

УДК 621.316.721

Ю.О. Денисов¹, О.М. Городній¹, В.В. Гордієнко¹, С.М. Бойко², С.А. Степенко¹¹Чернігівський національний технологічний університет,
вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна.²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.

Енергетичні показники паралельного імпульсного квазірезонансного перетворювача з розширеним діапазоном регулювання для джерел живлення радіоелектронної апаратури

В даній статті розглянуті питання поліпшення енергетичних показників підвищуючого квазірезонансного імпульсного перетворювача з паралельним резонансним контуром, який перемикається при нульовому струмі (КРІП-ПНС) та розширення діапазону регулювання його вихідної напруги. Діапазон регулювання вихідної напруги запропоновано розширити за рахунок придушення паразитних коливань шляхом підключення додаткового діода. Крім того, в статті приведена порівняльна оцінка енергетичних втрат у транзисторних ключах паралельного КРІП-ПНС та імпульсного перетворювача (ІП) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) у широкому діапазоні робочих частот. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: квазірезонансний перетворювач; імпульсний перетворювач; транзисторний ключ; інтервал комутації; діапазон регулювання; паразитні коливання.

Вступ

Сучасні електроенергетичні системи в своєму складі крім стандартного електротехнічного обладнання (трансформаторної підстанції, мережі живлення, генератори електричної енергії, які працюють на невідновлювальних джерелах енергії та ін.) мають відновлювані джерела електричної енергії (сонячні, вітрові та ін.). Ці джерела виробляють електричну енергію, якість та параметри якої не дозволяють безпосередньо підключати їх до електромережі, тому необхідно використовувати ІП з ШІМ. Крім того, сучасні системи вторинного електроживлення радіоелектронної апаратури також в своєму складі мають послідовні та паралельні ІП з ШІМ та частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ) [1–12]. Розробники радіоелектронної апаратури підвищують енергетичну ефективність та поліпшують питомі параметри ІП або за рахунок використання нових діелектричних та теплопровідних матеріалів, впроваджуючи новітні па-

сивні та активні радіоелементи [6], або пропонує нові схемні рішення. Доведеним прикладом останнього методу є використання в якості ІП КРІП-ПНС та квазірезонансних імпульсних перетворювачів, які перемикаються при нульовій напрузі (КРІП-ПНН) з ЧІМ [3–5, 7–12]. При цьому повинні зберігатися високі енергетичні показники в широкому діапазоні регулювання вихідної напруги.

У ІП з ШІМ велика частина енергії втрат (до 50%) [6] розсіюється на транзисторних ключах, при цьому основна її частина — це динамічні втрати при перемиканні. З ростом частоти комутації ІП (до 200 кГц) динамічні втрати транзисторних ключів різко збільшуються, що обмежує частоту їх роботи та поліпшення масогабаритних параметрів. Використання квазірезонансних перетворювачів дозволило зменшити комутаційні втрати у декілька разів, підвищити частоту їх роботи (до 10 МГц) та на порядок поліпшити питомі параметри [3, 7, 8]. Оцінка енергетичних втрат у послідовних КРІП-ПНС та ІП з ШІМ наведена в роботі [3]. Такий самий метод оцінки комутаційних втрат у паралельних КРІП-ПНС з паралельним та послідовним резонансними контурами наведений в роботах [3, 5, 7]. Цей метод дозволив врахувати вплив силових частин перетворювачів, паразитних параметрів транзисторних ключів та навантаження на енергетичні втрати в електронних ключах, які підтверджено експериментально.

Метою роботи є розширення діапазону регулювання вихідної напруги за рахунок зменшення паразитних коливань у паралельному КРІП-ПНС з паралельним резонансним контуром (далі паралельний КРІП-ПНС), оцінка енергетичних втрат у транзисторних ключах КРІП-ПНС та паралельних ІП з ШІМ.

Розширення діапазону регулювання вихідної напруги за рахунок зменшення паразитних коливань в підвищуючому КРІП-ПНС

Як показали дослідження, після вимикання транзисторного ключа у паралельному КРІП-ПНС (часові діаграми роботи транзисторного

ключа та електрична принципова схема якого наведені на рис. 1 та рис. 2, відповідно) виникають паразитні затухаючі високочастотні коливання. Ці коливання виникають у контурі, який складається з резонансної індуктивності L_r та паразитної ємності транзисторного ключа C_0 .

