

## ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ В БАГАТОКОМІРКОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

О.Ф.Бондаренко, Т.А.Хижняк, Д.В.Кузін

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)

*Проведено аналіз складових втрат енергії в багатокоміркових транзисторних перетворювачах для контакт-ного зварювання з безперервним керуванням, імпульсним керуванням і спільним використанням імпульсного та безперервного керування. Отримано вирази для розрахунку втрат енергії в перетворювачах та їхній ККД, які враховують втрати у блоці накопичення енергії та блоці регулювання зварювального струму. Проведено розрахунки, результати яких показали, що ККД перетворювача зі спільним використанням імпульсного та безперервного керування для заданих значень напруги проміжного накопичувача енергії є вищим за ККД перетворювача з безперервним керуванням, та зі зменшенням цієї напруги наближається до ККД перетворювача з імпульсним керуванням. Бібл. 9, табл. 1, рис. 4.*

**Ключові слова:** багатокомірковий транзисторний перетворювач, втрати енергії, імпульсний режим роботи транзистора, лінійний режим роботи транзистора, контактне зварювання.

**Вступ.** Транзисторні перетворювачі широко використовуються як складові частини джерел живлення для контактного зварювання [1-4,7,9]. Якість зварювання визначається роботою перетворювачів вихідної ланки, які здійснюють безпосереднє регулювання струму у зварювальному контурі. Поява потужних напівпровідникових приладів та накопичувачів енергії, здатних працювати на великих струмах, створила передумови для розробки нових схем та алгоритмів керування перетворювачами вихідної ланки. Перспективним напрямком розробки перетворювачів та джерел живлення загалом, в тому числі для контактного зварювання, є їхня побудова за багатокомірковим (модульним) принципом [2-6, 8,9]. При цьому з'являється можливість оптимізувати та зробити уніфікованою схему окремої комірки, а необхідні величини вихідних параметрів забезпечити їхнім паралельним або послідовним з'єднанням. Окрім того, в схемах перетворювачів, побудованих таким чином, стають можливими резервування блоків, використання силових елементів меншої потужності, зменшення габаритів радіаторів або виключення їх зовсім.



Рис. 1

Узагальнена структурна схема джерела живлення для контактної зварювання показана на рис. 1. Вхідний блок представляє собою випрямляч з коректором коефіцієнта потужності і забезпечує споживання з мережі струму, близького до синусоїдального. Блок накопичення енергії

здійснює заряд проміжного ємнісного накопичувача до необхідної напруги. Блок регулювання зварювального струму забезпечує необхідні параметри зварювальних імпульсів у навантаженні. При цьому, зважаючи на значні амплітуди зварювального струму, актуальним є питання збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) системи.

Попередній аналіз роботи джерела живлення зі структурою (рис. 1) показав, що найсуттєвіші втрати електричної енергії, які є визначальними для коефіцієнта корисної дії (ККД), мають місце у колах протікання найбільших струмів: блоці накопичення енергії та блоці регулювання зварювального струму. Необхідно зауважити, що блок регулювання зварювального струму може функціонувати в режимі імпульсного керування, в режимі безперервного керування або в режимі спільного використання імпульсного та безперервного керування. У випадках, коли необхідно отримати виключно високу точність регулювання струму, застосовують безперервне керування силовими транзисторами блоку регулювання [1, 7]. Відомим недоліком такого способу керування є неефективне використання електроенергії у зв'язку з її великими втратами на транзисторах. Особливо актуальним це питання є, коли багато перетворювачів з безперервним керуванням працюють у складі виробничого комплексу. Суттєвого зниження втрат електроенергії і, відповідно, збільшення ККД досягають шляхом застосування імпульсного керування транзисторами перетворювача. Однак в умовах складного нелінійного

навантаження, яким є зварюваний контакт, імпульсний режим на практиці не дає змоги забезпечити точність регулювання струму, порівняну з точністю, що забезпечується при безперервному керуванні. Тоді як існує ряд специфічних зварних виробів, для яких висока точність регулювання струму під час зварювання є визначальним фактором [1, 7]. Режим спільного використання імпульсного та безперервного керування транзисторами блоку регулювання зварювального струму є компромісним рішенням, яке дозволяє покращити точність регулювання струму в порівнянні з імпульсним режимом керування та скоротити втрати енергії у порівнянні з безперервним режимом керування [2].

