

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО, Т. О. РИЖАКОВА, Ю. В. КОЖУШКО

Україна, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, ryzhakova.tetiana@gmail.com, y.v.kozhushko@gmail.com

## ВДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВТРАТ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ УСТАНОВОК КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

*Запропоновано методику оцінки потужності втрат в імпульсному понижувальному перетворювачі джерела живлення установки контактної мікрозварювання, яка дозволяє більш точно, ніж загальна, здійснювати обчислення на етапі проектування завдяки врахуванню потужності втрат на індуктивному елементі схеми. З використанням даної методики виконано розрахунки, які підтвердили доцільність врахування потужності втрат на індуктивному елементі, особливо в області високих частот. Отримано графіки, які продемонстрували характер залежності потужності втрат в перетворювачі від частоти за різних значень струму та напруги.*

*Ключові слова: джерело живлення, понижувальний імпульсний перетворювач, індуктивний елемент, потужність втрат, контактне мікрозварювання.*

Одним з провідних способів нероз'ємного з'єднання деталей в різних галузях техніки на даний час є контактне зварювання. Воно використовується як для з'єднання мікромініатюрних елементів (мікрозварювання) у прецизійних виробництвах, наприклад в електроніці та приладобудуванні, так і для отримання надійних з'єднань у важкому машинобудуванні.

Контактне зварювання реалізується пропусканням імпульсу електричного струму значної амплітуди крізь зварювані деталі в точці, де необхідно отримати з'єднання. Залежно від матеріалу зварюваних деталей та їх товщини використовуються струми величиною від сотень ампер до кількох кілоампер.

Відомо, що надійність та якість з'єднань (відсутність виплесків, непроварів тощо) безпосередньо визначаються параметрами зварювальних імпульсів, що генеруються джерелом живлення установки контактної мікрозварювання [1]. Особливо проблематичним є, звичайно, отримання якісних з'єднань для прецизійного контактної мікрозварювання, тому до джерел живлення таких установок пред'являються винятково високі вимоги. Зокрема, для досягнення найвищої точності регулювання параметрів імпульсів зварювального струму використовують транзисторні перетворювачі вихідного формувача імпульсів в лінійному режимі роботи, незважаючи на його вкрай низьку енергоефективність [1].

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0116U006924).

Задля забезпечення прийнятної енергоефективності джерел живлення установок контактної мікрозварювання за умов збереження достатньої точності регулювання струму в зварювальному контакті застосовують спеціальні режими імпульсних транзисторних перетворювачів, а саме фазове чергування (interleaved mode) або комбінування імпульсного режиму роботи з лінійним [1–3]. При цьому як вихідний формувач імпульсів використовується схема понижувального перетворювача, яка перетворює вхідну постійну напругу (зазвичай 8–25 В) у стабілізовану напругу меншої величини (0,5–5 В) [3].

Необхідно зазначити, що з точки зору режимів роботи понижувальні перетворювачі джерел живлення установок контактної мікрозварювання мають особливості, які можуть значно впливати на працездатність схеми та її енергоефективність. Через велику амплітуду та складну форму імпульсів зварювального струму, а також через низьку напругу навантаження потужність втрат на елементах схеми може бути суттєвою порівняно з потужністю струму в навантаженні [2]. Раніше проведені оцінки потужності втрат в імпульсних перетворювачах для контактної мікрозварювання враховували тільки втрати на напівпровідникових елементах схеми, тоді як втрати на інших елементах, зокрема індуктивних, ігнорувались, оскільки вважались несуттєвими [2, 4]. Втім прагнення досягти більш високої точності регулювання зварювального струму спонукає вдаватися до підвищення частоти роботи імпульсних перетворювачів. За таких

умов втрати на індуктивних елементах стають достатньо суттєвими, що потребує їх врахування при виконанні загальної оцінки енергоефективності схеми.

