

УДК 621.3.011:621.372

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В RL -ЦЕПЯХ, СОЕДИНЯЮЩИХ КОНДЕНСАТОРЫ, ЗАРЯЖЕННЫЕ ДО РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

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: iednat1@gmail.com

Установлено, что потери энергии и коэффициент ее передачи между двумя заряженными до разных напряжений конденсаторами, соединенными через RL -цепь двунаправленным коммутатором (проводящим ток в обоих направлениях), определяются только разностью начальных напряжений на конденсаторах и соотношением их емкостей, и не зависят от величин R и L . В этом случае энергообмен между конденсаторами осуществляется до затухания переходного процесса. В то же время показано, что если RL -цепь подключать к конденсаторам однонаправленным коммутатором и между ними возникнет колебательный процесс энергообмена, то потери энергии будут уменьшаться, а коэффициент ее передачи увеличиваться при уменьшении разности начальных напряжений конденсаторов и с увеличением индуктивности L . Для такого энергообмена установлены зависимости потерь энергии и коэффициента ее передачи между конденсаторами от соотношения их емкостей. Показано, что наибольшие потери энергии возникают при равных емкостях соединяемых конденсаторов для любых значений индуктивности. Библ. 14, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: конденсатор, индуктивность, энергопотери, коэффициент передачи энергии.

Введение. Накопительные конденсаторы широко применяются в цепях различных преобразователей электрической энергии и позволяют реализовывать в линейной и нелинейной нагрузке кратковременные очень мощные импульсы большого тока с высокой скоростью его нарастания [1–3, 6–13]. При необходимости регулирования в нагрузке формы импульсных токов в цепях электрических и полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии возможно применение нескольких накопительных конденсаторов [1–3]. В полупроводниковых преобразователях, содержащих промежуточные формирователи постоянного напряжения, применяют фильтрующие конденсаторы большой емкости и дополнительные конденсаторы для точного дозирования энергии в нагрузке [1, 2, 6, 13]. Известна также электрическая схема замещения суперконденсатора, содержащая несколько параллельно соединенных накопительных конденсаторов различной емкости, сопротивления цепей заряда и разряда которых отличаются на два и более порядков [14].

Обычно в исследованиях большое внимание уделяется анализу потерь электрической энергии в устройствах заряда накопительных конденсаторов от питающей промышленной сети синусоидального тока [1, 2, 4], а также реализации высоких динамических параметров и технологической эффективности электроразрядных установок [3, 6–13]. В то же время потерями электроэнергии при ее обмене между накопительными конденсаторами обычно пренебрегают, что не всегда допустимо, как показано в работе [5]. Но в ней предполагалось отсутствие индуктивности в цепях обмена энергией между конденсаторами, что на практике не всегда допустимо.

Целью данной работы является определение закономерностей изменения коэффициента передачи энергии от одного конденсатора к другому, заряженному до более низкого напряжения, и потерь энергии в соединяющей их RL – цепи при изменении емкостей конденсаторов, их начальных напряжений, а также величины индуктивности и активного сопротивления соединяющей цепи.

На рис. 1 показана электрическая схема замещения формирователя разрядных импульсов с двумя конденсаторами $C1$ и $C2$. Конденсатор $C1$ предварительно заряжается от формирователя постоянного напряжения через дроссель индуктивностью L_0 при включенном коммутаторе $K1$ и отключенных коммутаторах $K2$ и $K3$. После включения $K2$ при отключенных $K1$ и $K3$ второй конденсатор $C2$ заряжается от $C1$ через резистор R и дроссель L .

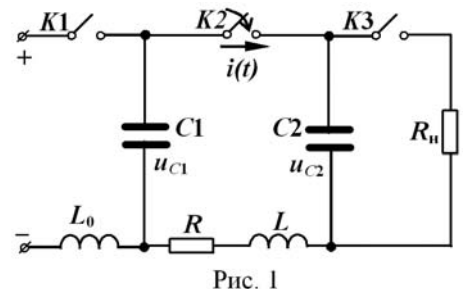


Рис. 1

Включением $K3$ при отключенных $K1$ и $K2$ конденсатор $C2$ может быть разряжен на нагрузку R_n .