**Мета даної роботи** – оцінка втрат енергії та ККД у багатокоміркових транзисторних перетворювачах як складових частин джерел живлення для контактного зварювання.

**Досліджувана схема.** На рис. 2 спрощено показано функціональну схему джерела живлення для контактного зварювання, побудованого за багатокомірковим принципом [3].

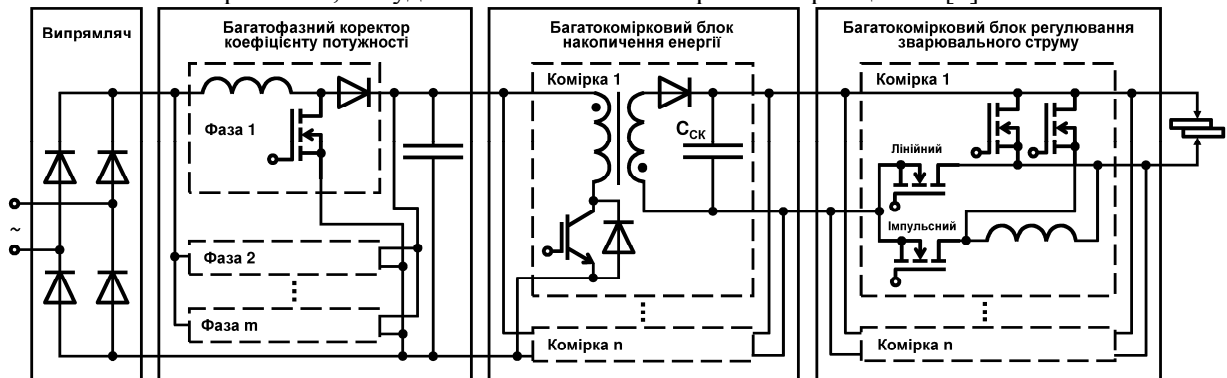


Рис. 2

Оскільки, як вже було відзначено, втрати у випрямлячі та коректорі можна не враховувати, а визначальними є втрати в блоці накопичення енергії та в блоці регулювання зварювального струму, розглянемо докладно складові втрати енергії тільки у цих блоках.

**Втрати в блоці накопичення енергії.** Блок накопичення енергії представляє багатокоміркову структуру, що містить  $n$  уніфікованих комірок, кожна з яких включає накопичувальний елемент та зарядний вузол. Як накопичувальний елемент може бути використаний як окремий суперконденсатор (СК), так і їхні батареї, що з'єднані паралельно, послідовно або паралельно-послідовно. Існує можливість забезпечити незалежне живлення кожної комірки блока регулювання зварювального струму від окремого СК, якщо їхня кількість співпадає. СК мають ряд істотних переваг у порівнянні з іншими накопичувальними елементами, такими як, наприклад, акумуляторні батареї і електролітичні конденсатори. Зокрема, СК мають значно кращі масогабаритні показники, ніж електролітичні конденсатори з такою самою ємністю, і більш високу швидкість заряду/розряду, ніж акумулятори, до того ж вони витримують сотні тисяч циклів перезарядження.

Для оцінки втрат у блоці накопичення енергії скористаємося спрощеною схемою заміщення процесу розряду СК (рис. 3), де  $C_{СК}$  – електрична ємність батареї СК,  $R_{СК}$  – внутрішній опір СК (ESR),  $R_{Н'}$  – приведений опір навантаження (враховує опір блоку регулювання зварювального струму та опір зварюваного контакту). Під час розряду енергія  $W_{розр}$ , накопичена в СК, частково споживається навантаженням  $W_{корис}$ , а частково розсіюється на внутрішньому опорі СК  $W_{розс}$ . Таким чином,