Варто згадати, що на даний час немає єдиної універсальної методики оцінки втрат на індуктивних елементах. Деякі дослідники створюють складні системи та вимірюють параметри котушок індуктивності безпосередньо під час роботи і вже за результатами вимірювання обчислюють втрати на них [5–9]. Проте в багатьох випадках додаткові фінансові витрати на спеціалізоване обладнання вважаються надмірними, тому актуальним є питання максимально точної теоретичної оцінки втрат на індуктивних елементах схем.

Метою даної роботи є підвищення точності загальної методики оцінки втрат в імпульсному перетворювачі джерела живлення установки контактної мікросварювання шляхом врахування втрат в індуктивних елементах за умов дії в схемі високих струмів та низьких напруг.

**Понижувальний імпульсний перетворювач: особливості, еквівалентна схема**

На рис. 1 наведено схему імпульсного понижувального перетворювача з використанням синхронного транзистора [10]. Слід зазначити,

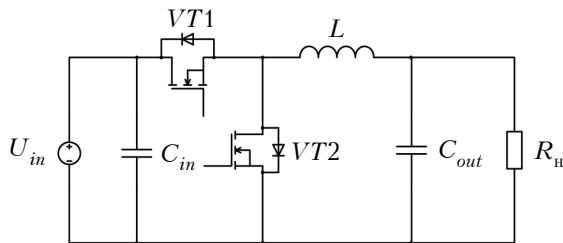


Рис. 1. Схема імпульсного понижувального перетворювача

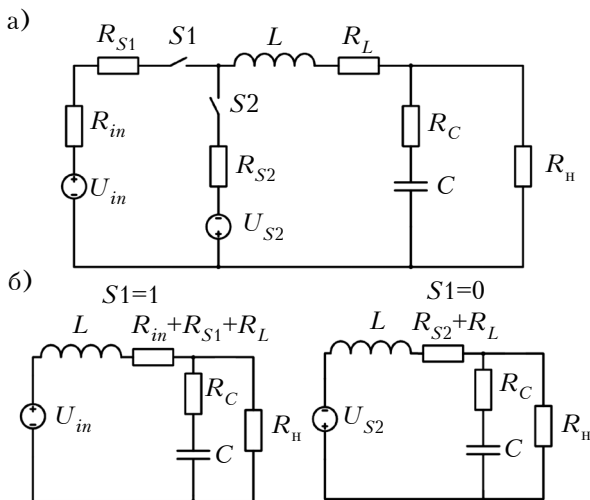


Рис. 2. Еквівалентна схема понижувального перетворювача (а) з її модифікаціями (б) за замкненого ( $S1 = 1$ ) та розімкненого ( $S1 = 0$ ) станів ключа  $S1$

що в базовому варіанті схеми використовується не транзистор  $VT2$ , а зворотний діод, але оскільки заміна діоду на транзистор дозволяє підвищити енергоефективність перетворювача [2], в даній роботі розглядається саме такий варіант його побудови.

На рис. 2 зображено еквівалентну схему понижувального перетворювача з її модифікаціями за різних станів ключа  $S1$ . Наявність активного опору у кожному елементі схеми заміщення свідчить про те, що втрати енергії відбуваються на всіх без виключення компонентах перетворювача, в тому числі на котушці індуктивності  $L$ .

**Характер втрат на індуктивному елементі**

Під час роботи будь-якого індуктивного елемента завжди виділяється енергія у вигляді тепла, тобто в робочому режимі він нагрівається. Джерелом тепла служать як омичні опори обмоткових проводів, так і втрати в магнітопроводі на перемагнічування та вихрові струми. Якщо магнітний матеріал сердечника підлягає повному циклу намагнічування й розмагнічування, крива перемагнічування являє собою петлю гістерезиса, площа якої відображає втрати енергії в матеріалі сердечника за один період (рис. 3).