Условия заряда конденсатора $C2$ от $C1$ и принятые допущения:

– при включении коммутатора $K2$ в момент времени $t_0 = 0$ для напряжений на $C1$ и $C2$ выполняется неравенство $|U_{C1}(0-)| > |U_{C2}(0-)|$;

– если коммутатор $K2$ после включения проводит ток в обоих направлениях и не отключается в течение времени $\Delta t = t_n$, достаточного для затухания переходного процесса обмена электроэнергией между конденсаторами $C1$ и $C2$, то после завершения такого процесса для напряжений на конденсаторах выполняется равенство $U_{C2}(t_n) \approx U_{C1}(t_n)$ с точностью, необходимой для работы схемы;

– если $K2$ – однонаправленный коммутатор, то апериодический заряд $C2$ от $C1$ ничем не будет отличаться от заряда через предыдущий коммутатор, но колебательный заряд $C2$ от $C1$ станет другим, его длительность будет равна длительности первого полупериода затухающих колебаний в контуре $C1 - K2 - C2 - L - R$ (рис. 1), т.е. он закончится, когда направление тока в индуктивности L начнет изменяться на противоположное;

– при разных начальных условиях заряда $C2$ от $C1$ значения сопротивления R и индуктивности L могут изменяться в широких пределах.

Заряд $C2$ от $C1$ через цепь RL при включении $K2$, проводящего ток в обоих направлениях.

В таком случае на основании закона о неизменности суммарного заряда на конденсаторах $C1$ и $C2$ до и в любой момент времени после их соединения для потери энергии W_R в активном сопротивлении R и коэффициента ее передачи η от $C1$ в $C2$ (под которым принимается отношение энергии, поступившей в $C2$, к энергии, отобранной от $C1$ при энергообмене между ними) были получены выражения

$$W_R = \frac{C_2 C_1}{2(C_2 + C_1)} [U_{C1}(0-) - U_{C2}(0-)]^2, \quad \eta = \frac{C_1 U_{C1}(0-) + (C_1 + 2C_2) U_{C2}(0-)}{(2C_1 + C_2) U_{C1}(0-) + C_2 U_{C2}(0-)}, \quad (1,2)$$

или в относительных единицах

$$W_R^* = k (U_{C2}^*(0-) - 1)^2 / (1 + k), \quad \eta = (1 + (1 + 2k) U_{C2}^*(0-)) / (2 + k + k U_{C2}^*(0-)), \quad (3,4)$$

где $W_R^* = W_R / W_{C1}(0-)$, $k = C_2 / C_1$, $W_{C1}(0-)$ – энергия, накопленная в конденсаторе $C1$ до начала его разряда, $U_{C2}^*(0-) = U_{C2}(0-) / U_{C1}(0-)$.

Из (1) – (4) видно, что при заряде $C2$ от $C1$ значения потерь энергии и коэффициента ее передачи от одного конденсатора к другому зависят только от емкостей конденсаторов и их начальных напряжений и не зависят от величин R и L . Анализ выражений (1) – (4) также показывает, что они аналогичны выражениям, полученным в работе [5] для случая $L = 0$. Это позволяет сделать вывод, что если мы соединяем конденсаторы, предварительно заряженные до разных напряжений, включением коммутатора, проводящего ток в обоих направлениях, то потери энергии и коэффициент ее передачи от одного конденсатора к другому не зависят ни от активного сопротивления, ни от индуктивности соединяющей цепи.

В работе такой вывод был подтвержден расчетами переходного процесса заряда $C2$ от $C1$, возникающего при замыкании коммутатора $K2$, проводящего ток в обоих направлениях, с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink. Результаты расчетов при $C_2 = C_1$, $U_{C2}(0-) = 0$, $U_{C1}(0-) = 1000$ В и при изменении L от 0 до 500 мкГн, а R от 0,1 до 100 Ом подтвердили, что энергия потерь W_R и коэффициент передачи энергии η при указанном энергообмене не зависят от величин индуктивности и активного сопротивления цепи.

Заряд $C2$ от $C1$ через цепь RL при включении однонаправленного коммутатора $K2$.

В качестве однонаправленного коммутатора $K2$ применялся быстродействующий тиристор типа ТБ353-1000, который включался подачей на управляющий электрод положительного относительно катода импульсного напряжения 20 В, а выключался при изменении направления тока в анодно-катодной цепи на противоположное.