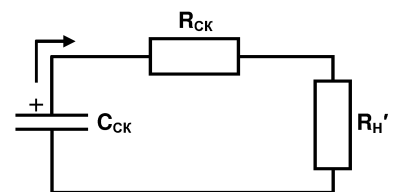


Рис. 3

$$W_{розр} = W_{корис} + W_{розс} = \int_0^{t_{розр}} (i_{зв}^2(t) \cdot R_{Н'} + i_{зв}^2(t) \cdot R_{СК}) dt = I_{зв}^2 \cdot R_{Н'} \cdot t_{розр} + I_{зв}^2 \cdot R_{СК} \cdot t_{розр}, \quad (1)$$

де  $i_{зв}(t)$ ,  $I_{зв}$  – миттєвий та середній зварювальний струм;  $t_{розр}$  – час розряду батареї суперконденсаторів. Відповідно, загальна потужність втрат  $P_{\Sigma накоп}$  у блоці накопичення енергії, що складається з  $n$  комірок

$$P_{\Sigma накоп} = \sum_{i=1}^n P_{ком_i} = \sum_{i=1}^n I_{ком_i}^2 \cdot R_{СК_i}. \quad (2)$$

де  $P_{ком_i}$  – потужність втрат  $i$ -ї комірки накопичувача,  $i$  – номер комірки,  $i = 1, 2 \dots n$ ;  $I_{ком_i}$  – середній струм  $i$ -ї комірки накопичувача за час розряду суперконденсаторів;  $R_{СК_i}$  – внутрішній опір СК  $i$ -ї комірки накопичувача.

ККД блоку накопичення енергії

$$\eta_{\text{накоп}} = \frac{P_H'}{P_H' + P_{\Sigma \text{накоп}}}, \quad (3)$$

де  $P_H'$  – середня потужність приведенного навантаження.

**Втрати в блоці регулювання зварювального струму.** Оцінку втрат у блоці регулювання зварювального струму виконаємо для трапецієвидної форми імпульсу струму в навантаженні (рис. 4).

Блок регулювання зварювального струму представляє багатокоміркову структуру, що складається з  $n$  однакових транзисторних комірок. Кожна комірка, в свою чергу, включає елементарні перетворювачі з безперервним та імпульсним керуванням, які можуть працювати як окремо, так і спільно. Струм у навантаженні (зварювальний струм) формується як сума  $n$  струмів, кожен з яких регулюється окремою транзисторною коміркою в межах від нуля до заданого максимального значення. Наростання зварювального струму у відповідності до наростання сигналу завдання забезпечується додаванням струмів шляхом послідовного введення комірок у роботу.

Середня потужність втрат на транзисторах блоку регулювання зварювального струму з використанням виключно режиму *безперервного керування*

$$P_{\text{безп}} = \frac{1}{(t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})} \cdot \int_{t_{\text{поч}}}^{t_{\text{кін}}} (i_{\text{зв}}(t) \cdot (u_{\text{СК}}(t) - u_H(t))) dt, \quad (4)$$

де  $t_{\text{поч}}$  та  $t_{\text{кін}}$  – моменти початку та закінчення зварювання відповідно;  $i_{\text{зв}}(t)$  – зварювальний струм, що протікає в навантаженні, визначається як сума струмів всіх комірок;  $u_{\text{СК}}(t)$  – напруга блоку накопичення енергії;  $u_H(t)$  – падіння напруги на навантаженні при протіканні струму  $i_{\text{зв}}(t)$ .

Середня потужність втрат на транзисторах багатокоміркового блоку регулювання зварювального струму з використанням виключно режиму *імпульсного керування*

$$P_{\text{імн}} = (t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})^{-1} \sum_{i=1}^n P_{\text{ком}_i}^{\text{імн}} \cdot (t_{i+1} - t_i), \quad (5)$$

де  $(t_{i+1} - t_i)$  – інтервал роботи  $i$ -ї комірки;  $P_{\text{ком}_i}^{\text{імн}}$  – середня потужність втрат  $i$ -ї комірки.

