

ЧАПЛІЙ ДМИТРО

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0001-3976-5030>e-mail: prescout1990@gmail.com

БАБЮК СЕРГІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-5318-8586>e-mail: sermuk@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОГО ГІСТЕРЕЗИСНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК LLC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

На даний момент у світі технологій високо-розвинуті електронні системи, такі як багатопроцесорні модулі та системи-на-кристалі (SoC), створюють фундамент для прориву в сфері інформаційних технологій майбутнього та енергоефективності систем живлення. Однак швидкий ріст складності і функцій у таких системах, призводить до збільшення енергоспоживання, що в свою чергу серйозно обмежує мініатюризацію, ефективність, надійність та тривалість служби таких систем. Для керування енергоспоживанням використовують різноманітні методи. Імпульсні високочастотні перетворювачі потужності вважаються найкращим варіантом завдяки їх високій ефективності та хорошими динамічними характеристиками. Крім того, нелінійність характеристик імпульсних перетворювачів потужності дозволяє їм працювати в широкому діапазоні робочих умов, за різних навантажень та зміни напруги в мережі. Проте, лише одна схема керування, наприклад, широтно-імпульсна модуляція (PWM), не може оптимізувати весь комплекс системи в різних сценаріях. Тому в перетворювачах енергії застосовують гібридні схеми керування, які спільно та безперервно працюють для забезпечення продуктивності протягом усіх періодів роботи: запуску, робочого режиму та при динамічних навантаженнях. Проаналізовано дослідження новітніх методів контролю LLC перетворювачів, де описано сучасні методи роботи LLC: Bang-Bang Charge Control (BCC), та Time-Shift Control (TSC). Інноваційний метод гібридного гістерезисного контролю (НГК) забезпечує чудову характеристику перехідних процесів за рахунок спрощення каскаду живлення LLC перетворювача в однополюсну систему, яку легше компенсувати при збільшенні смуги пропускання. Також, даний метод забезпечує чудове усунення пульсацій змінного струму шляхом прямого контролю загальної вхідної потужності, що подається на вторинну обмотку кожного циклу перемикання. Усунення пульсацій змінного струму дозволяє розробнику відповідати суворим вимогам до вихідної напруги при меншій ємності вихідного конденсатора PFC, що зменшує вартість кінцевого виробу і розмір плати.

Ключові слова: резонансний перетворювач напруги, граничне керування зарядом, гібридний гістерезисний контроль, керування зсувом у часі, пульсації змінного струму, перехідна характеристика.

CHAPLIY DMYTRO, BABIUK SERGIY
Ternopil National Ivan Puluj Technical University

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF LLC CONVERTERS USING THE METHOD OF HYBRID HYSTERESIS CONTROL

In today's world of high-tech, advanced electronic systems such as multi-processor modules and System-on-Chip (SoC) systems form the foundation for breakthroughs in future information technology and power efficiency. However, the rapid growth of complexity and functions in such systems leads to an increase in energy consumption, which in turn seriously limits the miniaturization, efficiency, reliability and service life of such systems. Various methods are used to manage energy consumption. Pulsed high-frequency power converters are considered the best option due to their high efficiency and good dynamic characteristics. In addition, the non-linearity of the characteristics of impulse power converters allows them to work in a wide range of operating conditions, under different loads and voltage changes in the network. However, only one control scheme, such as pulse width modulation (PWM), cannot optimize the entire system complex in different scenarios. Therefore, hybrid control schemes are used in power converters that work together and continuously to ensure performance during all periods of operation: start-up, operating mode and dynamic loads. Research into advanced control methods for LLC converters has been analyzed, describing modern LLC operation methods such as Bang-Bang Charge Control (BCC) and Time-Shift Control (TSC).

