

Порівняння ефективності DC/DC перетворювачів із м'якою та жорсткою комутацією при різних частотах

Миколайчук П.В., [0000-0001-7948-5351](tel:0000-0001-7948-5351)

e-mail: McColaichuk@gmail.com

Охмак В.М., [0000-0002-0621-3256](tel:0000-0002-0621-3256)

e-mail: Valeriiakohmak@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.ua

Київ, Україна

Реферат — Методи м'якої комутації мають дуже важливу роль у зменшенні розмірів, вартості, а також у підвищенні середньої ефективності та потужності перетворювача постійного струму. Порівняння ефективності та втрати потужності пасивних компонентів розраховані для різних частот перемикання. М'яка комутація відбувається за широкого діапазону навантажень завдяки розміщенню конденсатора паралельно до стоку-витоку МДН-транзистора.

Ключові слова — м'яка комутація; втрати потужності; жорстка комутація; частотна залежність транзистора; перетворювач постійного струму; квазірезонансний перетворювач.

I. ВСТУП

У цій роботі проведено аналіз втрат потужності неізольованого перетворювача з жорсткою комутацією і квазірезонансного перетворювача з м'якою комутацією для різних частот.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розрізняють м'яку та жорстку комутацію. Методи забезпечення м'якої комутації дозволяють якісно та кількісно впливати на фізичні параметри системи. Для того аби оцінити такі переваги використання м'якої комутації можна порівняти потужність втрат системи для двох випадків. М'яка комутація відбувається за широкого діапазону навантажень завдяки розміщенню конденсатора паралельно до стоку-витоку МДН-транзистора, її ми порівняємо з жорсткою комутацією неізольованого перетворювача.

Головними завданнями проектувальника є реалізація системи, що буде виконувати свою ефективну роботу за мінімуму матеріалів. Тому перш за все, важливе порівняння затрачених ресурсів та отриманих результатів.

Для експлуатації на високих частотах МДН-транзистор є підходящим вибором для пристроїв на основі dc/dc-перетворювачів. При високих частотах ємнісні втрати при включенні у потужних МДН-транзисторів стають головними комутаційними втратами. Під час вмикання напруга на ключі падає, а струм зростає. Таке перемикання є безпечнішим, тому що не виникає високої різниці потенціалів.

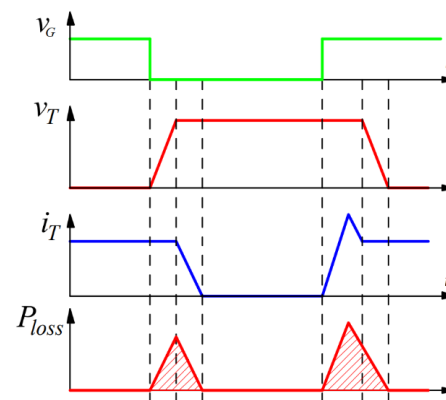


Рис.1. Ефект жорсткої комутації.

Форми сигналів перемикання, що показані на Рис. 1, описують так звану жорстку комутацію. Це миттєва потужність, що розсіюється у ключі або під час перемикання. Ефективність перемикання ключа може бути істотно поліпшена, якщо зменшити перекриття струму і напруги. Тобто, одну з величин спрямувати до нуля, якщо зробити напругу на ключі близькою до нуля, то струм зростає і, теоретично, втрати потужності попрямують до нуля. Цей вид перемикання відомий як ПНН (перемикання за нульової напруги).

Аналогічно може бути ПНС (перемикання за нульового струму). Перемикання напівпровідникового приладу, називається м'яким, якщо призводить

до розсіювання значно меншої потужності в компоненті під час перехідних процесів комутації.

У перетворювачах перемикачів нульовою напругою або нульовим струмом досягається шляхом формування сигналу напруги або струму за допомогою резонансного контуру [1] - [12]. Концепція квазірезонансного імпульсного перетворювача (КРІП) введена в [6], [7]. У КРІП, м'яку комутацію реалізовано за допомогою високочастотного резонансного контуру, для того щоб формувати напругу або струм у квазісінусоїдальній формі періодичного імпульсу.