Схема комірки блоку регулювання зварювального струму з використанням виключно режиму імпульсного керування представляє імпульсний перетворювач постійної напруги знижувального типу. Потужність втрат однієї комірки  $P_{\text{ком}_i}^{\text{імн}}$  буде мати три складові: втрати на основному транзисторі, втрати на «синхронному» транзисторі та втрати на активному опорі дроселя.

Середня потужність втрат на основному транзисторі однієї комірки  $P_{\text{VT ком}_i}^{\text{імн}}$  за період комутації  $T$  складається із середньої потужності втрат на транзисторі:  $P_{\text{вкл}}$  – на інтервалі включення  $t_{\text{вкл}}$ ;  $P_{\text{викл}}$  – на інтервалі виключення  $t_{\text{викл}}$ ;  $P_{\text{відкр}}$  – на інтервалі відкритого стану  $t_{\text{відкр}}$ ;  $P_{\text{закр}}$  – на інтервалі закритого стану  $t_{\text{закр}}$ . Відповідно формула для розрахунку цієї потужності втрат матиме вигляд

$$P_{\text{VT ком}_i}^{\text{імн}} = \frac{1}{T} \cdot \left[ \int_0^{t_{\text{вкл}}} (i_{\text{вкл}}(t) \cdot u_{\text{вкл}}(t)) dt + \int_0^{t_{\text{викл}}} (i_{\text{викл}}(t) \cdot u_{\text{викл}}(t)) dt + I_{\text{ком}_i}^2 \cdot R_{\text{відкр}_i} + \int_0^{t_{\text{закр}}} (I_{\text{вит}_i} \cdot u_{\text{СК}}(t)) dt \right], \quad (6)$$

де  $i_{\text{вкл}}(t)$  та  $u_{\text{вкл}}(t)$  – струм та напруга транзистора на інтервалі його включення відповідно;  $i_{\text{викл}}(t)$  та  $u_{\text{викл}}(t)$  – струм та напруга транзистора на інтервалі його виключення відповідно;  $R_{\text{відкр}_i}$  – опір транзистора комірки в його відкритому стані;  $I_{\text{вит}_i}$  – струм витікання транзистора комірки в його закритому стані.

Середня потужність втрат на «синхронному» транзисторі обчислюються аналогічно (6), з урахуванням того, що він працює в протифазі, а втрати у випрямлячі та коректорі можна не враховувати середня потужність втрат на дроселі  $P_L$  обчислюється як інтеграл від добутку квадрату струму, що протікає через дросель  $i_L(t)$ , та активної складової повного опору дроселя  $R_L$  на інтервалі періоду,

$$\text{тобто } P_L = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (i_L^2(t) \cdot R_L) dt.$$

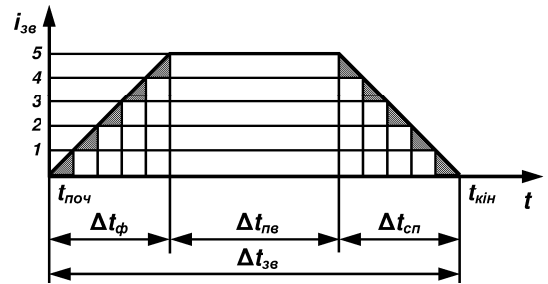


Рис. 4

Особливістю *спільного використання безперервного та імпульсного керування* є те, що до моменту досягнення струмом кожної нової комірки максимального значення струму його регулювання здійснюється в лінійному режимі, а після досягнення максимального струму імпульсна частина продовжує підтримувати це значення в імпульсному режимі до закінчення зварювання. Ділянки імпульсу струму, при регулюванні яких використовується безперервне керування транзисторами, на рис. 4 позначені сірим кольором. Таким чином, середня потужність втрат на транзисторі  $P_{спільн}$  має дві складові – імпульсну і безперервну  $P_{спільн} = P_{спільн}^{безп} + P_{спільн}^{имп}$ .