Частота цих коливань набагато більша, ніж частота роботи КРІП-ПНС (при частоті роботи перетворювача 1 МГц, частота паразитних коливань сягала 10 МГц), а тривалість затухання могла досягати семи тривалостей імпульсу керування транзистора VT.

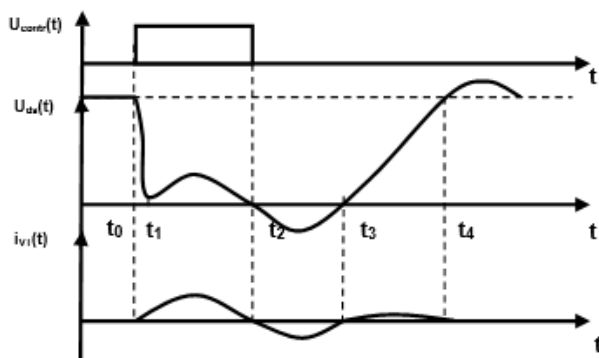


Рис. 1.

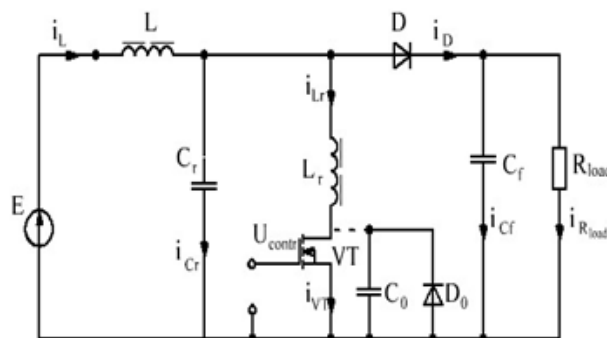


Рис. 2.

Процес перемикання електронного ключа складається з п'яти комутаційних інтервалів:

- 1) інтервал відкриття VT (t_0-t_1);
- 2) інтервал відкритого стану VT, коли струм протікає через канал транзистора (t_1-t_2);
- 3) інтервал відкритого стану VT, коли струм замикається через зворотній діод D0 (t_2-t_3);
- 4) інтервал закриття VT (t_3-t_4);
- 5) інтервал закритого стану VT, коли енергія з накопичувальної індуктивності L передається в навантаження (t_4-t_0).

На рис. 3 наведена модель паралельного КРІП-ПНС, а на рис. 4 показані часові діаграми його роботи у випадку відсутності діода VD3. П'ять характерних інтервалів комутації КРІП-ПНС, які описані вище, для цієї моделі відповідають часовим діапазонам: 1-2; 2-4; 4-6; 6-7; 7-1. З цієї часової діаграми видно, що паразитні коливання не закінчилися до моменту приходу наступного імпульсу керування.

Наявність коливань на п'ятому інтервалі комутації призводить до додаткових втрат в перетворювачі за рахунок розсіювання енергії паразитних коливань на його елементах. Крім цього, регулювання вихідної напруги у КРІП-ПНС

здійснюється за рахунок ЧІМ, тому якщо цей перетворювач працює при значеннях γ більше 0,2, транзисторний ключ може відкриватися не при нульовому струмі. Це призводить до збільшення динамічних енергетичних втрат у транзисторному ключі. Рішення цієї проблеми було знайдено шляхом моделювання електромагнітних та енергетичних процесів цього перетворювача та підтверджено експериментально.

Якщо під'єднати додатковий діод між стоком електронного ключа та навантаженням (діод VD3 на рис. 3), паразитні коливання зменшаться практично до нуля, що пояснюється підключенням через діод VD3 опору навантаження до контуру $L_r C_0$. Це різко зменшує сталу часу та збільшує затухання паразитного контуру. Крім того, енергія з паразитного коливального контуру передається в навантаження, що збільшує жорсткість вихідної характеристики перетворювача.

Часові діаграми роботи такого поліпшеного перетворювача показано на рис. 5. На цьому рисунку п'ять характерних інтервалів комутації КРІП-ПНС, які описані вище, відповідають часовим діапазонам: 1-3; 3-5; 5-7; 7-8; 8-1.