Обчислення втрат та ефективності перетворювача

$$P_I = P_o + P_{LOSS} \quad (1)$$

$$P_{LOSS} = P_L + P_{SW} + P_D \quad (2)$$

P_{SW} - комутаційні втрати; P_L - індуктивні втрати; P_I - вхідна потужність

$$P_{SW(LOSS)} = \frac{(v_0 * I_0 * f_s)}{2} (t_{on} + t_{off}) \quad (3)$$

$$P_L = r_L I_L^2 \quad (4)$$

Ефективність розраховуємо за формулою:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{LOSS}} \quad (5)$$

Розглянутий в даній роботі перетворювач з жорсткою комутацією працює в режимі неперервного струму [16]. Під час перемикачів існує період коли напруга на ключі все ще падає до нуля, але струм вже починає текти. Так з'являються втрати потужності, які розсіюються всередині пристрою, також відомі як комутаційні втрати (втрати при перемикачів)[17,18].

У неізолюваного перетворювача підвищуючого типу індуктивні втрати знижуються при зростанні частоти, але втрати при перемикачів більші та впливають на ефективність всієї схеми. Тому було прийнято рішення зменшити втрати при перемикачів використовуючи м'яку комутацію [15, 16, 17]. Хоча існує два способи перемикачів (нульовою напругою та нульовим струмом), але у нашому випадку краще використовувати перемикачів нульовою напругою для застосування на вищих частотах.

Ця схема виробляє високі значення напруги та струму під час зміни навантаження у широких діапазонах, а також викликає непотрібні коливання завдяки ємності переходу діода. Для подолання цих проблем використовуються мультирезонансні перетворювачі, в яких резонансні елементи (ємність транзистора, ємність діодного переходу та індуктивність трансформатора) розташовані таким чином, що поглинають значні флуктуації в колі. Енергія, що виробляється безперервним резонансом, обмежує широкий діапазон застосування. У цих перетворювачах перемикачів нульовим струмом або напругою відбувається лише протягом короткого періоду часу, передбаченого резонансом. З цієї причини більшість таких перетворювачів працюють як ШІМ-перетворювач [1] - [4].

Перетворювач має хороші характеристики лише при повному навантаженні [10]. Переходячи до керування фазовим зсувом на фіксованій частоті, вихідна напруга регулюється і перемикачів отримується за допомогою індуктивного навантаження [11] - [12]. Враховуючи закони енергоефективності, ефективність за середнього значення навантаження є більш важливою, ніж за повного навантаження. Тому необхідно, щоб перетворювач забезпечував кращу продуктивність як при малих так і повних навантаженнях. Звичайні резонансні перетворювачі мають постійне значення частоти, що призводить до поганої ефективності в умовах малих навантажень. Іншим недоліком звичайних перетворювачів з м'якою комутацією є те, що продуктивність перетворювача залежить від значень навантаження і частоти перемикачів. Таким чином, регулювання частоти необхідне для забезпечення м'якої комутації для різних значень навантаження, що в свою чергу призводить до підвищення ефективності [12] - [14].

При зменшенні навантаження схема переходить у режим жорсткої комутації та ефективність падає. У діапазоні навантажень, у яких відбувається м'яка комутація, схема генерує вузький спектр завад, які легше подавляти. Втрати у вихідному випрямлячі в діапазоні від одиниць до сотень ват можливо суттєво знизити за рахунок синхронного випрямлення.

У КРІП ширина і амплітуда імпульсу фіксовані, а перетворювач керується змінною частотою (тобто більше імпульсів в секунду забезпечують більшу потужність). Використовуючи резонансний імпульс, перемикаючий елемент перейде в стан нульового струму, в цей момент МОП-транзистор вимикається, уникаючи втрат перемикачів.

Перемикачів КРІП, у порівнянні з традиційними комутаційними процесами в перетворювачах з жорсткою комутацією, мінімізують втрати при перемикачів силового ключа, завдяки чому зменшується його температура та підвищується ефективність всієї схеми.

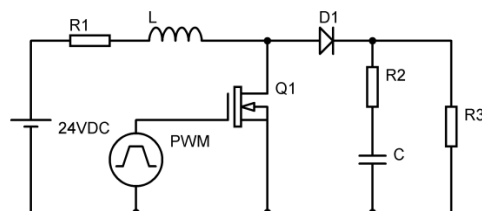


Рис. 2. Неізолюваний перетворювач підвищуючого типу з жорсткою комутацією.

