

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНИХ ТА КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ю.О. Денисов\*, докт.техн.наук, О.М. Городній\*\*, канд.техн.наук, В.В. Гордієнко\*\*\*, канд.техн.наук, Л.В. Вершняк\*\*\*\*, А.В. Димерець\*\*\*\*\*

Чернігівський національний технологічний університет,

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна,

e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

Запропоновано моделі імпульсних перетворювачів (ІП) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) та квазірезонансного імпульсного перетворювача, що перемикається при нульовому струмі (КРІП-ПНС), з частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ), які працюють в складі коректора коефіцієнта потужності (ККП). За результатами моделювання отримано вихідні характеристики, залежність коефіцієнтів пульсацій від зміни навантаження цих перетворювачів. Виконано порівняльну оцінку енергетичних втрат у ККП, транзисторних ключах у їхньому складі та спектрів струмів споживання. Бібл. 9, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** коректор коефіцієнта потужності, резонансний контур, квазірезонансний імпульсний перетворювач, транзисторний ключ.

**Вступ.** Сучасні системи вторинного електроживлення радіоелектронної апаратури в своєму складі повинні мати ККП по входу, якщо їхня потужність споживання перевищує 70 Вт. На сучасному етапі розвитку в основному використовуються активні ККП на основі паралельних ІП з ШІМ (далі ІП) [1, 2]. Головним шляхом поліпшення масогабаритних показників ІП є підвищення їхньої частоти роботи, але це призводить до збільшення динамічних втрат у комутаційних пристроях. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є використання КРІП-ПНС із ЧІМ [3-9]. Порівняльну оцінку енергетичних втрат у послідовних та паралельних КРІП-ПНС та ІП представлено у роботах [3, 4, 6]. Метод розрахунку комутаційних втрат, який використовується у цих роботах, дає змогу врахувати вплив параметрів силової частини перетворювачів, транзисторних ключів і навантаження на ці втрати.

Для оцінки доцільності використання КРІП-ПНС в ККП необхідно зробити порівняльну оцінку енергетичних втрат, вихідних характеристик, спектрів струмів споживання та коефіцієнтів пульсацій ККП на основі КРІП-ПНС та ІП. Це і є основною метою роботи.

Для моделювання обрано найбільш сучасний програмний пакет Matlab Simulink. Він дає змогу не тільки моделювати силову частину перетворювача, а й системи керування, отримувати параметри і характеристики таких електронних пристроїв. Для коректного порівняння параметрів та характеристик ІП та КРІП-ПНС в складі ККП параметри силової частини та навантаження обиралися однаковими.

### Моделювання електромагнітних процесів ККП на основі паралельного ІП з ШІМ та КРІП-ПНС.

На рис. 1, а показано модель електричної схеми ККП на основі ІП, що складається з джерела змінної напруги (AC Link), яке моделює промислову мережу, вимірювального блока (Measurement), випрямляча (Bridge), який

