

10. Rodriguez J. R., Dixon J. W., Espinoza J. R., Pontt J., and Lezana P. PWM regenerative rectifiers: State of the art. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2005. Vol. 52, no. 1. P. 5–22. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.841149>
11. Fen Li, Yunping Zou, Wei Chen, Jie Zhang. Comparison of Current Control Techniques for Single-phase Voltage source PWM Rectifiers. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, April 2008. P. 1–4. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1109/5.771073>
12. Arpit Bohra, Divya Sajeesh, Chintan Patel and Michael Saldanha. Modulation Techniques in Single Phase PWM Rectifier. *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST)*, 2015 (3):5-7, February 2016. P. 5–7. (Eng.).
13. Zheng Jun, Feng Xiaoyun, Xie Wangyu, Zhang Junling. The Transient Current Control for Single Phase PWM Rectifiers. *Power Electronics*. 2009. Vol. 43, No. 12. P. 2–4. (Eng.).
14. Gernerov G.G., Kovalchuk O.V. Active rectifier – voltage source with hysteresis control system. *Tekhnichna Elektrodynamika: Tematichnyi vipusk «Silova elektronika ta energoefektivnist'»*. 2011. CH. 2. P. 75–82. (Rus.).
15. Gernerov G.G., Kolesnic Y.V. Modulation frequency of input current in active rectifier-voltage source with hysteresis control system. *Tekhnichna elektrodynamika*. Kyiv. 2008. T. 3, Tematichnyi vip. P. 79–84. (Rus.).
16. Zamaruev V.V., Ivakhno V.V. Determination of dynamic losses in semiconductor switches of power electronics devices in the Matlab / Simulink environment. *Designing engineering and scientific applications in the MATLAB environment: materials of the V International Scientific Conference*. Kharkiv, 2011. P. 623–631. (Rus.). URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%20623-631%20Zamaruev.pdf> (Accessed 13.04.2018).

Надійшла 16.04.2018  
Received 16.04.2018

УДК 621.316.721

## ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ КЛЮЧАМИ В КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

**О.М. Городній\***, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет,  
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна  
e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

*Проаналізовано особливості керування квазірезонансними імпульсними перетворювачами (КРІП), що перемикаються при нульовому струмі (КРІП-ПНС) та КРІП, що перемикаються при нульовій напрузі (КРІП-ПНН), описано шляхи зменшення динамічних втрат у разі перемикавання електронних ключів. Також обґрунтовано причини зміни параметрів струмів та напруг у резонансних контурах цих перетворювачів, у результаті яких змінюються їх власна частота та наслідки цього явища. Розглянуто принципи автоматичного квазікерування електронними ключами цих перетворювачів, завдяки яким спрощується синтез систем керування та зменшуються динамічні втрати в електронних ключах. Бібл. 10, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** квазірезонансний імпульсний перетворювач, резонансний струм, резонансна напруга, електронний ключ, комутаційні втрати.

**Вступ.** Сучасні перетворювачі електричної енергії за своїм складом мають послідовні або паралельні імпульсні перетворювачі (ІП) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) [1–3]. Для поліпшення масогабаритних показників таких перетворювачів необхідно збільшувати частоту їх роботи. Підвищення частоти роботи перетворювачів пов'язано зі збільшенням комутаційних втрат. Ця проблема частково вирішується за рахунок використання електронних ключів з більшою швидкістю та використання снаберних схем [2, 3]. Це дає змогу збільшити частоту роботи ІП з ШІМ до 300 кГц. Більш продуктивним способом підвищення частоти до одиниць та десятків мегагерц є використання КРІП з частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ) [1, 4–10]. У роботах [1, 4, 5, 7] наведено метод розрахунку комутаційних втрат в електронних ключах ІП з ШІМ та КРІП з ЧІМ. Зміну власної частоти резонансного контура необхідно враховувати у разі синтезу систем керування, оскільки це може призвести до збільшення комутаційних втрат та розширення спектрів струмів споживання перетворювачів.