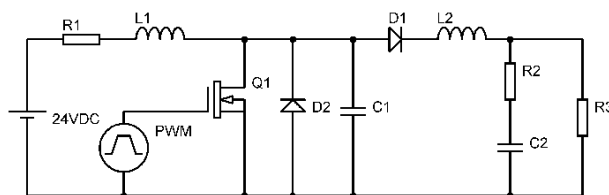


Рис.3. Квазірезонансний імпульсний перетворювач, що перемикається нульовою напругою

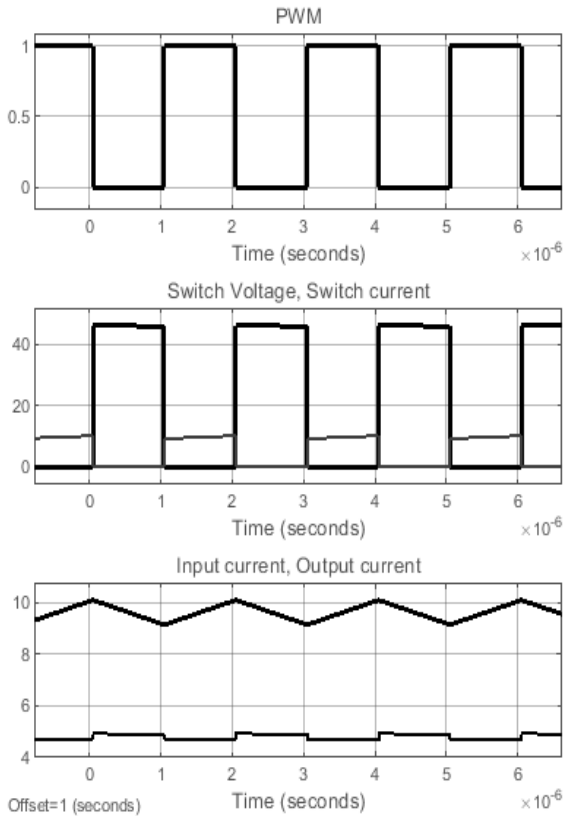


Рис.4. Часові діаграми струмів та напруг неізоляованого перетворювача підвищуючого типу з жорсткою комутацією

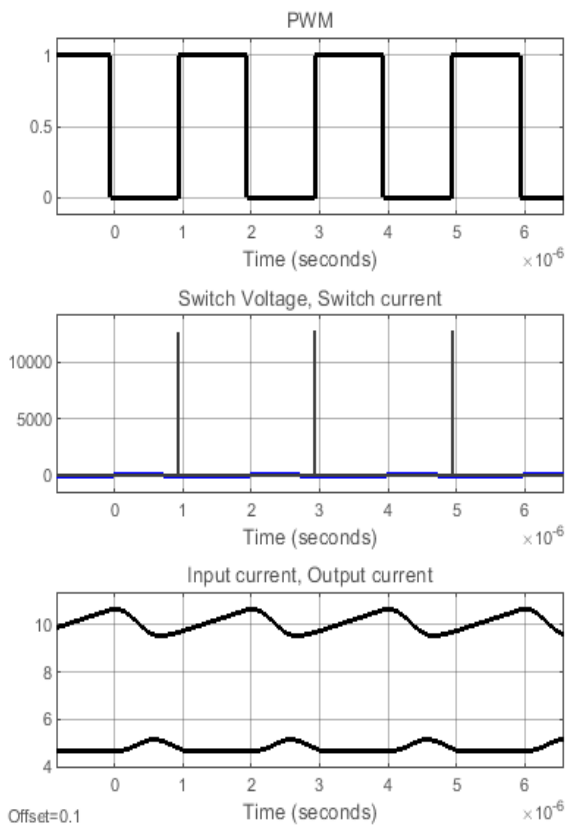


Рис.5. Часові діаграми струмів та напруг квазірезонансного імпульсного перетворювача, що перемикається нульовою напругою.