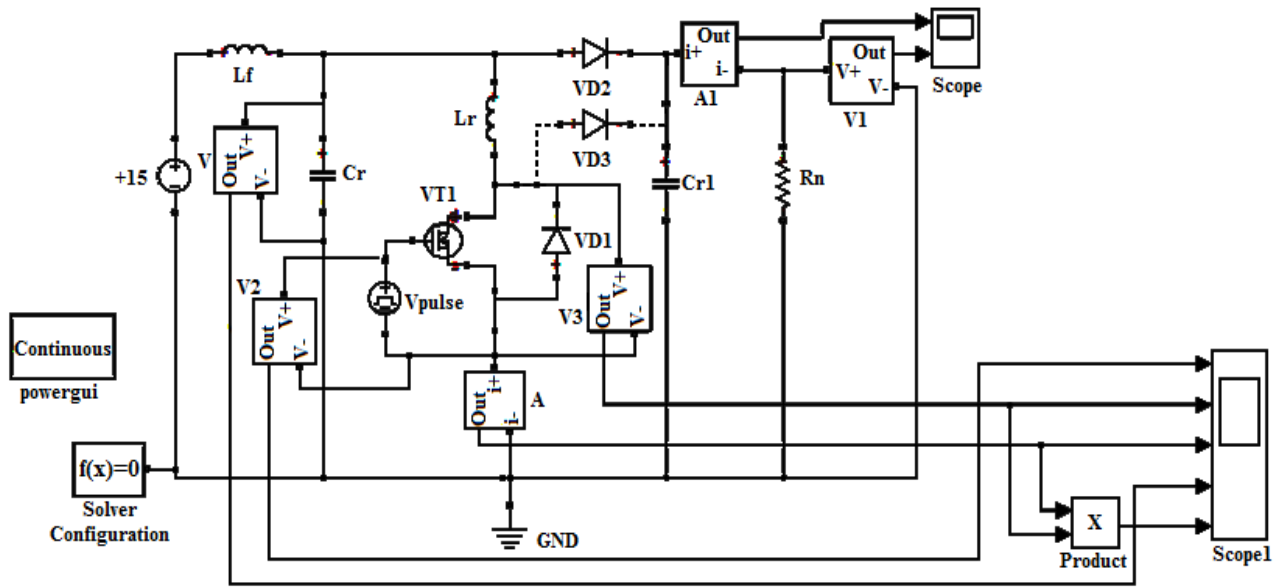


Рис. 3.

Таке схемне рішення не зменшує значно час закривання транзисторного ключа, тому що при вимиканні його диференціальний опір дуже великий та через нього перезаряджається резонансна ємність C_r . C_r набагато більше, ніж C_0 , а диференціальний опір транзистора при закриванні набагато більший, ніж опір навантаження.

Тобто, час закривання визначається величиною диференціального опору, та C_r . Але паразитні коливання практично відсутні, тому динамічний діапазон регулювання γ можна збільшити практично до 0,5 без збільшення енергетичних втрат в перетворювачі.

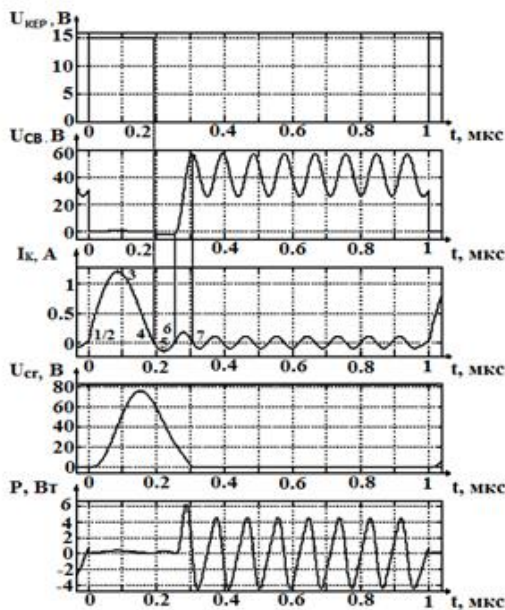


Рис. 4.