**Мета роботи:** аналіз факторів, які впливають на зміну частоти резонансного контура; оцінка комутаційних втрат у випадку неврахування цих факторів; розгляд принципів автоматичного квазікерування електронними ключами, які будуть перемикатися при нульовому струмі (КРІП-ПНС) або нульовій напрузі (КРІП-ПНН) у разі зміни власної частоти резонансного контура.

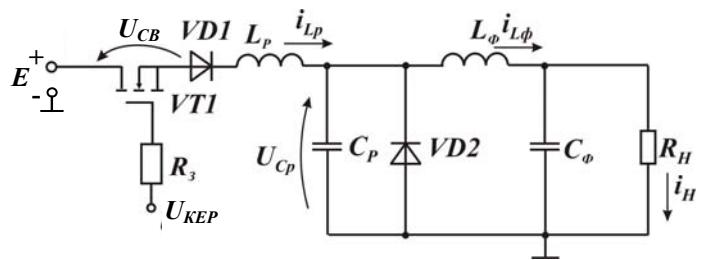


Рис. 1

**Причини зміни власної частоти резонансного контура в КРІП та наслідки цього явища.** Як відомо, для зменшення комутаційних втрат в КРІП-ПНС необхідно вмикати та вимикати електронний ключ на моменти переходу резонансного струму через нуль. Електронний ключ буде вмикатися практично при нульовому струмі, оскільки послідовно з ним підключена резонансна індуктивність, але момент вимикання необхідно визначати для зменшення динамічних втрат. В КРІП-ПНН транзистор буде завжди вмикатися у разі нульової напруги, тому що резонансна ємність підключена паралельно йому. Але моменти вимикання при нульовій напрузі також потрібно визначати. Систему керування можна налаштувати на постійне значення часу відкритого стану електронного ключа, якщо умови роботи перетворювача не змінюються. Основні фактори, які призводять до зміни власної частоти резонансного контура, такі: зміна опору навантаження; зміна параметрів резонансного контура та навантаження внаслідок зміни температури; одночасний вплив перелічених факторів. Розглянемо наслідки таких явищ на прикладі послідовного КРІП-ПНС (рис. 1).

Метод розрахунку енергетичних втрат в електронному ключі послідовного КРІП-ПНС докладно описано в роботах [1, 4, 5]. У загальному вигляді період роботи перетворювача розбивався на чотири інтервали, на яких визначалися залежності  $U_{TP}(t)$  та  $i_{TP}(t)$ , після чого були отримані втрати потужності на кожному інтервалі згідно з формулою (1):

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} U_{TP}(t) \cdot i_{TP}(t) dt. \quad (1)$$

Інтегральна потужність втрат розраховувалась за формулою (2):

$$P_{\text{інт}} = P_{\text{вм}} + P_{\text{н.с.}} + P_p + P_{\text{вим}}, \quad (2)$$

де  $P_{\text{вм}}$  – потужність втрат у разі вмикання;  $P_{\text{н.с.}}$  – потужність втрат у разі наростання струму;  $P_p$  – потужність втрат у разі резонансу;  $P_{\text{вим}}$  – потужність втрат у разі вимикання.

За результатами розрахунків побудовано часові діаграми, які наведено на рис. 2 (1, 2 – електронний ключ вимикається у разі нульового струму; 3 – у разі ненульового струму). У таблиці наведено опори навантажень  $R_H$ , тривалості імпульсів керування  $t_i$  та числові значення втрат в електронному ключі (рядки 1, 2 – вимикання у разі нульового струму; 3, 4 – у разі ненульового струму). При цьому напруга  $E$  дорівнювала 30 В, номінальне значення вихідної напруги – 25 В.