ТАБЛИЦЯ. 1. ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕІЗОЛЬОВАНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПІДВИЩУЮЧОГО ТИПУ З ЖОРСТКОЮ КОМУТАЦІЄЮ

f _{sw} (кГц)	Жорстка комутація			
	P _L (Вт)	P _{SW} (Вт)	P _{Loss} (Вт)	ККД (%)
50	102	1,584	103,58	70,70
100	40	3,168	43,16	85,27
250	20	7,92	27,92	89,95
500	10	15,84	25,84	90,63
1000	4,6	31,68	36,28	87,32

ТАБЛИЦЯ.2. ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КВАЗІРЕЗОНАНСНОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА, ЩО ПЕРЕМИКАЄТЬСЯ НУЛЬОВОЮ НАПРУГОЮ.

f _{sw} (кГц)	М'яка комутація			
	P _L (Вт)	P _{SW} (Вт)	P _{Loss} (Вт)	ККД (%)
50	102	3,6	105,6	70,62
100	40	5,3	45,3	85,17
250	20	5,8	25,5	90,57
500	10	9,17	15,8	94,05
1000	4,6	20	23,8	83,25

Важливо зазначити, що напруга на резонансному контурі повинна бути більшою або рівною напрузі живлення. Необхідно вибирати транзистори з найменшим значенням вихідної ємності, а індуктивність вибирати найбільшу. Це дозволить зменшити мінімальну потужність навантаження, при якій схема працює в режимі «м'якого» перемикання. Гранична умова, при якій схема все ще працює в режимі м'якої комутації.

$$V_{in} = \frac{I_{nae}}{2N} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводилися за допомогою моделей, розроблених в пакеті розгалуження математичної системи MATLAB R2018a – Simulink R2018a. В результаті досліджень отримано часові діаграми струмів та напруг для випадку номінальних значень параметрів перетворювача, сформовано таблиці показників ефективності перетворювачів для діапазону частот 50-1000 кГц та проаналізовано їх вплив на напруги перетворювача.

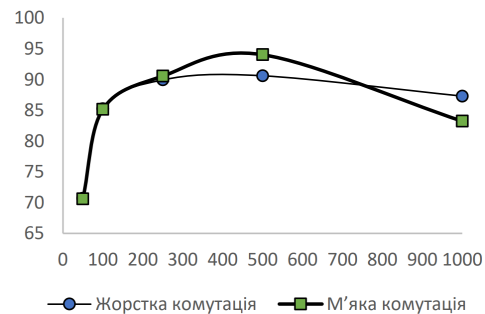


Рис.6. Залежність ККД від частоти перетворювачів з жорсткою і м'якою комутацією



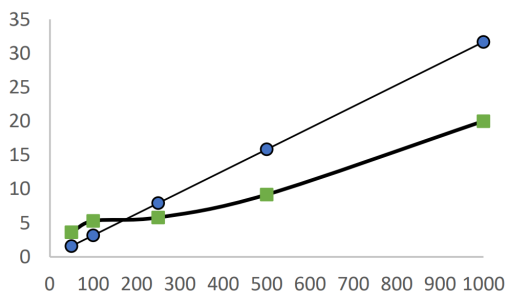


Рис.7. Залежність комутаційних втрат від частоти перетворювачів з жорсткою і м'якою комутацією

Як видно з кількісних даних використання жорсткої комутації призводить до більшої потужності втрат. Особливо цікавою є поведінка м'якої комутації причастоті вищій за 500 кГц.

ВИСНОВКИ

За результатом імітаційного моделювання та теоретичного аналізу чітко зрозуміло, що ефективність квазірезонансного імпульсного перетворювача, що перемикається нульовою напругою вище, ніж у неізолюваного перетворювача підвищуючого типу з жорсткою комутацією на 3,4%.

Отримані результати свідчать про те, що комутаційні втрати зростають із зростанням частоти у двох перетворювачах, а на частотах вище 250 кГц все більш помітними є переваги м'якої комутації. Також, завдяки збільшенню частоти перемикавання зменшуються розміри компонентів і втрати. Напруги на ключових елементах та струми у випадку м'якої комутації менші в порівнянні з випадком із жорсткою.

Перевагами квазірезонансного перетворювача над класичним ШІМ-перетворювачем є менший розмір і, як правило, більш висока ефективність. Проте менший розмір досягається за рахунок збільшення його робочої частоти, а поліпшення ефективності приноситься в жертву через інші втрати, залежні від частоти. Недоліком є великі струми або напруги, що прикладаються до силових компонентів. Це змушує конструктора використовувати більш потужні ключі та випрямлячі, які можуть мати гірші характеристики провідності.

ПОДЯКА ТА ВНЕСОК АВТОРІВ

В ході розробки, виконання та реалізації даної ідеї в першу чергу відзначимо викладачів кафедри Промислової електроніки, Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського», за вагомий внесок в підтримку ініціативних студентів та щоденну мотивацію.