Для першої маємо

$$P_{спільн}^{безп} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_{кін} - t_{поч})} \cdot \int_{t_i}^{t_{i+1}} (i_{зв}(t) - I_{max}(i-1))(u_{СК}(t) - u_H(t)) dt, \quad (7)$$

де  $I_{max}$  – максимальний рівень струму однієї комірки блоку регулювання струму;  $t_i$  – момент, коли комірка з номером  $i$  вступає в роботу;  $t_{i+1}$  – момент, коли комірка з номером  $i$  завершує роботу в безперервному режимі та переходить в імпульсний.

Середня потужність втрат  $P_{спільн}^{имп}$  може бути розрахована за допомогою (5,6).

**Розрахунок втрат енергії в багатокоміркових транзисторних перетворювачах для контактного зварювання.** Розрахунок проведемо для наступних параметрів джерела живлення: форма зварювального імпульсу – як показано на рис. 4; максимальний струм навантаження –  $I_{звmax}=500$  А; середній опір навантаження –  $R_H=3$  мОм; кількість комірок перетворювача –  $n=10$ ; максимальний струм кожної комірки –  $I_{ком}=50$  А, тривалість імпульсу зварювання –  $\Delta t_{зв}=3$  мс; тривалість наростання імпульсу зварювання –  $\Delta t_{ф}=1$  мс; тривалість спаду імпульсу зварювання –  $\Delta t_{сн}=1$  мс; тип транзисторів перетворювача IRF1324S; тип суперконденсатора(-ів) накопичувача енергії ВСАР0310 P270 T10; середня напруга на суперконденсаторі(-ах) –  $U_{СК}=2,5$  В, 5 В та 10 В.

З використанням програми MathCAD за отриманими виразами була проведена порівняльна оцінка ККД багатокоміркового транзисторного перетворювача з виключно безперервним керуванням (1), виключно імпульсним керуванням (2) та спільним використанням імпульсного та безперервного керування (3) для трьох значень напруги проміжного накопичувача енергії на суперконденсаторах. Результати зведено в таблицю.

$U_{СК}, В$	Тип перетворювача		
	1	2	3
2,5	0,5	0,67	0,59
5	0,25	0,67	0,5
10	0,125	0,66	0,38

З отриманих результатів видно, що ККД перетворювача зі спільним використанням імпульсного та безперервного керування для всіх значень напруги на суперконденсаторах вище за ККД перетворювача з безперервним керуванням і зі зменшенням цієї напруги наближаються до значень ККД перетворювача з імпульсним керуванням. Необхідно відзначити, що при цьому точність формування струму залишається практично такою, як і в перетворювачі з безперервним керуванням.

**Висновки.** Таким чином, отримані вирази для розрахунку втрат енергії в багатокоміркових транзисторних перетворювачах для контактного зварювання дозволяють виконати оцінку втрат енергії та ККД у цих перетворювачах для різних режимів керування транзисторами блоку регулювання зварювального струму. Встановлено, що ККД перетворювача зі спільним використанням імпульсного та безперервного керування для всіх значень напруги проміжного накопичувача енергії на суперконденсаторах вищий за ККД перетворювача з безперервним керуванням і зі зменшенням цієї напруги наближаються до значень ККД перетворювача з імпульсним керуванням.

1. Атауш В.Е., Леонов В.П., Москвин Э.Г. Микросварка в приборостроении. – Рига: РТУ, 1996. – 332 с.
2. Бондаренко Ю.В. Оценка энергоэффективности многоячейкового транзисторного преобразователя с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2011. – Ч. 1. – С. 5-10.
3. Булычев В.И. Способ контактной сварки и источник питания для его реализации, Патент 2236333 РФ, 2004.
4. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Effective circuit topology of DC power supply for micro resistance welding // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2014. – Pp. 68-70. DOI: 10.1109/IEPS.2014.6874204
5. Brooks S.W., Maggloino L.J. Method and apparatus for an efficient multiphase switching regulator, Patent US 6285571, 2001.
6. Hunter P.L. Apparatus and method for sharing a load current among frequency-controlled D.C.-to D.C. converters, Patent US 5724237, 1998.