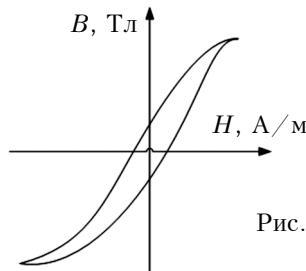


Рис. 3. Крива перемагнічування сердечника

Якщо обмотка сердечника знаходиться під дією змінної напруги, втрати на гістерезис залежать від частоти: чим ширший гістерезис, тим більші втрати, і навпаки [10].

**Методика оцінки втрат в перетворювачі**

Пропонована методика полягає у розрахунку загальної потужності втрат як суми потужностей втрат на всіх окремих елементах схеми.

Більшість теоретичних підходів до розрахунку втрат на індуктивних елементах силових схем базуються на використанні рівняння Штейнмеца, яке виражає потужність втрат на одиницю об'єму як закон потужності зі сталими показниками частоти та індукції [6]. Загальна форма рівняння Штейнмеца записується наступним чином:

$$P_V = k f^\alpha B^\beta, \tag{1}$$

де  $B$  – амплітуда магнітної індукції за синусоїдальною формою сигналу частотою  $f$ ;

$P_V$  – середня потужність втрат на одиницю об'єму;  $k, \alpha, \beta$  – параметри матеріалу Штейнмеца.

Формула для розрахунку потужності статичних втрат на транзисторі виглядає так:

$$P_{\text{стат}} = I_d^2 R_{DS(on)} \gamma + I_d^2 R_{DS(off)} \gamma, \quad (2)$$

де  $I_d$  – середнє значення струму за період провідності;

$R_{DS(on)}$  – опір відкритого каналу;

$R_{DS(off)}$  – опір закритого каналу;

$\gamma$  – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Потужність динамічних втрат з урахуванням струму зворотного відновлення опозитного діоду в режимі «важкого» переключення

$$P_{\text{дин}} = U_{in} f (I_{out} t_a + 0,5 Q_{rr}), \quad (3)$$

де  $t_a$  – складова часу зворотного відновлення  $t_{rr}$  (приблизно дорівнює часу ввімкнення транзистора  $t_{on}$ );

$Q_{rr}$  – заряд зворотного відновлення [10].

Потужність загальних втрат в транзисторі розраховується як сума

$$P = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}}. \quad (4)$$

Потужність діелектричних втрат на вхідному  $C_{in}$  та вихідному  $C_{out}$  конденсаторах ємністю  $C$

$$P = U^2 \cdot 2\pi f C \cdot \text{tg}\delta, \quad (5)$$

де  $\text{tg}\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат (береться з документації);

$U$  – напруга на конденсаторі (дорівнює вхідній  $U_{in}$  або вихідній  $U_{out}$  напрузі схеми).

Таким чином, загальна потужність втрат в схемі [2] дорівнює

$$P = P_{C_{in}} + P_{C_{out}} + P_{S1} + P_{S2} + P_L. \quad (6)$$

### Оцінка потужності втрат в перетворювачі

За допомогою запропонованої методики були проведені розрахунки за вхідними даними, наведеними у таблиці.

З використанням формули (1) була розрахована питома потужність втрат у сер-

#### Дані для розрахунку втрат

$U_{in}$ , В		12	5
$U_{out}$ , В		5	2
$f$ , кГц		50 – 500	
$t_{on}$ , мкс		0,416	
$I_{out}$ , А		100; 200; 500	
Сердечник	матеріал	SK-28M (ТОНО Zinc)	
	форма	тороїдальна	
Використовуваний транзистор		Power-MOSFET IPT004N03L Infineon	

дечнику за різних значень частоти та індукції. Значення параметрів Штейнмеца обиралися з документації на матеріал від виробника. Результати розрахунку наведено на рис. 4,