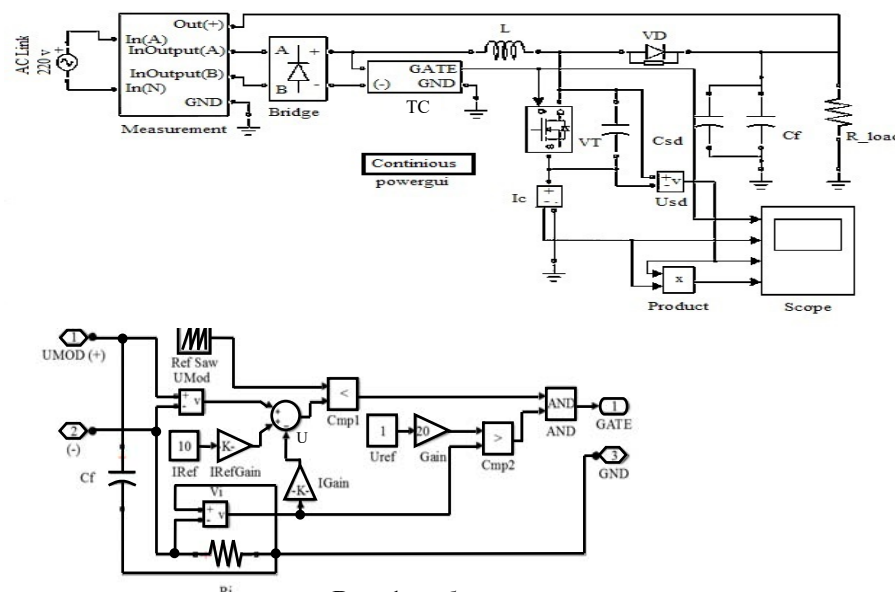


Рис. 1, а, б

використовується для випрямлення змінної вхідної напруги (побудований за схемою Грета), блока керування транзистором (TC), транзисторного ключа VT та його паразитної ємності «стік-витік» Cds, накопичувального дроселя L, зворотного діода VD, ємнісного фільтра Cf, який складається з двох паралельно з'єднаних конденсаторів (електролітичного та керамічного малої ємності для замикання височастотних перешкод на землю) та опору навантаження Rload.

На рис. 1, б показано внутрішню структуру блока керування транзисторним ключем (transistor controller – TC). Основою цього блока є блок

© Денисов Ю.О., Городній О.М., Гордієнко В.В., Вершняк Л.В., Димерець А.В., 2018

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0003-2293-7964>; \*\*<https://orcid.org/0000-0001-5303-9564>;

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-2052-9118>; \*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-7178-7339>; \*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-7617-5291>

ШИМ, побудований на компараторі (Cmp1) та генераторі напруги, що змінюється лінійно (Ref Saw). Напруга з виходу Ref Saw та модулююча напруга з виходу суматора (Um) порівнюються за допомогою Cmp1. Поки напруга з виходу Ref Saw менша за напругу Um, на виході Cmp1 присутня логічна одиниця, яка відкриває транзисторний ключ VT.

На рис. 2, а наведено модель електричної схеми ККП на основі КРІП-ПНС, у якій введено додатковий діод VD2, який придушує паразитні коливання при вимиканні транзисторного ключа VT1 та розширює діапазон регулювання цього перетворювача [6].

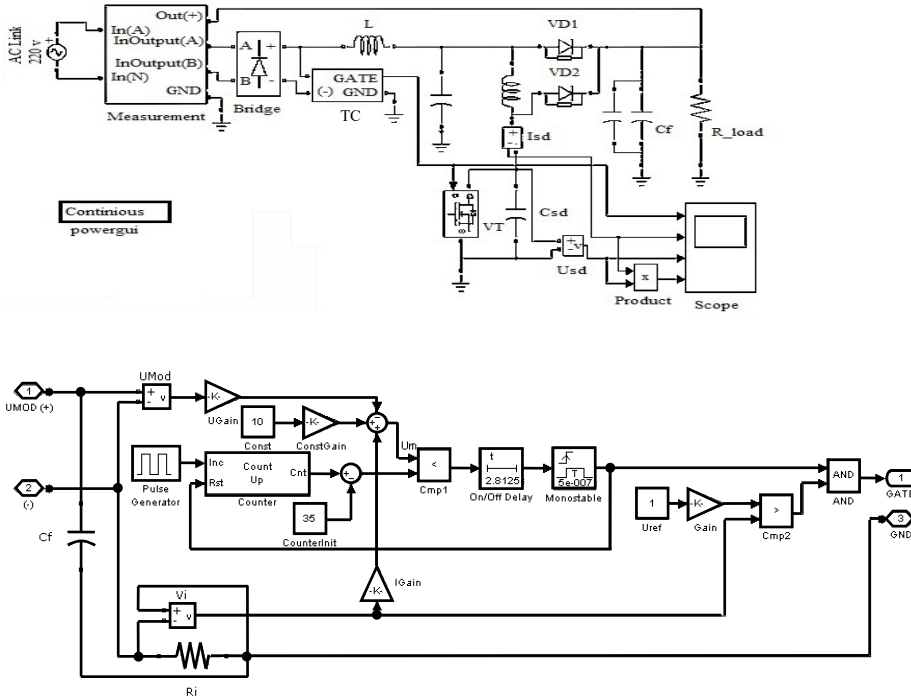


Рис. 2, а, б

На рис. 2, б показано схему блока керування транзисторним ключем (ТС). Основною даною схеми є блок ЧІМ, який побудований на компараторі (Cmp1), генераторі напруги, що змінюється лінійно (побудований на сумуючому лічильнику Counter) та одновібраторі Monostable (генерує імпульс керування транзистора VT).