№	Параметри навантаження та $t_i$	$P_{\text{вм}}$ , Вт	$P_{\text{н.с.}}$ , Вт	$P_p$ , Вт	$P_{\text{вим}}$ , Вт	$P_{\text{інт}}$ , Вт
1	$R_H = 10 \text{ Ом}, t_i = 250 \text{ нс}$	0,0014	0,0697	0,597	0,0015	0,668
	$R_H = 10 \text{ Ом}, t_i = 250 \text{ нс}$	0,2%	10,4%	89,3%	0,2 %	100%
2	$R_H = 5 \text{ Ом}, t_i = 200 \text{ нс}$	0,0014	0,0873	1,351	0,0032	1,440
	$R_H = 5 \text{ Ом}, t_i = 200 \text{ нс}$	0,097%	6%	93,7%	0,2%	100%
3	$R_H = 10 \text{ Ом}, t_i = 150 \text{ нс}$	0,00137	0,0321	0,442	0,427	0,902
	$R_H = 10 \text{ Ом}, t_i = 150 \text{ нс}$	0,2%	3,5%	49%	47,3%	100%
4	$R_H = 5 \text{ Ом}, t_i = 150 \text{ нс}$	0,00138	0,0220	0,753	0,736	1,512
	$R_H = 5 \text{ Ом}, t_i = 150 \text{ нс}$	0,1%	1,4%	49,8%	48,7%	100%

З таблиці видно, якщо електронний ключ вимикається не при нульовому струмі, то внесок втрат його вимикання збільшується з 0,2 % (1 та 2 рядки) до 47,3 % (3 рядок) та 48,7 % (4 рядок).

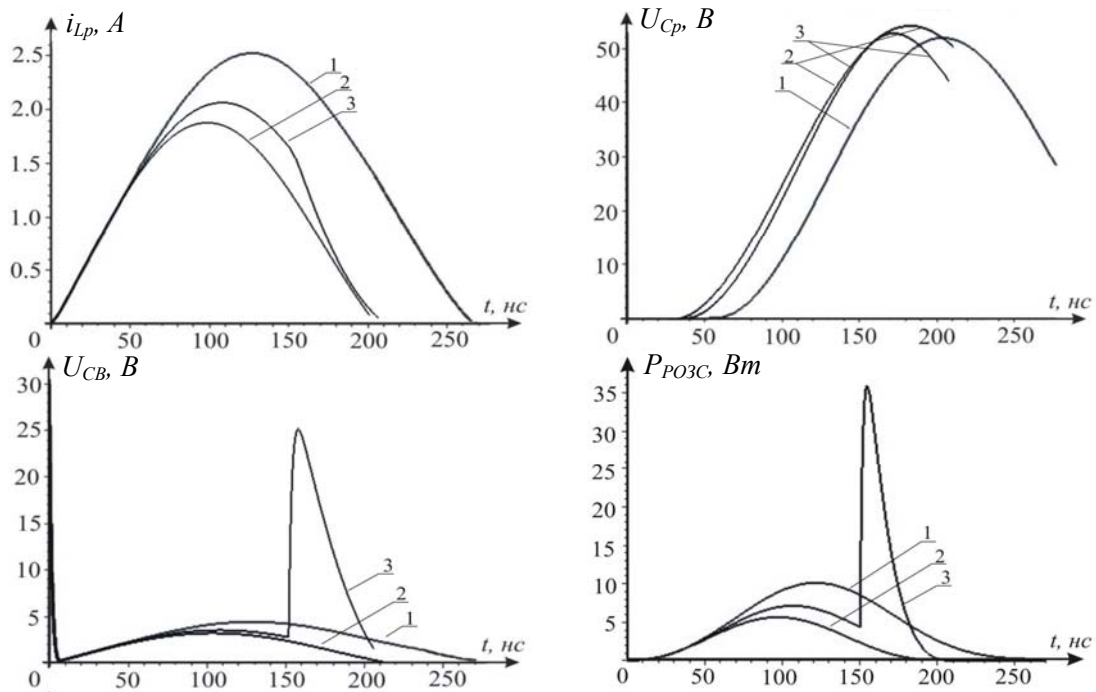


Рис. 2

Як показали дослідження послідовних та паралельних КРІП-ПНС, у разі зменшення опору навантаження резонансна частота змінюється. На рис. 3 показані комутаційні характеристики послідовного (а) і паралельного (б) КРІП-ПНС, на яких зображені залежності тривалості імпульсів керування електронними ключами  $t_i$  від зміни опору навантаження  $R_H$  при різних періодах імпульсів керування  $T_{\text{ПЕР}}$ . На комутаційних характеристиках ми бачимо три характерних області: I – область жорсткого вимкнення електронного ключа, коли струм резонансного контура не досягає нульового значення на першому напівперіоді його коливання; II – область динамічної комутації, коли струм резонансного контура досягає нульового значення на першому напівперіоді його коливання, однак момент його переходу через нуль значно залежить від величини опору навантаження; III – область статичної комутації, коли струм резонансного контура досягає нульового значення на першому напівперіоді його коливання, а момент його переходу через нуль не залежить від зміни опору навантаження.