Петро Миколайчук розробив принципову схему.

Обробку інформації підготувала Охмак Валерія.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Jung-Goo Cho, Ju-Won Baek, Geun-Hie Rim, and Iouri Kang, "Novel zero voltage transition PWM multi-phase converters," in *Proceedings of Applied Power Electronics Conference. APEC '96*, 1998, vol. 1, pp. 500–506, DOI: [10.1109/APEC.1996.500488](https://doi.org/10.1109/APEC.1996.500488)
- [2] M. T. Zhang, M. M. Jovanović, and F. C. Y. Lee, "Design considerations and performance evaluations of synchronous rectification in flyback converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 538–546, 1998, DOI: [10.1109/63.668117](https://doi.org/10.1109/63.668117)
- [3] I. Aksoy, H. Bodur, and A. F. Bakan, "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 8, pp. 2093–2105, 2010, DOI: [10.1109/TPEL.2010.2043266](https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2043266)
- [4] K. H. Liu and C. Y. Lee, "Zero-Voltage Switching Technique in DC/DC Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 5, no. 3, pp. 293–304, 1990, DOI: [10.1109/63.56520](https://doi.org/10.1109/63.56520)
- [5] F. C. Lee, W. A. Tabisz, and M. M. Jovanović, "High-frequency quasi-resonant and multi-resonant converter technologies," *Arch. für Elektrotechnik*, vol. 74, no. 2, pp. 107–116, 1990, DOI: [10.1007/BF01476820](https://doi.org/10.1007/BF01476820)
- [6] W. A. Tabisz and F. C. Y. Lee, "Zero-Voltage-Switching Multiresonant Technique—a Novel Approach to Improve Performance of High-Frequency Quasi-Resonant Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 450–458, 1989, DOI: [10.1109/63.41774](https://doi.org/10.1109/63.41774)
- [7] J. Dudrik and N. D. Trip, "Soft-switching PS-PWM DCDC converter for full-load range applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2807–2814, 2010, DOI: [10.1109/TIE.2009.2037100](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2037100)
- [8] R. Laouamer, M. Brunello, J. P. Ferrieux, O. Normand, and N. Buchheit, "A multi-resonant converter for non-contact charging with electromagnetic coupling," pp. 792–797, 2002, DOI: [10.1109/iecon.1997.671998](https://doi.org/10.1109/iecon.1997.671998)
- [9] G. Hua, C. S. Leu, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," 2003, pp. 55–61, DOI: [10.1109/PESC.1992.254691](https://doi.org/10.1109/PESC.1992.254691)
- [10] Min Chen and Jian Sun, "Reduced-order averaged modeling of active-clamp converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 2, pp. 487–494, 2006, DOI: [10.1109/tpe.2005.869761](https://doi.org/10.1109/tpe.2005.869761)
- [11] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, and F. C. Lee, "High-voltage, high-power, ZVS, full-bridge PWM converter employing an active snubber," pp. 158–163, 2002, DOI: [10.1109/apec.1991.146157](https://doi.org/10.1109/apec.1991.146157)
- [12] C. Zhao, S. D. Round, and J. W. Kolar, "Full-order averaging modelling of zero-voltage-switching phase-shift bidirectional DC-DC converters," *IET Power Electron.*, vol. 3, no. 3, p. 400, 2010, DOI: [10.1049/iet-pel.2008.0208](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2008.0208)
- [13] H. Keyhani, H. A. Toliyat, M. Harfman-Todorovic, R. Lai, and R. Datta, "An isolated resonant AC-link three-phase AC-AC converter using a single HF transformer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5174–5183, 2014, DOI: [10.1109/TIE.2014.2300051](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2300051)
- [14] H. Keyhani and H. A. Toliyat, "A new generation of buck-boost resonant AC-link DC-DC converters," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2013, pp. 1383–1390, DOI: [10.1109/APEC.2013.6520480](https://doi.org/10.1109/APEC.2013.6520480)
- [15] Sang-Hoon Park, So-Ri Park, Jae-Sung Yu, Yong-Chae Jung, and Chung-Yuen Won, "Analysis and Design of a Soft-Switching Boost Converter With an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 8, pp. 2142–2149, 2010, DOI: [10.1109/tpe.2010.2046425](https://doi.org/10.1109/tpe.2010.2046425)
- [16] A. K. Rathore, A. K. S. Bhat, and R. Oruganti, "Analysis, design and experimental results of wide range ZVS active-clamped L-L type current-fed DC/DC converter for fuel cells to utility



interface," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 473–485, 2012, DOI: [10.1109/TIE.2011.2146214](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2146214)