Расчет результатов проводился также с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink при $U_{C1}(0-) = 1000$ В, $U_{C2}(0-) = 0$, неизменном значении активного сопротивления ($R = 0,1$ Ом) и равных емкостях конденсаторов ($C_1 = C_2 = 100$ мкФ), но при изменении индуктивности L от 0 до 500 мкГн. Результаты расчета полученных значений W_R , W_R^* и η приведены в таблице.

L , мкГн	W_R , Дж	W_R^*	η
0	24,7	0,5	0,33
0,5	24,1	0,48	0,41
50	6,7	0,14	0,86
500	2,4	0,05	0,95

Из таблицы видно, что увеличение индуктивности L от 0 до

500 мкГн вызывает уменьшение потерь энергии W_R в 10,3 раза и увеличение коэффициента ее передачи η в 2,9 раза. Аналогичные результаты получались при уменьшении сопротивления R и неизменной индуктивности L . Уменьшение R меньше влияет на изменение W_R и η , чем увеличение L . Так, при уменьшении сопротивления R от 100 до 0,1 Ом (в 1000 раз) и неизменной индуктивности L (0,5 мкГн) коэффициент передачи энергии η увеличился в 1,2 раза, а потери энергии W_R уменьшились лишь в 1,04 раза.

На рис. 2 показаны зависимости потерь энергии W_R и коэффициента ее передачи η от C_1 в C_2 при многократном изменении соотношения емкостей заряжаемого и разряжаемого конденсаторов, определяемого коэффициентом $k = C_2 / C_1$, и изменении индуктивности L от 0 до 500 мкГн.

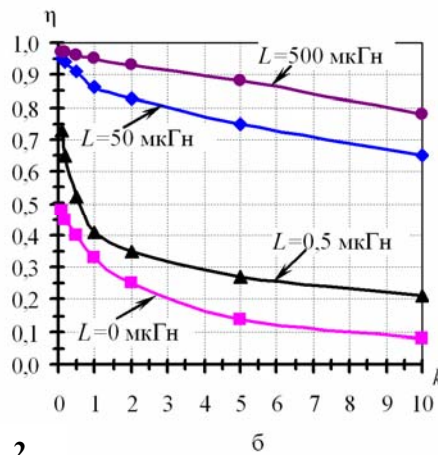
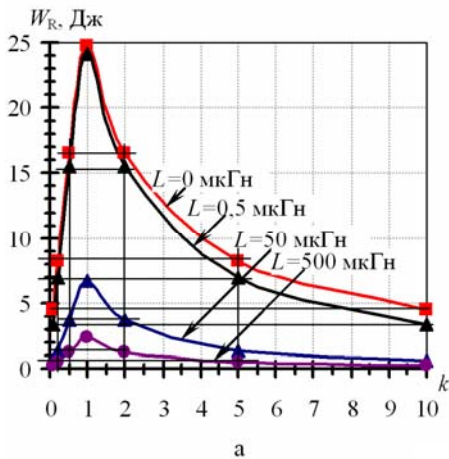


Рис. 2

Как видно из рис. 2, а, на отрезке $0 < k < 1$ (т.е. при $C_1 > C_2$) потери энергии W_R сначала возрастают, достигая максимального значения при $k = 1$ ($C_1 = C_2$), а при $k > 1$ (т.е. при $C_1 < C_2$) снижаются. При этом величины W_R имеют одинаковые значения при $k = 0,1$ и 10 ; $k = 0,2$ и 5 ; $k = 0,5$ и 2 (что отражено на рисунке горизонтальными и вертикальными сплошными линиями). Это объясняется

тем, что при таких парах соотношений емкостей конденсаторов эквивалентная емкость цепи (т.е. суммарная емкость двух конденсаторов) остается той же, а, следовательно, ток в цепи и потери W_R (пропорциональные квадрату тока) также будут теми же. Кроме этого, для всех значений k потери W_R тем ниже, чем больше индуктивность L .

Из рис. 2, б видно, что коэффициент передачи энергии η с уменьшением k монотонно увеличивается. Так при уменьшении k от 10 до 0,1 коэффициент η может возрасти максимально в 6 раз (при $L = 0$). Отметим, что при всех k значения η тем больше, чем больше индуктивность L . Так, при $L = 500$ мкГн коэффициент η имеет высокие значения (0,78 – 0,97) во всем диапазоне изменения коэффициента k (соответствующем изменению соотношения емкостей конденсаторов в 100 раз).

