C_1 .

4. Определены зависимости изменения приведенной энергии потерь, КПД и коэффициента преобразования энергии разрядной цепи от приведенного начального напряжения заряжаемого конденсатора. При изменении приведенного начального напряжения на заряжаемом конденсаторе от $+1$ (напряжения на конденсаторах одинаковы по величине и знаку) до -1 (напряжения на конденсаторах одинаковы по величине и различны по знаку) приведенная энергия потерь возрастает от нуля до своего максимального значения, зависящего от соотношения емкостей конденсаторов C_1 и C_2 .

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.

2. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. – Т. 2. – С.-Пб.: Питер, 2003. – 576 с.

3. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Чвертко Н.А. Ударная конденсаторная сварка. – К.: Наук. думка, 1984. – 307 с.

4. Кныш В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 160 с.

5. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 70–75.

6. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

7. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. – М.: Энергия, 1973. – 233 с.

8. 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.

9. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 3–11.

10. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 12–18.

11. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20. – № 2. – Pp. 361–369.

12. Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytzev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 481-482. – № 1-2. – Pp. 643–646.

13. Mysinski W. Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. – Pp. 1–7.

14. Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – № 17. – Pp. 17A756-1.

15. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.

16. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014, Article number 687200, Pp. 50–54. DOI: [10.1109/IEPS.2014.6874200](https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874200).

ПРОЦЕСИ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ МІЖ ПАРАЛЕЛЬНО З'ЄДНАНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Н.І. Супруновська, канд.техн.наук, **А.А. Щерба**, чл.-кор. НАН України,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: iednat@ied.org.ua

Досліджено процеси перерозподілу електричної енергії між паралельно з'єднаними конденсаторами різної ємності, зарядженими до різних напруг. Встановлено особливості впливу співвідношення ємностей конденсаторів, а також їхніх початкових та кінцевих напруг на виникаючі втрати електроенергії при її перерозподілі між конденсаторами. Визначено умови зменшення таких втрат і збільшення коефіцієнта передачі електричної енергії від одного конденсатора до іншого. Бібл. 16, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: енергетичні процеси, конденсатори, втрати електроенергії, коефіцієнт передачі енергії.

PROCESSES OF ENERGY REDISTRIBUTION BETWEEN PARALLEL CONNECTED CAPACITORS

N.I. Suprunovska, A.A. Shcherba

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: iednat@ied.org.ua

The processes of redistribution of electrical energy between parallel connected capacitors of different capacity charged to different voltages are studied. The features of influence of the ratio of capacitor capacities, as well as their initial and final voltages on a loss of electric energy during its redistribution between the capacitors are determined. The conditions of decrease of such losses and increase of coefficient of energy transfer from one capacitor to another one are defined. References 16, figures 4, tables 3.

Keywords: Power processes, capacitors, electric power losses, energy-transfer coefficient.

1. *Vovchenko A.I., Tertilov R.V.* Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // Zbirnyk Naukovykh Prats Natsionalnoho Universytetu Korablebuduvannia. – 2010. – No 4. – Pp. 118–124. (Rus)
2. *Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.* Theory of Electrical Engineering.– Vol. 2. – Sankt-Petersburg: Piter, 2003. – 576 p. (Rus)
3. *Kaleko D.M., Moravsky V.E., Chvertko N.A.* Percussion capacitor welding. – Kyiv: Naukova dumka, 1984. – 307 p. (Rus)
4. *Knysh V.A.* Semiconductor converters in the charge systems of reservoir capacitor. – Leningrad: Energoizdat. Leningradskoe otdelenie, 1981. – 160 p. (Rus)
5. *Kravchenko V.I., Petkov A.A.* Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // Elektrotehnika I Elektromekhanika. – 2007. – No 6. – Pp. 70–75. (Rus)
6. *Livshitz A.L., Otto M.Sh.* Pulse electrotechnology. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 352 p. (Rus)
7. *Friungel F.* Pulse engineering. Generation and application of capacitor discharges. – Moskva: Energiia, 1973. – 233 p. (Rus)
8. *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)
9. *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. 3–12. (Rus)
10. *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)
11. *Casamueva R., Azcondo F.J., Branias C., Bracho S.* Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20. – No 2. – Pp. 361–369.
12. *Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytzev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R.* Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 481-482. – No 1-2. – Pp. 643–646.
13. *Mysinski W.* Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. – Pp. 1–7.
14. *Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E.* MnBi particles with high energy density made by spark erosion // Journal Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – No 17. – Pp. 17A756-1.
15. *Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P.* Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.
16. *Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I.* Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014, Article number 687200, Pp. 50–54. DOI: [10.1109/IEPS.2014.6874200](https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874200).

Надійшла 17.02.2015