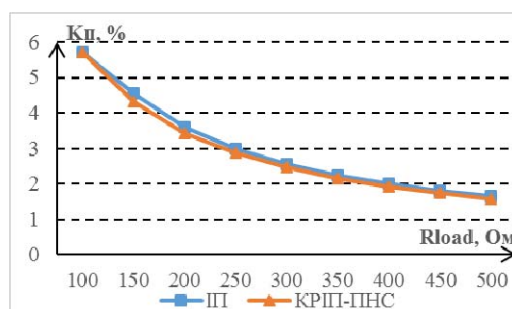
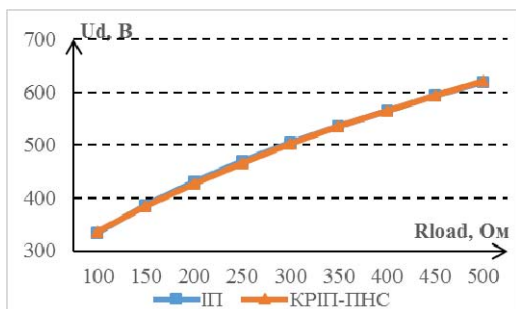
**Результати моделювання та розрахунків параметрів ККП на основі ШІ з ШІМ та КРІП-ПНС.** Параметри силової частини ККП: фільтруюча ємність  $C_f=300$  мкФ, напруга живлення  $U_{ж}=220$  В, накопичувальна індуктивність  $L=300$  мкГн, резонансна індуктивність  $L_r=2$  мкГн, резонансна ємність  $C_r=3,5$  нФ, опір навантаження  $100..500$  Ом, транзисторний ключ VT – SPW17N80C3, імпульсні діоди VD1 та VD2 – STPSC1206.

Параметри силової частини схем ККП обиралися з умов номінальної частоти їхньої роботи (від 100 кГц до 1 МГц) та допустимого коефіцієнта пульсацій на навантаженні (до 6%).

У таблиці наведено загальні втрати в ККП на основі ШІ та КРІП-ПНС, втрати в транзисторних ключах в абсолютних та відносних одиницях та коефіцієнти корисної дії (ККД) цих пристроїв. Оцінку втрат було проведено від номінальної частоти роботи ШІ (100 кГц) до номінальної частоти роботи КРІП-ПНС (1 МГц) для вихідної потужності 1 кВт. Як видно, втрати в ККП на основі КРІП-ПНС набагато менші, ніж в ККП на основі ШІ. Запропоновані моделі ККП на основі ШІ з ШІМ та КРІП-ПНС, дають змогу моделювати електромагнітні та енергетичні процеси в цих пристроях; вихідні характеристики перетворювачів (рис. 3, а) та залежності коефіцієнтів пульсацій від навантаження (рис. 3, б) мало відрізняються один від одного, тому що тривалість імпульсів керування обиралися однаковими.

Частота, кГц	Загальні втрати, Вт		Втрати в ключі, Вт		Втрати в ключі від загальних, %		Загальний ККД, %	
	КРІП-ПНС	ШІ	КРІП-ПНС	ШІ	КРІП-ПНС	ШІ	КРІП-ПНС	ШІ
100	61,5	109,9	17,4	65,8	28,3	59,9	94,2	90,1
250	66,0	139,9	21,9	95,8	33,2	68,5	93,8	87,7
500	70,2	173,6	26,1	129,5	37,2	74,6	93,4	85,2
750	74,9	215,3	30,8	171,2	41,2	79,5	93,0	82,3
1000	79,4	261,6	35,4	217,6	44,5	83,2	92,6	79,3

На рис. 4 показано спектральні характеристики струмів споживання ККП на основі ШІ та КРІП-ПНС. Всі спектральні складові вищих гармонік не перевищують максимального діапазону, який регламентується стандартом ІЕС61000-3-2. Коефіцієнти пульсацій розраховувалися за формулою  $K_{II} = U_{3M} / U_0$ , де  $U_{3M}$  – амплітуда змінної складової вихідної напруги;  $U_0$  – постійна складова вихідної напруги.