**Квазікерування КРІП.** На рис. 4 показані функціональні схеми квазікерування КРІП: а – КРІП-ПНС, б – КРІП-ПНН. На початку роботи КРІП система СК формує короткий імпульс, який відкриває електронний ключ. Після цього на вторинних обмотках ТС (КРІП-ПНС) або ТН (КРІП-ПНН) формуються напруги, пропорційні резонансному струму або резонансній напрузі відповідно. Вони підсилюються ПО, формуючи імпульси відкриття перетворювача, тобто формується місцевий позитивний зворотний зв'язок, який підтримує електронні ключі у відкритому стані. Імпульс керування СК при цьому може зніматися. Тоб-

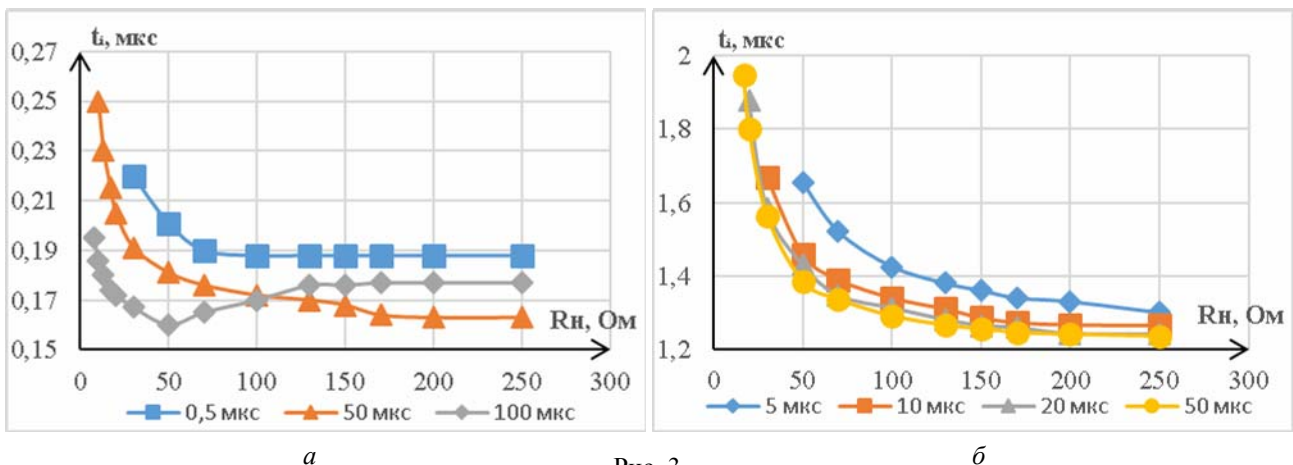


Рис. 3

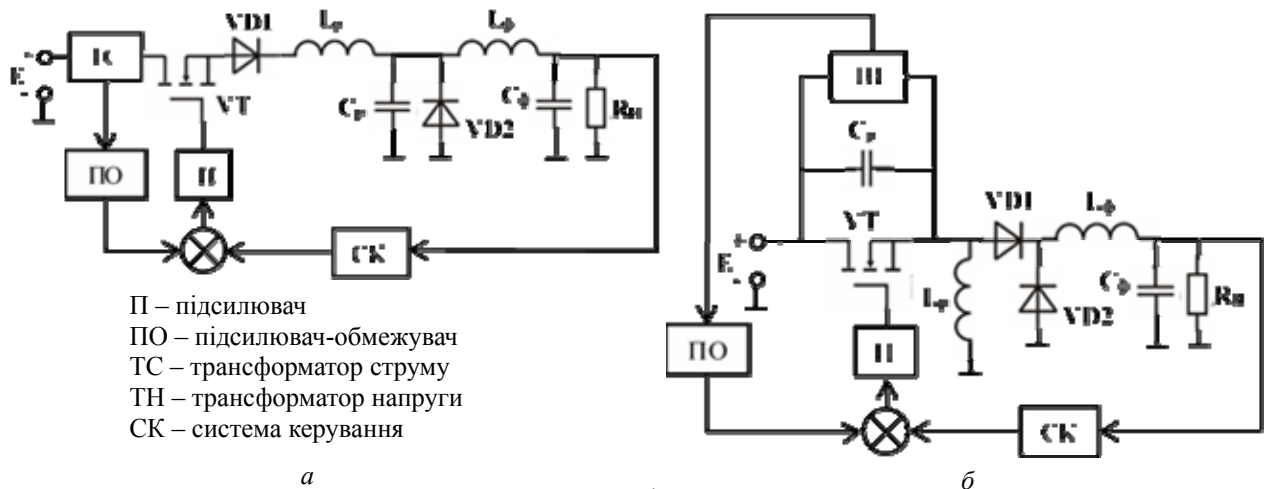


Рис. 4

то електронні ключі на подальшому інтервалі відкритого стану від СК не керуються. Це і є принцип квазікерування. Коли резонансний струм (КРІП-ПНС) або напруга (КРІП-ПНН) буде наближатися до нуля, позитивний зворотний зв'язок закінчиться і електронні ключі закриються. Умови виникнення позитивного зворотного зв'язку визначаються принципами теорії автоматичного керування для замкнутих систем.

**Висновки.** Визначено фактори, які впливають на власну частоту резонансного контура в КРІП; показано, що вимикання електронного ключа при ненульовому струмі призводить до збільшення комутаційних втрат на інтервалі вимикання більше ніж у 200 разів; обґрунтовано використання автоматичного квазікерування електронними ключами КРІП, яке дало змогу вимикати електронні ключі у разі нульового струму (КРІП-ПНС) або нульової напруги (КРІП-ПНН) під впливом всіх дестабілізуючих факторів. Використання автоматичного квазікерування КРІП дало змогу спростити синтез систем керування перетворювачів, а використання трансформаторів струму або трансформаторів напруг дає змогу забезпечити гальванічну розв'язку силової частини та системи керування.

1. Городний А.Н. Анализ мощности рассеивания транзисторным ключом в последовательных импульсном и квазирезонансном преобразователях. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 75–76.
2. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Мороз А.В. Регульовані фільтри джерел живлення для захисту інформації в мікроконтролерах: монографія. Київ: Кафедра, 2016. 184 с.
3. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Пазеев А.Г. Безперервні наближені моделі перетворювачів змінної напруги в постійну з активною корекцією коефіцієнта потужності. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 6. С. 11–17.
4. Denisov Y., Gordienko V., Gorodny A., Stepenko S., Yershov R., Prokhorova A., Kostyrieva O. Power losses in MOSFET switch of quasi-resonant pulse converter with series resonant circuit. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2016. P. 1–6.
5. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. International Scientific Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE*. 2016. P. 327–332.
6. Yershov R.D., Naumov D.O., Revko A.S., Tytelmaier K.O. Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm. *Applied Physics, 2015 International Young Scientists Forum (YSF)*. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333224
7. Gorodny O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies. *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 232–235.
8. Tomioka S., Abe S., Shoyama M., Ninomiya T., Firmansyah E. A zero-current-switch quasi-resonant boost converter with transformer compensated clamp circuit. 19th *International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Barcelona, 2009. P. 1–8.
9. Tomioka S., Abe S., Shoyama M., Ninomiya T., Firmansyah E. Zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application. 24th Annual IEEE *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2009. P. 1165–1169.
10. Voytenko V., Stepenko S. Simulation peculiarities of high-frequency zero-current switching quasi-resonant boost converter. Proc. IEEE 35th IEEE International Conference on *Electronics and Nanotechnology ELNANO2015*. Kyiv, Ukraine, 21–24 April 2015. P. 486–491. DOI:10.1109/ELNANO.2015. 7146935

