

«ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ MOSFET-ТРАНЗИСТОРІВ»

Вінницький національний технічний університет;

Анотація.

У роботі проведено дослідження ефективності імпульсних перетворювачів постійної напруги, реалізованих на базі MOSFET-транзисторів. Визначено вплив основних параметрів ключових елементів — опору відкритого каналу, часу перемикання та ємності затвора — на загальний ККД перетворювача. Виконано моделювання в середовищах LTspice та Proteus і проведено експериментальні вимірювання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір оптимальних режимів роботи для підвищення енергоефективності електронних систем.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, MOSFET-транзистор, енергоефективність, моделювання, ККД.

Abstract.

The paper presents a study of the efficiency of DC-DC switching converters based on MOSFET transistors. The influence of key transistor parameters—on-resistance, switching time, and gate capacitance—on the overall efficiency was analyzed. Modeling in LTspice and Proteus, as well as experimental measurements, were performed. The results show that optimization of MOSFET parameters can significantly improve the energy efficiency of modern electronic systems.

Keywords: switching converter, MOSFET transistor, energy efficiency, modeling, efficiency factor.

Вступ

Постійне зростання вимог до енергоефективності електронних пристроїв зумовлює необхідність оптимізації схем джерел живлення та перетворювачів напруги. Імпульсні перетворювачі, на відміну від лінійних, забезпечують високий коефіцієнт корисної дії при компактних розмірах і незначних теплових втратах. Основним елементом таких схем є MOSFET-транзистори, що виконують роль комутаційних ключів. [1]

Параметри цих транзисторів істотно впливають на втрати енергії в процесі перемикання, тому актуальним є дослідження ефективності їх використання в імпульсних перетворювачах з метою визначення оптимальних характеристик для конкретних умов експлуатації. [2]

Результати дослідження

Принцип дії імпульсних перетворювачів постійної напруги (ІППН) по-лягає в періодичному підключенні та відключенні (комутації) кола навантаження до первинного джерела електроенергії з напругою $U_{\text{вх}}$. Здійснюється це за допомогою електронних силових ключів — транзисторів, діодів, тиристорів.

Для одержання високого ККД використовуються імпульсні методи перетворення та регулювання постійної напруги (ІППН) [3]. В основі принципу дії ІППН лежить ключовий режим роботи регулюючого напівпровідникового приладу, за допомогою якого здійснюється періодичне підключення напруги джерела U_d до вихідного кола перетворювача (рис. 1.1,а). У результаті на виході формуються імпульси напруги (рис. 1,б). Малий спад напруги на регулюючому приладі у ввімкненому стані та малий струм у вимкненому стані обумовлює високий ККД перетворювачів даного типу.

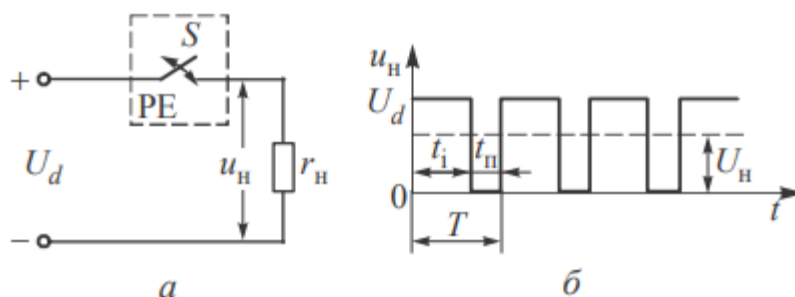


Рис.1 - Схема підключення напруги джерела та вихідні імпульси напруги

Сучасне імпульсне джерело живлення, або SMPS, використовує напівпровідникові перемикачі для перетворення не стабілізованої вхідної напруги постійного струму в регульовану та плавну вихідну напругу постійного струму на різних рівнях напруги. Вхідним джерелом живлення може бути постійна напруга від батареї або сонячної панелі або випрямлена постійна напруга. У багатьох програмах керування потужністю силовий транзистор MOSFET або IGFET працює в режимі перемикачання, коли він неодноразово вмикається та вимикається на високій швидкості. Основною перевагою цього є те, що енергоефективність стабілізатора може бути досить високою, оскільки транзистор або повністю відкритий та проводить (насичення), або повністю закритий (відсікання).

Знижувальний імпульсний стабілізатор є перетворювачем постійного струму в постійний і один з найпростіших і найпопулярніших типів імпульсних стабілізаторів. При використанні в конфігурації імпульсного джерела живлення понижувальний імпульсний стабілізатор використовує послідовний транзистор або силовий МОП-транзистор (в ідеалі біполярний транзистор із ізольованим затвором або IGBT) як основний перемикач, як показано на рис. 2.