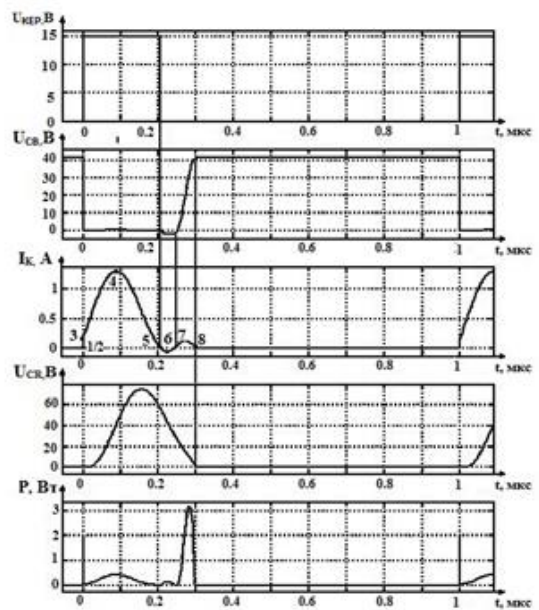


Рис. 5.

Порівняння енергетичних втрат у транзисторних ключах підвищувачих ІП з ШІМ та КРІП-ПНС

Для оцінки енергетичних втрат у транзисторному ключі підвищувачого ІП з ШІМ була складена його модель та отримано часові діаграми роботи цієї моделі. Процес перемикання електронного ключа складається з чотирьох комутаційних інтервалів. Загальні втрати у транзисторних ключах підвищувачих КРІП-ПНС та ІП з ШІМ розраховуються як сума втрат на кожному комутаційному інтервалі. Втрати на останньому інтервалі для кожного перетворювача можна не враховувати. Транзисторні ключі на цьому

інтервалі закриті, тому втрати в них близькі до нуля. Потужність розсіювання на кожному інтервалі розраховується як:

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} u_{ds}(t) \cdot i_{VT}(t) dt, \quad (1)$$

де u_{ds} — напруга стік-витік; i_{VT} — струм через транзисторний ключ; n — номер комутаційного інтервалу. Але більш правильним буде оцінювати втрати енергії на транзисторних ключах, тому що тривалість інтервалів комутації різна.

$$Q_n = P_n \cdot (t_n - t_{n-1}) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} u_{ds}(t) \cdot i_{VT}(t) dt. \quad (2)$$

Таблиця 1.

Частота, кГц	$Q_{КРІП}$, мкДж	$Q_{ІП}$, мкДж	$Q_{ІП}/Q_{КРІП}$
100	0,12	0,36	3,00
250	0,42	1,49	3,57
500	0,59	2,43	4,10
750	0,70	4,35	5,62
1000	1,01	5,77	5,71

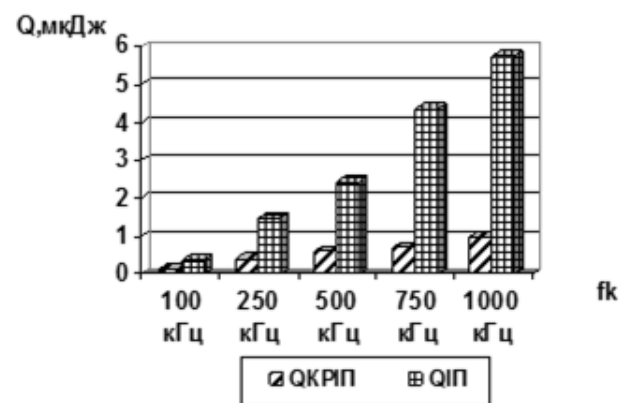


Рис. 6.

Порівняння енергетичних втрат у транзисторних ключах цих перетворювачів було проведено у діапазоні частоти роботи від номінальної для ІП з ШІМ (100 кГц) до номінальної для КРІП-ПНС (1 МГц). Результати оцінки енергетичних втрат наведені у таблиці та на діаграмі (рис. 6).