а

б

Рис. 3

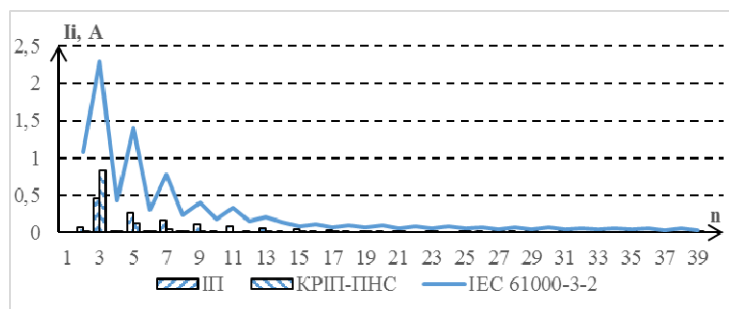


Рис. 4

**Висновки.** Виконано порівняльний аналіз запропонованих моделей ККП на основі ПІ з ШІМ та КРІП-ПІНС. Показано, що КРІП-ПІНС в ККП дає змогу підвищити їхній ККД від 4 % на частоті роботи 100 кГц до 13 % на частоті роботи 1 МГц у порівнянні з ККП з ПІ, що робить їх набагато перспективнішими при впровадженні в цих пристроях.

Хоча блок керування транзисторним ключем в ККП з КРІП-ПІНС більш складний, ніж в ККП з ПІ, а в силевій частині більша кількість елементів на три одиниці, його надійність та вартість не буде значно збільшуватися при реалізації системи керування транзисторним ключем на швидкодіючому мікроконтролері; всі спектральні складові вищих гармонік струму споживання обох перетворювачів не перевищують вимоги згідно стандарту IEC61000-3-2.

1. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Мороз А.В. Регульовані фільтри джерел живлення для захисту інформації в мікроконтролерах. К.: Кафедра, 2016. 184 с.
2. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г. Безперервні наближені моделі перетворювачів змінної напруги в постійну з активною корекцією коефіцієнта потужності. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 6. С. 11–17.
3. 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. Pp. 1-6.
4. 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. Pp. 327-332.
5. 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
6. 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. Pp. 232-235.
7. 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. Pp. 1–8.
8. 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. Pp. 1165–1169.
9. 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. Pp. 486-491. DOI:10.1109/ELNANO.2015. 7146935

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ И КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ю.А. Денисов, докт.техн.наук, А.Н. Городний, канд.техн.наук, В.В. Гордиенко, канд.техн.наук,  
Л.В. Вершняк, А.В. Дымерец  
Черниговский национальный технологический университет,  
ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14035, Украина,  
e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

*Предложены модели импульсных преобразователей (ИП) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и квазирезонансного импульсного преобразователя переключаемого при нулевом токе (КРИП-ПНТ) с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ), которые работают в составе корректора коэффициента мощности (ККМ). По результатам моделирования получены выходные характеристики, зависимость коэффициентов пульсаций от изменения нагрузки этих преобразователей. Проведена сравнительная оценка энергетических потерь в ККМ, транзисторных ключах и спектров токов потребления.*

Библ. 9, табл. 1, рис. 4.

**Ключевые слова:** корректор коэффициента мощности, резонансный контур, квазирезонансный импульсный преобразователь, транзисторный ключ.

## ESTIMATION OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF POWER FACTOR CORRECTOR BASED ON PULSED AND QUASI-RESONANT CONVERTERS

Yu.O. Denysov, O.M. Gorodniy, V.V. Gordienko, L.V. Vershniak, A.V. Dymerecs  
Chernihiv National University of Technology,  
Shevchenka str., 95, Chernihiv, 14035, Ukraine,  
e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

*Models of pulse converters (PC) with pulse-width modulation (PWM) and zero-current-switch quasi-resonant pulse converter (QRPC-ZCS) with pulse-frequency modulation (PFM), which operate as part of a power factor corrector (PFC), are proposed. Simulation allowed to get the output characteristics and the dependences of the pulsation coefficients on the load variation of these converters. Also in this work comparative estimation of energy losses in PFC, transistor switches and the spectrums of consumption currents was made. References 9, table 1, figures 4.*

**Key words:** power factor corrector, resonant circuit, quasi-resonant pulse converter, transistor switch.

1. Zhuikov V.Y., Tereshchenko T.O., Yamnenko Y.S., Moroz A.V. Adjustable filters of power supplies for information security in microcontrollers. Kiev: Kafedra, 2016. 184 p. (Ukr)
2. 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. Pp. 11-17. (Ukr)
3. 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. Pp. 1-6.
4. 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. Pp. 327-332.
5. 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
6. 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. Pp. 232-235.
7. 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. Pp. 1-8.
8. 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. Pp. 1165-1169.
9. 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. Pp. 486-491. DOI:10.1109/ELNANO.2015.7146935

Надійшла 05.03.2018  
Остаточний варіант 21.05.2018