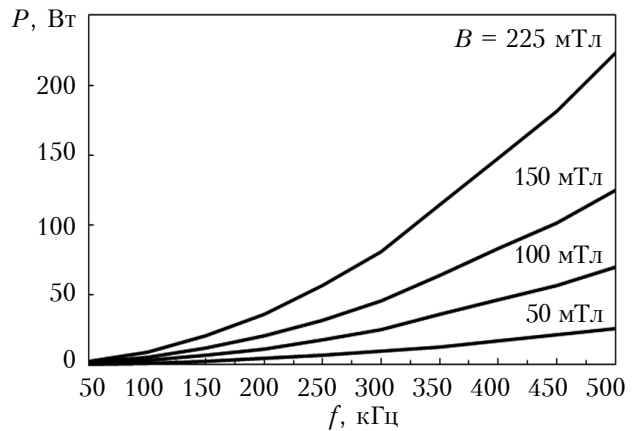


Рис. 4. Залежність втрат у сердечнику від частоти за різних значень магнітної індукції

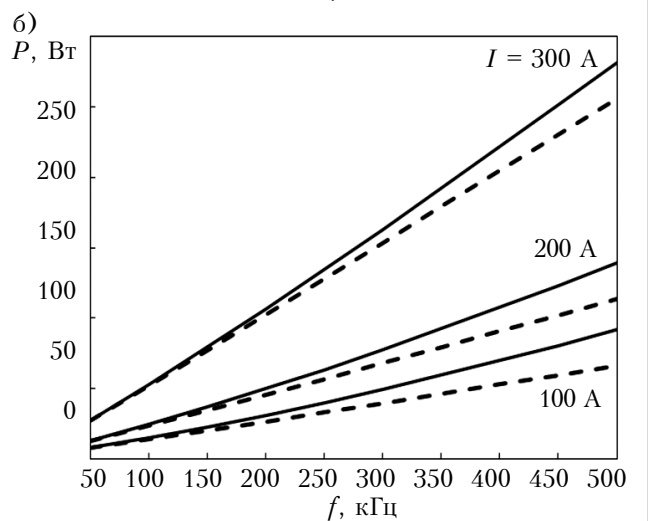
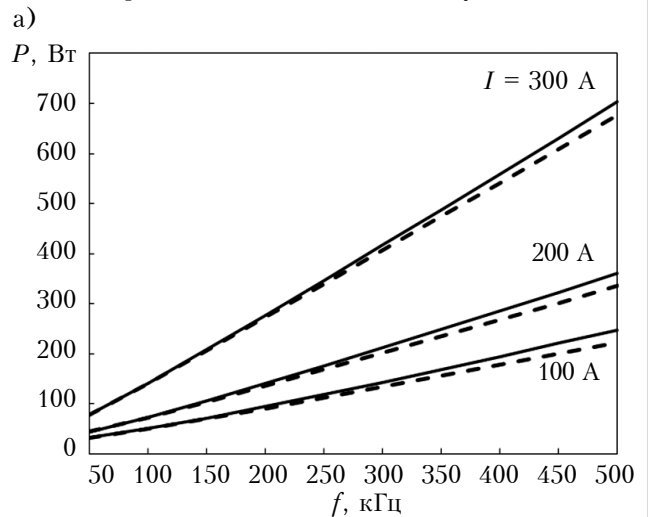


Рис. 5. Залежність втрат в перетворювачі від частоти з урахуванням втрат на індуктивності та без їх урахування (штрихові лінії) за різних значень вихідного струму  $I$  та напруги:

а –  $U_{in} = 12$  В,  $U_{out} = 5$  В; б –  $U_{in} = 5$  В,  $U_{out} = 2$  В

а отримані значення дозволяють розрахувати потужність втрат усієї схеми.

На **рис. 5** зображено графіки залежності потужності втрат у схемі понижувального перетворювача від частоти роботи схеми за різних значень вихідного струму та напруги з урахуванням втрат на індуктивності та без їх урахування. Вони демонструють, що в області високих частот вклад потужності втрат на індуктивному елементі до загальних втрат схеми може бути суттєвим.