Висновки

Результати моделювання та експериментальних досліджень паралельних КРІП-ПНС та ІП з ШІМ дозволяють зробити наступні висновки:

1) за рахунок під'єднання додаткового діода між стоком електронного ключа паралельного КРІП-ПНС та навантаженням вдалося зменшити практично до нуля паразитні коливання та розширити діапазон регулювання вихідної напруги до $\gamma=0,5$;

2) при такому розширенні діапазону регулювання вихідної напруги, енергетичні втрати в електронному ключі паралельного КРІП-ПНС зменшуються на 10%;

3) втрати у транзисторному ключі паралельного КРІП-ПНС набагато менше, ніж у паралельному ІП з ШІМ (3 - 5,7 разів) у широкому діапазоні робочих частот цих перетворювачів.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Жуйков В. Я. Регульовані фільтри джерел живлення для захисту інформації в мікроконтролерах: монографія / В. Я. Жуйков, Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, А. В. Мороз. – К.: Кафедра, 2016. – 184 с.
3. Городний А. Н. Анализ мощности рассеивания транзисторным ключом в последовательных импульсном и квазирезонансном преобразователях / А. Н. Городний // Технічна електродинаміка. — 2012. — №3. — С. 75-76.

4. Denisov Y. O. Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost / Denisov Y. O., Stepenko S. A., Gorodny A. N., Kravchenko V. A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2014. – P. 393-397.
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 // Proceedings of the IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2016), April 19-21, 2016, Kyiv, Ukraine. – 2016. – P. 327–332.
6. Савенков В. Инновационное развитие модульных источников вторичного электропитания — от простого к лучшему / В. Савенков // CHIP NEWS Украина. – 2013. – №4. – С. 12 – 22.
7. Денисов Ю. А. Сравнение потерь мощности в ключах повышающих КРИП с параллельным и последовательным резонансными контурами / Ю.А. Денисов, А. Н. Городний, В.В. Гордиенко, С.А. Степенко, Р.Д. Ершов, Т.М. Теплая // Технічна електродинаміка. — 2016. — №4. — С. 44-46.
8. Городній О. М. Порівняльна оцінка енергетичної ефективності імпульсних перетворювачів з квазірезонансними та звичайними ключами за результатами моделювання / О. М. Городній, В. В. Гордієнко, Б. І. Чуб // Вісник Чернігівського державного техно - логічного університету. — 2012. — №4(61). — С. 222-231.
9. Городний А. Н. Сравнение энергетической эффективности параллельных квазирезонансных импульсных преобразователей, переключаемых при нулевом токе / А. Н. Городний, В. В. Гордиенко, С. М. Степанчук // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – №4(69) – С. 183-191.
10. Денисов Ю. А. Статические характеристики квазирезонансного импульсного преобразователя с параллельным контуром, переключаемого при нулевом токе / Ю. А. Денисов, А. Н. Городний // Технічна електродинаміка. — 2011. — Ч. 1. — С. 20-26. Темат. вип.
11. Денисов Ю. О. Моделирование процессов коммутации в КРИП ПНТ с учетом паразитных параметров / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. В. Савченко // Технічна електродинаміка. — 2008. — Ч. 1. — С. 87-90. Темат. вип.
12. Денисов Ю. О. Особливості роботи та статичні характеристики КРИП-ПНС паралельного типу/ Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. А. Купко// Вісник Чернігівського державного технологічного університету. — 2012. — №1(55). — С. 239-245.

Поступила в редакцію 29 июля 2016 г.

УДК 621.316.721

Ю.А. Денисов¹, А.Н. Городний¹, В.В. Гордиенко¹, С.Н. Бойко², С.А. Степенко¹

¹Черниговский национальный технологический университет,

ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина.

²Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Першотравнева, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина.

Енергетические показатели параллельного импульсного квазирезонансного преобразователя с расширенным диапазоном регулирования для источников питания радиоэлектронной аппаратуры

В данной статье рассмотрены вопросы улучшения энергетических показателей повышающего квазирезонансного импульсного преобразователя с параллельным резонансным контуром, переключающегося при нулевом токе (КРИП-ПНТ) и расширение диапазона регулирования его выходного напряжения. Диапазон регулирования выходного напряжения предложено расширить за счет подавления паразитных колебаний путем подключения дополнительного диода. Кроме

того, в статье приведена сравнительная оценка энергетических потерь в транзисторных ключах параллельного КРИП-ПНТ и импульсного преобразователя (ИП) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в широком диапазоне рабочих частот. Библ. 12, рис. 6.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь; импульсный преобразователь; транзисторный ключ; интервал коммутации; диапазон регулирования; паразитные колебания.