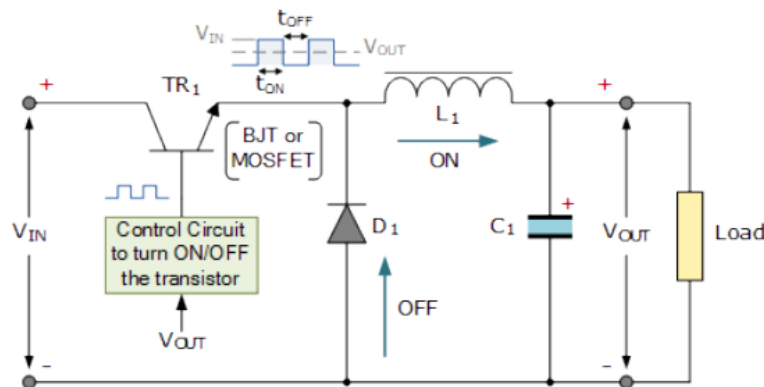


Рис.2 - Електрична схема імпульсного джерела живлення

Ця зворотна напруга викликає пряме усунення діода, тому накопичена енергія в магнітному полі індуктора змушує струм продовжувати текти через навантаження в тому ж напрямку і повертатися назад через діод.

Оскільки опір відкритого каналу сучасних MOSFET може бути дуже низьким (одиниці або десятки міліом), падіння напруги на ньому стає значно меншим, ніж у діода, що веде до істотного зниження втрат на провідність та підвищення ККД, особливо при вихідних напругах порядку 5 вольт та нижче. Це також зменшує тепловиділення, дозволяючи використовувати менші радіатори або взагалі обходитись без них, що дозволяє зменшити вагу та габарити готового пристрою.

Необхідно точно керувати моментами вмикання та вимикання синхронного ключа. Особливо критичним є забезпечення «мертвого часу» (dead-time) – короткого інтервалу, коли обидва ключі (основний та синхронний у відповідній гілці) гарантовано закриті. Занадто короткий «мертвий час» може призвести до наскрізного струму (shoot-through), а занадто довгий – до того, що струм почне протікати через паразитний діод синхронного MOSFET-а, збільшуючи втрати. Для ефективного керування MOSFET-ключами, особливо на високих частотах, потрібні потужні та швидкі драйвери затворів, здатні забезпечити необхідний струм для швидкого перезаряду ємності затвора.

Дослідимо на практиці:

Моделювання виконувалося в середовищі LTspice XVII на базі типової схеми buck converter із вхідною напругою 12 В, вихідною 5 В та струмом навантаження 2 А. Для аналізу використовувалися MOSFET-транзистори типів IRFZ44N, IRLZ34N та AO4407, що відрізняються параметрами та часом комутації.

Досліджували вплив:

- опору відкритого каналу в діапазоні 20–50 мОм;
- частоти комутації від 50 кГц до 400 кГц;
- часу

Для кожного режиму визначався коефіцієнт корисної дії за формулою:

$$\eta = (P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}}) \times 100\%,$$

де $P_{\text{вих}}$ — вихідна потужність, $P_{\text{вх}}$ — вхідна потужність.

Аналіз показав, що основними джерелами втрат є:

- провідникові втрати через $R_{\text{DS(on)}}$;
- комутаційні втрати під час переходів між станами;
- втрати на заряд/розряд ємності затвора.

При зменшенні опору відкритого каналу з 50 мОм до 20 мОм ККД зріс з 85 % до 93 %.

Підвищення частоти комутації понад 300 кГц призводило до збільшення втрат через заряд затвора, що знижувало ККД на 2–3 %. Оптимальні результати отримано при використанні транзистора IRLZ34N на частоті 200–250 кГц, де досягнуто максимальний ККД 93 %. Експериментальна перевірка на макетній платі підтвердила результати моделювання — похибка між розрахунковими та вимірними даними не перевищила 2 %.

Висновок

Основними втратами енергії у MOSFET-транзисторах є провідникові та комутаційні втрати. Зменшення $R_{DS(on)}$ з 50 мОм до 20 мОм підвищує ККД перетворювача на 8 %. Оптимальна частота комутації для досліджуваних транзисторів становить 200–250 кГц. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні високоефективних джерел живлення для побутової та промислової електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. What Are Power Forward and Flyback? What Is The Difference?. XFULLSTAR. URL: <https://www.xfullstartechs.com/info/what-are-power-forwardand-flyback-what-is-the-57079040.html> (дата звернення: 13.10.2025).
2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги: монографія. Київ: Ліра-К, 2020. 242 с
3. Новгородцев А.І., Піддубний М. Ю. Синхронний імпульсний стабілізатор напруги. МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ молодих вчених ФІЗИКА, ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: тези доповідей. : Сумський державний університет, 2025. С. 126.

Комарницький Олександр Сергійович – студент групи ПЗТ-23б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail : alexandrkom2006@gmail.com

Кичак Василь Мартинович – д.т.н., проф., завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua

Oleksandr Serhiyovych Komarnytskyi – student of group PZT-23b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alexandrkom2006@gmail.com

Vasyl M. Kychak – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of infocommunication systems and technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kychak.v.m@vntu.edu.ua