Таким образом, для повышения коэффициента передачи энергии при энергообмене между двумя конденсаторами в цепи с однонаправленными коммутаторами, позволяющими регулировать длительность процесса энергообмена, целесообразно повышать индуктивность цепи и уменьшать соотношение емкостей заряжаемого и разряжаемого конденсаторов.

На рис. 3 показаны зависимости потерь энергии W_R (а) и коэффициента ее передачи η (б) от соотношения начальных напряжений на конденсаторах $U_{C_2}^*(0-) = U_{C_2}(0-) / U_{C_1}(0-)$ при изменении индуктивности цепи L от 0 до 500 мкГн.

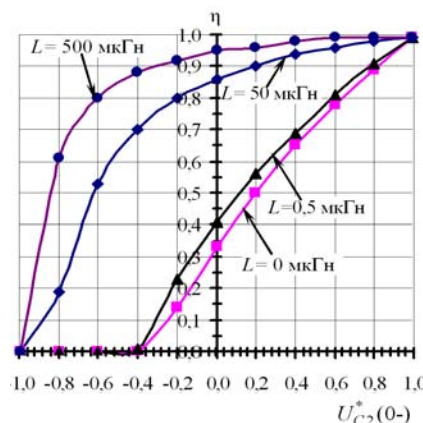
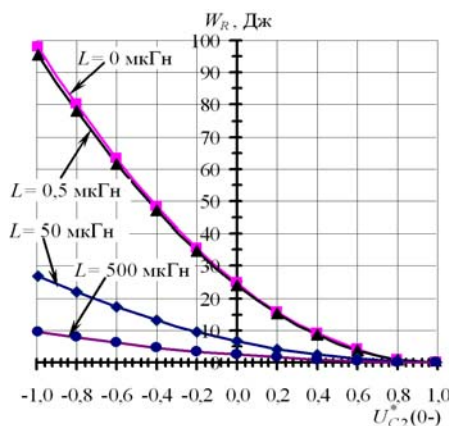


Рис. 3. а, б

Из рис. 3, а видно, что при изменении приведенного напряжения $U_{C_2}^*(0-)$ от +1 до -1 (точнее от +0,99 до -0,99) энергия потерь W_R для всех рассматриваемых случаев изменения L возрастает практически от нуля до своего максимального значения.

Причем, чем больше величина индуктивности L , тем

меньше значение W_R . Так при увеличении L от 0,5 до 500 мкГн максимальная энергия потерь W_R уменьшается в 10,2 раза.

Как следует из рис. 3, б коэффициент передачи энергии η при изменении приведенного напряжения $U_{C2}^*(0-)$ от +1 до -1 и уменьшении величины индуктивности L снижается.

Таким образом, уменьшение разности начальных напряжений заряжаемого и разряжаемого конденсаторов при наличии в цепи индуктивности и однонаправленного ключа вызывает уменьшение потерь электрической энергии и повышение коэффициента ее передачи от одного конденсатора к другому. Причем уменьшение потерь энергии в RL -цепи и повышение коэффициента ее передачи от одного конденсатора к другому можно осуществлять увеличивая индуктивность L .

Выводы. Установлено, что если два конденсатора, заряженные до разных напряжений, соединить через RL -цепь коммутатором, проводящим ток в обоих направлениях до затухания переходного процесса обмена электроэнергией между конденсаторами, то после завершения этого процесса потери энергии и коэффициент ее передачи не зависят от величин R и L , а определяются только разностью начальных напряжений на конденсаторах и соотношением их емкостей.

В то же время показано, что если конденсаторы, заряженные до разных напряжений, соединить однонаправленным коммутатором (проводящим ток только в одном направлении) и процесс энергообмена между ними является колебательным, то потери энергии уменьшаются, а коэффициент ее передачи от одного конденсатора к другому увеличивается с уменьшением разности их начальных напряжений и с увеличением индуктивности L , соединяющей RL -цепи. Причем при всех значениях индуктивности наибольшие потери энергии возникают при равных емкостях соединяемых конденсаторов.

1. Булатов О.Г., Иванов В.С., Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с.
2. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. – К.: Техніка, 1976. – 176 с.
3. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Электротехника і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 70–75.
4. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук. думка, 1982. – 421 с.
5. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – 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., Синицин В.К., Иващенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 9–10.
8. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders // J. Mater. Res. – 1987. – Vol. 2. – № 2. – Pp. 277–288.
9. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – № 3. – Pp. 823–829.
10. Casanueva R., Azcondo F.J., Branäs 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. – Iss. 2. – Pp. 361–369.
11. 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. – Iss. 1–2. – Pp. 643–646.
12. Nguyen Ph.-Kh., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – Issue 17. – Pp. 17A756-1.
13. Shcherba A.A., Suprunovska 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). – 2014. – Pp. 50–54.
14. Zubietta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – 2000. – Vol. 36. – № 1. – Pp. 199–205.