7. *Ishida Takashi, Takasaki Hiroyuki*. Power Supply for Welder, Patent JP H06141560, 1994.
8. *Kadatsky A.F., Karpov E.V., Volovets N.I.* Method for clusterized power sharing conversion and regulation of the primary power source within a converting and regulating power supply, and system, Patent US 6381155, 2002.
9. *Wagner M., Kolb S.* Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding // 15<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – 2013. – Pp. 1-9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6634720.

УДК 621.314: 621.311.6

### **ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В МНОГОЯЧЕЙКОВОМ ТРАНЗИСТОРНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

**А.Ф.Бондаренко, Т.А.Хижняк, Д.В.Кузин**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)**

*Проведен анализ составляющих потерь энергии в многоячейковых транзисторных преобразователях для контактной сварки с непрерывным управлением, импульсным управлением и совместным использованием импульсного и непрерывного управления. Получены выражения для расчета потерь энергии в преобразователях и их КПД, учитывающие потери в блоке накопления энергии и блоке регулирования сварочного тока. Проведены расчеты, результаты которых показали, что КПД преобразователя с совместным использованием импульсного и непрерывного управления для заданных значений напряжения промежуточного накопителя энергии выше КПД преобразователя с непрерывным управлением и с уменьшением этого напряжения приближается к КПД преобразователя с импульсным управлением. Библ. 9, табл. 1, рис. 4.*

**Ключевые слова:** многоячейковый транзисторный преобразователь, потери энергии, импульсный режим работы транзистора, линейный режим работы транзистора, контактная сварка.

### **ENERGY LOSSES IN MULTICELL-TYPE TRANSISTOR CONVERTER FOR RESISTANCE WELDING**

**O.F. Bondarenko, T.A. Khyzhniak, D.V. Kuzin**

**National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)**

*The analysis of energy loss components in multicell-type transistor converters for resistance welding with continuous control, pulse control and combined pulse and continuous control were carried out. The formulas for calculating energy losses in converters and their efficiency, considering the losses in energy storage and welding current control unit, were obtained. The calculations using obtained formulas were carried out. The calculation results showed that the efficiency of the converter with combined pulse and continuous control is higher than the efficiency of the converter with the continuous control at specified voltage values of energy storage, and the smaller this voltage, the closer the efficiency of the converter with combined control to the efficiency of converter with pulse control. References 9, tables 1, figures 4.*

**Key words:** multicell-type transistor converter, energy losses, pulse mode of transistor operation, linear mode of transistor operation, resistance welding.

1. *Ataush V.Y., Leonov V.P., Moskvina E.N.* Micro welding in instrument making. – Riga: RTU, 1996. – 332 p. (Rus)
2. *Bondarenko I.V.* The evaluation of energy efficiency of multicell-type transistor converter with combined control // *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. – 2011. – Part 1. – Pp. 5-10. (Rus.)
3. *Bulychev V.I. et al.* Contact Welding Method and Power Source for Performing the Same. Pat. RU 2236333, 2004. (Rus)
4. *Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M.* Effective circuit topology of DC power supply for micro resistance welding // *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. – 2014. – Pp. 68-70. DOI: 10.1109/IEPS.2014.6874204
5. *Brooks S.W., Maggloino L.J.* Method and apparatus for an efficient multiphase switching regulator, Patent US 6285571, 2001.
6. *Hunter P.L.* Apparatus and method for sharing a load current among frequency-controlled D.C.-to D.C. converters, Patent US 5724237, 1998.
7. *Ishida Takashi, Takasaki Hiroyuki*. Power Supply for Welder, Patent JP H06141560, 1994.
8. *Kadatsky A.F., Karpov E.V., Volovets N.I.* Method for clusterized power sharing conversion and regulation of the primary power source within a converting and regulating power supply, and system, Patent US 6381155, 2002.
9. *Wagner M., Kolb S.* Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding // 15<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – 2013. – Pp. 1-9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6634720.

Надійшла 17.04.2015  
Остаточний варіант 17.07.2015