### Висновки

Наведені результати розрахунку потужності втрат в імпульсному понижувальному перетворювачі джерела живлення установки контактної мікросварювання підтвердили доцільність врахування втрат на індуктивному елементі, особливо це стосується випадків роботи перетворювачів у високочастотній області. Запропонована методика дозволяє достатньо просто і точно розрахувати ці втрати і завдяки цьому більш точно, ніж загальна, оцінити енергоефективність схеми на етапі проектування перетворювача.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бондаренко А.Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки / Дис. ... канд. техн. наук. — Донбасский государственный технический университет. — Алчевск, 2007.
2. Bondarenko O., Verbytskyi I., Prokopets V. et al. Modular power supply for micro resistance welding // Electrical, Control and Communication Engineering. —

2017. — Vol. 12. — P. 20–26. — <https://doi.org/10.1515/ecce-2017-0003>

3. Salem M. Control and power supply for resistance spot welding (RSW). University of Western Ontario (2011) // Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. [Online]. — <https://ir.lib.uwo.ca/etd/130>

4. Bonislowski M., Holub M. Averaged inverter loss estimation algorithm // 18<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). — 2016. — <http://dx.doi.org/10.1109/EPE.2016>

5. Venkatachalam K., Sullivan C., Abdallah T., Tacca H. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only steinmetz parameters // 2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics. Proceedings. — University of Puerto Rico at Mayaguez, 2002. — P. 36–41.

6. Sullivan C. R., Harris J. H., Herbert E. Core loss predictions for general PWM waveforms from a simplified set of measured data // Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo. — 2010. — P. 1048–1055. — <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2010.5433375>

7. Biela J., Badstuebner U., Kolar J. W. Impact of power density maximization on efficiency of DC-DC converter systems // IEEE Trans. Power Electron. — 2009. — Vol. 24, N 1. — P. 288–300.

8. Miwa Y., Shimizu T. Loss Comparison of Core Materials Used for the Inductor of a Buck-Chopper Circuit // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310402>.

9. Roshen W. A. A practical, accurate and very general core loss model for nonsinusoidal waveforms // IEEE Trans. Power Electron. — 2005. — Vol. 22, N 1. — P. 30–40. — <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2005.1453176>

10. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. — Москва: Солон-Пресс, 2005.

*Дата надходження рукопису до редакції 07.04 2018 р.*

А. Ф. БОНДАРЕНКО, Т. А. РЫЖАКОВА, Ю. В. КОЖУШКО

Украина, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, ryzhakova.tetiana@gmail.com, y.v.kozhushko@gmail.com

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ В ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ УСТАНОВОК КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

*Представлен обзор характеристик контактной сварки и конструктивных особенностей источников питания для контактной сварки, а также топологии схем преобразователей для контактной сварки, в том числе наиболее перспективного из них — транзисторного преобразователя с синхронным транзистором. Показано, что для обеспечения приемлемой энергоэффективности источников питания для контактных сварочных аппаратов при сохранении достаточной точности регулирования тока в сварочном контакте используются специальные режимы импульсных транзисторных преобразователей.*

*Особенности контактной сварки — высокий ток при низком напряжении — создают условия для больших потерь мощности в цепи. В данной работе предложен метод оценки потерь мощности в импульсном преобразователе источника питания установки контактной микросварки, позволяющий проводить на этапе проектирования более точные расчеты по сравнению с общим методом благодаря учету потерь мощности на индуктивном элементе схемы преобразователя. Общие потери вычисляются как сумма потерь на всех элементах схемы. Потери мощности на индуктивности рассчитываются с использованием уравнения Штейнмеца.*

*Полученные в результате расчетов графики продемонстрировали характер частотной зависимости потерь мощности в преобразователе при различных значениях тока и напряжения. Проведенные расчеты*



підтвердили цілесобразність учета потужності втрат на індуктивному елементі, особливо в області високих частот.

Ключевые слова: источник питания, понижающий импульсный преобразователь, индуктивный элемент, мощность потерь, контактная микросварка.