УДК 621.316.721

**А.Н. Городний**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет,  
ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14027, Украина

### **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ КЛЮЧАМИ В КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ**

*Проанализированы особенности управления квазирезонансными импульсными преобразователями (КРИП), переключаемыми при нулевом токе (КРИП-ПНТ), и КРИП, переключаемыми при нулевом напряжении (КРИП-ПНН), описаны способы уменьшения динамических потерь при переключении электронных ключей. Также обоснованы причины изменения параметров токов и напряжений в резонансных контурах этих преобразователей, в результате которых меняется их собственная частота, и последствия этого явления. Рассмотрены принципы автоматического квазиуправления электронными ключами этих преобразователей, благодаря которым упрощается синтез систем управления и уменьшаются динамические потери в электронных ключах. Библ. 10, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** квазирезонансный импульсный преобразователь, резонансный ток, резонансное напряжение, электронный ключ, коммутационные потери.

**O.M. Gorodniy**

Chernihiv National University of Technology,  
Shevchenka str., 95, Chernihiv, 14035, Ukraine

### **FEATURES OF CONTROLLING ELECTRONIC SWITCHES IN QUASI-RESONANT PULSE CONVERTERS**

*The features of the control of zero-current-switch quasi-resonant pulse converter (QRPC-ZCS) and zero-voltage-switch quasi-resonant pulse converter (QRPC-ZVS) are researched. The ways of the dynamic losses reduction when switching electronic switches are described. Also reasons for changing the parameters of currents and voltages in the resonant circuits of these converters, that changes their own frequency, and the consequences of this fact are substantiated. The principles of automatic quasi-control of electronic switches of these converters are considered, what simplifies the synthesis of control systems and reduces the dynamic losses in electronic switches. References 10, figures 4, table.*

**Key words:** quasi-resonance pulse converter, resonant current, resonant voltage, electronic switch, switching losses.

1. Gorodnyi A.N., Analyzing of transistor switch dissipation power in sequential type switched-mode and quasi-resonant zero current switch converters. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No. 3. P. 75–76 (Rus).
2. Zhuikov V.Y., Tereshchenko T.O., Yamnenko Y.S., Moroz A.V., Adjustable filters of power supplies for information security in microcontrollers: monograph. Kiev: Kafedra, 2016. 184 p. (Ukr)
3. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Paziiev A.G., Continuous approximate model of AC/DC converters with active power factor correction. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2011. No. 6. P. 11–17. (Ukr)
4. Denisov Y., Gordienko V., Gorodny A., Stepenko S., Yershov R., Prokhorova A., Kostyrieva O. Power losses in MOSFET switch of quasi-resonant pulse converter with series resonant circuit. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2016. P. 1–6.
5. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. International Scientific Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE*. 2016. P. 327–332.
6. Yershov R.D., Naumov D.O., Revko A.S., Tytelmaier K.O. Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm. *Applied Physics, 2015 International Young Scientists Forum (YSF)*. 2015. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333224
7. Gorodniy O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies. *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 232–235.
8. S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama, T. Ninomiya, E. Firmansyah, A zero-current-switch quasi-resonant boost converter with transformer compensated clamp circuit. 19th International Scientific Conference on *Electric Power Engineering (EPE)*. Barcelona, 2009. P. 1–8.
9. S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama, T. Ninomiya, E. Firmansyah, Zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application. 24th Annual IEEE *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2009. P. 1165–1169.
10. Voytenko V., Stepenko S. Simulation peculiarities of high-frequency zero-current switching quasi-resonant boost converter. Proc. IEEE 35th IEEE International Conference on *Electronics and Nanotechnology ELNANO2015*. Kyiv, Ukraine, 21–24 April 2015. P. 486–491. DOI:10.1109/ELNANO.2015.7146935.

Надійшла 31.05.2018

Received 31.05.2018