УДК 621.3.011:621.372

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В RL -ЛАНЦЮГАХ, ЩО З'ЄДНУЮТЬ КОНДЕНСАТОРИ, ЗАРЯДЖЕНІ ДО РІЗНИХ НАПРУГ

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: jednat1@gmail.com

Встановлено, що втрати енергії й коефіцієнт її передачі між двома зарядженими до різних напруг конденсаторами, з'єднаними через RL -ланцюг двонаправленим комутатором (що проводить струм в обох напрямках),

визначаються тільки різницею початкових напруг на конденсаторах і співвідношенням їхніх ємностей і не залежать від величин R та L . У цьому випадку енергообмін між конденсаторами здійснюється до загасання перехідного процесу. У той же час показано, що якщо RL -ланцюг підключити до конденсаторів однонаправленим комутатором і між ними виникне коливальний процес енергообміну, то втрати енергії будуть зменшуватися, а коефіцієнт її передачі збільшуватися при зменшенні різниці початкових напруг конденсаторів і зі збільшенням індуктивності L . Для такого енергообміну встановлено залежності втрат енергії й коефіцієнта її передачі між конденсаторами від співвідношення їхніх ємностей. Показано, що найбільші втрати енергії виникають при рівних ємностях з'єднаних конденсаторів для будь-яких значень індуктивності.

Бібл. 14, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: конденсатор, індуктивність, енерговтрати, коефіцієнт передачі енергії.

REGULARITY OF CHANGE OF THE ENERGY LOSS IN RL – CIRCUITS CONNECTING CAPACITORS, CHARGED TO DIFFERENT VOLTAGE

N.I. Suprunovska, A.A. Shcherba

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

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

E-mail: iednat1@gmail.com

It is determined that losses of the electric power and coefficient of energy transfer between two capacitors charged to different voltage and connected through RL -circuit with bidirectional commutator (conducting a current in both directions) are defined only by a difference of initial voltage on capacitors and a ratio of their capacities, and do not depend on magnitudes R and L . In this case the power interchange between capacitors is carried out until transient attenuation. At the same time it is shown that if RL -circuit is connected to capacitors by unidirectional commutator and there will be an oscillatory process of a power interchange then an energy loss will decrease, and the energy transfer coefficient will be increase at decrease of a difference of initial voltage of capacitors and with increase in inductance L . For such energy interchange the dependences of energy loss and energy transfer coefficient between capacitors from a ratio of their capacities are determined. It is shown that the greatest energy loss appears at equal capacities of connected capacitors for any values of inductance. References 14, figures 3, table 1.

Keywords: capacitor, inductance, power losses, energy transfer coefficient.

1. Bulatov O.G., Ivanov V.S., Panfilov D.I. Semi-conductor chargers of the capacitor energy storage systems. – Moskva: Radio i Sviyaz, 1986. – 160 p. (Rus)
2. Volkov I.V., Vakulenko V.M. Sources of power supplies of lasers. – Kyiv: Tekhnika, 1976. – 176 p. (Rus)
3. 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)
4. Pentegov I.V. Bases of the theory of charging circuits of the capacitor energy storages systems. – Kyiv: Naukova dumka, 1982. – 421 p. (Rus)
5. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 4. – Pp. 3–11. (Rus)
6. Shcherba A.A., Suprunovska 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., Suprunovska N.I., Synytsyn V.K., Ivashchenko D.S. Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of duration // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 3. – Pp. 9–10. (Rus)
8. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark erosion: A method for producinq rapidly quenched fine powders // J. Mater. Res. – 1987. – Vol. 2. – No 2. – Pp. 277–288.
9. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
10. 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. – Iss. 2. – Pp. 361–369.
11. 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. – Iss. 1–2. – Pp. 643–646.
12. Nguyen Ph.-Kh., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – Iss. 17. – Pp. 17A756-1.
13. Shcherba A.A., Suprunovska 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). – 2014. – Pp. 50–54.
14. 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 19.05.2015