DOI: 10.15222/ТКЕА2018.3.38  
UDC 621.314: 621.311.6

O. F. BONDARENKO, T. O. RYZHAKOVA,  
Yu. V. KOZHUSHKO

Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, ryzhakova.tetiana@gmail.com, y.v.kozhushko@gmail.com

## IMPROVED METHOD OF EVALUATING POWER LOSSES IN PULSE CONVERTERS OF MICRO RESISTANCE WELDING MACHINES

The paper represents resistance welding characteristics and construction features of power supplies for resistance welding. The authors give an overview of circuit topologies of converters for resistance welding and distinguish the most promising one – the transistor buck converter with a synchronous transistor. It is shown that in order to ensure acceptable energy efficiency of power supply for resistance welding machines, while maintaining sufficient accuracy of current regulation in a welding contact, special modes of pulse transistor converters are used.

The analysis of resistance welding features – high currents, low voltages – makes it possible to presume that the evaluation of the power losses in semiconductor elements only is insufficient and needs to be complemented by taking into account the losses on the inductive element of the converter circuit.

In this work, the authors propose the method of estimating the power losses in the pulse buck converter of the power supply of resistance welding machine, which allows for more accurate calculations at the design stage due to consideration of the power losses on the inductive element of the circuit. The methodology is to calculate the total power losses as the sum of power losses on all individual elements of the circuit. Power losses on inductance is calculated using the Steinmetz equation. The calculations carried out with this technique proved the advisability of taking into account the power losses on the inductive element, especially in the region of high frequencies. The obtained diagrams demonstrated the dependency of the power losses in the converter on the frequency at different values of current and voltage.

Keywords: power supply, buck converter, inductive element, power losses, micro resistance welding.

### REFERENCES

- Bondarenko A.F. *Formirovateli impul'sov toka dlya ustanovok kontaktnoi mikrosvariki*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Current pulses generators for micro resistance welding machines. PhD thesis]. – Alchevsk, 2007, 211 p. (Rus)
- Bondarenko O., Verbytskyi I., Prokopets V., Kaloshyn O., Spitsyn D., Ryzhakova T., Kozhushko Y. Modular power supply for micro resistance welding. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2017, vol. 12, pp. 20-26. <https://doi.org/10.1515/ecce-2017-0003>
- Salem M. *Control and power supply for resistance spot welding (RSW)*. University of Western Ontario (2011). Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. [Online]. <http://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
- Bonislawski M., Holub M. Averaged inverter loss estimation algorithm. *18<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*. 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/EPE.2016>
- Venkatachalam K., Sullivan C., Abdallah T., Tacca H. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only steinmetz parameters. *2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, Proceedings*. University of Puerto Rico at Mayaguez, 2002, pp. 36-41.
- Sullivan C. R., Harris J. H., Herbert E. Core loss predictions for general PWM waveforms from a simplified set of measured data. *Power Electron. Conf. Expo.*, 2010, pp. 1048-1055. <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2010.5433375>
- Biela J., Badstuebner U., Kolar J. W. Impact of power density maximization on efficiency of DC-DC converter systems. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 288-300.
- Miwa Y., Shimizu T. Loss Comparison of Core Materials Used for the Inductor of a Buck-Chopper Circuit. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310402>
- Roshen W. A. A practical, accurate and very general core loss model for nonsinusoidal waveforms. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 30-40. <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2005.1453176>
- Semenov B. Yu. *Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu* [Power electronics: from simple to hard]. Moscow, Solon-Press, 2005, 416 p. (Rus)

### Опис статті для цитування:

Бондаренко О. Ф., Рижаківа Т. О., Кожушко Ю. В. Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактної мікросварювання. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 3, с. 38—42. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.38>

### Cite the article as:

Bondarenko O. F., Ryzhakova T. O., Kozhushko Yu. V. Improved method of evaluating power losses in pulse converters of micro resistance welding machines. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 3, pp. 38-42. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.3.38>