[17] S. Ang and A. Oliva, *Power-Switching Converters*, 2nd ed. CRC Press, 2005, ISBN: 978-0824722456

[18] A. Mousavi, P. Das, and G. Moschopoulos, "A comparative study of a new ZCS DC-DC full-bridge boost converter with a

ZVS active-clamp converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 1347–1358, 2012, DOI: [10.1109/TPEL.2011.2118233](https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2118233)

УДК 321.314

Сравнение эффективности DC / DC преобразователей с мягкой и жесткой коммутацией при разных частотах

Миколайчук П.В., [0000-0001-7948-5351](https://orcid.org/0000-0001-7948-5351)

e-mail: McColaichuk@gmail.com

Охмак В.М., [0000-0002-0621-3256](https://orcid.org/0000-0002-0621-3256)

e-mail: Valeriiaokhmak@gmail.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» www.kpi.ua

Киев, Украина

Реферат — Методы мягкой коммутации имеют очень важную роль в уменьшении размеров, стоимости, а также в повышении средней эффективности и мощности преобразователя постоянного тока. В этой работе проведен анализ потерь мощности неизолированного преобразователя с жесткой коммутацией и квазирезонансного преобразователя с мягкой коммутацией для различных частот. Сравнение эффективности и потери мощности пассивных компонентов рассчитаны для различных частот переключения. Мягкая коммутация происходит широкого диапазона нагрузок благодаря размещению конденсатора параллельно стока-истока МДП-транзистораю.

Ключевые слова — мягкая коммутация; потери мощности; жесткая коммутация; частотная зависимость транзистора; преобразователь постоянного тока; квазирезонансный преобразователь.



UDC 321.314

Confrontation of the DC/DC converters efficiency with soft and hard switching at high frequencies

P. V. Mykolaichuk, [0000-0001-7948-5351](https://orcid.org/0000-0001-7948-5351)

e-mail: McColaichuk@gmail.com

V. M. Okmak, [0000-0002-0621-3256](https://orcid.org/0000-0002-0621-3256)

e-mail: Valeriiaokhmak@gmail.com

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» www.kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract — In this paper, the analysis of power losses of an uninsulated converter with hard switching and a quasi resonant converter with soft switching for different frequencies is carried out. Comparison of the efficiency and power loss of passive components are designed for different switching frequencies. Soft commutation occurs over a wide range of loads due to the placement of a capacitor parallel to the drain-leakage of the MDN transistor. Soft switching is an important factor in ensuring a stable electrical circuit operation. The main tasks of the designer is the implementation of a system that will perform its effective work for a minimum of materials. Therefore, first of all, an important comparison of the resources spent and the results obtained, as implemented in this article. Methods of providing soft switching allow to influence qualitatively and quantitatively the physical parameters of the system. In order to evaluate the benefits of soft switching, the power loss of the system can be compared to two cases. Soft commutation occurs over a wide range of loads due to the placement of a capacitor in parallel with the drain-leakage of the transistor, compared with the hard switching of the uninsulated converter. Modern systems are designed in such a way that they can carry out complex operations to use the minimum of materials. Therefore, switching from one operating mode to another is inevitable and absolutely necessary for the purpose of providing productive work. Usually, the switching process is accompanied by a voltage drop on the load or energy dissipation, it arises as a result of closing or unlocking the electric circuit at which there is a jump-like change in the value of the resistance. This article describes the methods for using such phenomena and the performance of the system through their use. Power supply is an important factor in the well-functioning of any system that performs its functional purpose, connected with the development and maintenance of human life and the environment, from which, in the first place, the qualitative component of this process depends. In the period of a rapid increase in the level of globalization, the issue of reducing the use of resources and their rational minimization passes from the category of urgent to the issue of priority solution. This article may be useful for those who clearly want to look at the comparison of two processes: hard and soft switching.

Keywords — *soft switching; power loss; hard switching; transient frequency dependence; DC converter; quasi resonant converter.*