UDC 621.316.721

Y.A. Denisov¹, A.N. Gorodniy¹, V.V. Gordienko¹, S.N. Boyko², S.A. Stepenko¹

¹Chernihiv National University of Technology,

Shevchenko str, 95, Chernihiv, 14027, Ukraine.

²Kremenchuk National University named after Mikhailo Ostrogradskiy

Pershotravneva str, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine.

Energy indicators of the parallel pulse quasi-resonant converter with extended control range for radioelectronic apparatus power supplies

This article describes the issues of energy indicators improvement for the boost quasi-resonant pulse converter with a parallel resonant circuit that switches at zero current (QRPC-ZCS) and the extension of its output voltage control range. It is proposed to extend the output voltage control range of the converter by suppressing the parasitic oscillation using connection of additional diode. Moreover, the article provides a comparative assessment of the energy losses in transistor switches of the parallel QRPC-ZCS and pulse converter (PC) with pulse-width modulation (PWM) in a wide range of operating frequencies. Reference 12, Figures 6.

Keywords: quasi-resonant converter; pulse converter; transistor switch; switching interval; control range; parasitic oscillations.

Reference

1. Shydlovskiy, A. K., Zharkin, A. F., Paziiev, A. G. (2011). Continuous approximate model of AC/DC converters with active power factor correction. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 6, P. 11-17. (Ukr)
2. Zhuikov, V. Y., Tereshchenko, T. O., Yamnenko, Y. S., Moroz, A. V. (2016). Adjustable filters of power supplies for information security in microcontrollers: monograph. Kiev, Kafedra, 184 p. (Ukr)
3. Gorodniy, A. N. (2012). Analyzing of transistor switch dissipation power in sequential type switched-mode and quasi-resonant zero current switch converters. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 3, P. 75–76 (Rus).
4. Denisov, Y. O., Stepenko, S. A., Gorodny, A. N., Kravchenko, V. A. (2014). Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost Converters. 34th IEEE International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2014. P. 393-397.
5. Denisov, Y., Gorodny, A., Gordienko, V., Yershov, R., Stepenko, S., Kostyrieva, O., Prokhorova, A. (2016). Input Current Parameters Analysis for PFC based on Quasi-Resonant and Conventional Boost Converters. 36th IEEE International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2016. P. 327-332.
6. Savenkov, V. (2013). Innovative development of modular sources of secondary power - from the simple to the best. *CHIP NEWS Ukraine*, no. 4, P. 12-22. (Rus)
7. Denysov, Yu. O., Gorodniy, O. M., Gordienko, V. V., Stepenko, S. A., Yershov, R. D., Tepla, T. M. (2016) Comparison of power losses in switch of boost QRPC with parallel and series resonant circuits. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, P. 44-46 (Rus).
8. Gorodniy, O. M., Gordienko, V. V., Chub, B. I. (2012). Comparative evaluation of energy efficiency of pulse converters with quasi-resonant and conventional switches on the results of modeling. *Bulletin of the Chernihiv State Technological University*, no. 4 (61), P. 222-231.(Ukr)
9. Gorodniy, O. M., Gordienko, V. V., Stepanchuk, S. M. (2013). Comparison of energy efficiency of parallel quasi-resonant pulse converters switching at zero current. *Bulletin of the Chernihiv State Technological University*, no. 4 (69), P. 183-191.(Rus)

10. Denisov, Y. A., Gorodniy, A. N. (2011). Static characteristics of quasi-resonant pulse converter with parallel circuit switching at zero current. *Tekhnichna elektrodynamika, Special issue, Part 1*, P. 20-26.(Rus)
11. Denisov, Y. O., Gorodniy, O. M., Savchenko, O. V. (2008). Simulation of switching processes in QRPC-ZCS assuming parasitic parameters. *Tekhnichna elektrodynamika, Special issue, Part 1*, P. 87-90.(Rus)
12. Denisov, Y. O., Gorodniy, O. M., Kupko, O. A. (2012). Operation peculiarities and static characteristics of parallel type QRPC-ZCS. *Bulletin of the Chernihiv State Technological University, no. 1 (55)*, P. 239-245.(Ukr)