An innovative method, Hybrid Hysteresis Control (HHC), ensures excellent transient response characteristics by simplifying the LLC converter power stage into a single-pole system, which is easier to compensate with increased bandwidth. Additionally, this method provides excellent elimination of AC current ripple by directly controlling the total input power supplied to the secondary winding of each switching cycle. Eliminating AC current ripple allows developers to meet strict output voltage requirements with smaller PFC output capacitor capacity, thereby reducing the cost and board size of the final product.

Keywords: LLC converter, Bang-Bang Charge Control, Hybrid Hysteresis Control, Time-Shift Control, AC ripple, transient response.

Постановка проблеми

На даний момент у світі технологій високо-розвинуті електронні системи, такі як багатопроцесорні модулі та системи-на-кристалі (SoC), створюють фундамент для прориву в сфері інформаційних технологій майбутнього та енергоефективності систем живлення. Однак швидкий ріст складності і функцій у таких системах, призводить до збільшення енергоспоживання, що в свою чергу серйозно обмежує мініатюризацію, ефективність, надійність та тривалість служби таких систем. Для керування енергоспоживанням використовують різноманітні методи. Імпульсні високочастотні перетворювачі потужності вважаються найкращим варіантом завдяки їх високій ефективності та хорошими динамічними характеристиками. Крім того, нелінійність характеристик імпульсних перетворювачів потужності дозволяє

їм працювати в широкому діапазоні робочих умов, за різних навантажень та зміни напруги в мережі. Проте, лише одна схема керування, наприклад, широтно-імпульсна модуляція (PWM), не може оптимізувати весь комплекс системи в різних сценаріях. Тому в перетворювачах енергії застосовують гібридні схеми керування, які спільно та безперервно працюють для забезпечення продуктивності протягом усіх періодів роботи: запуску, робочого режиму та при динамічних навантаженнях.

Аналіз відомих результатів досліджень

У цій статті розглядаються метод гібридного гістерезисного контролю в LLC перетворювачах, і надається короткий огляд принципу роботи перетворювача LLC на прикладі найпростішої напівмостової топології [1].

З огляду на попередні дослідження у сфері методів контролю LLC перетворювачів, де описано сучасні методи роботи LLC: Bang-Bang Charge Control (BBCC) [2], та Time-Shift Control (TSC) [3]. Змінюючи характеристику змінного струму перетворювача LLC, ці методи керування спрощують необхідну конструкцію компенсатора, водночас забезпечуючи інші переваги, такі як швидша реакція на перехідні процеси. Реалізація цих методів керування проілюстрована з використанням кількох новіших IC контролерів LLC, деякі з яких також реалізують керування PFC.

BBCC – метод керування перетворювачем LLC полягає у перегляді однієї зі змінних стану для визначення потужності, що подається на навантаження. Спрощену блок схему зображено на рисунку 1. Напруга на резонансному конденсаторі вимірюється, коли вона перетинає два певних пороги. Коли нижній – перемикач вимикається і коли верхній – перемикач також вимикається. Цей метод може забезпечити чудову динамічну продуктивність у будь-яких робочих умовах. Механізм управління простий і недорогий. Експериментальні результати зображені на рисунку 2. Вони демонструють надзвичайну динамічну продуктивність, передбачену моделюванням. Запропонований метод можна поширити на інші топології, що використовують резонансний конденсатор.

Інше рішення, у якому контур керування більше не встановлює частоту, а натомість використовує затримку. Вони позначають цю стратегію контролю як управління зсувом у часі (TSC) LLC. Коли ініціюється час увімкнення, внутрішній генератор контролера починає заряджати свій конденсатор, у той час як резонансний струм зростає від негативного значення до позитивного. Коли конденсатор синхронізації досягає свого верхнього порогу, і повинен вимкнути верхній перемикач та ініціювати спад, компаратор визначення струму запобігає цьому та підтримує заряд конденсатора на верхньому рівні, позначаючи паузу в циклі. Коли компаратор струму зрештою перемикається, маючи позитивний струм, конденсатор звільняється і може розряджатися, ініціюючи час вимкнення, протягом якого активується транзистор низького рівня. Під час вимкнення сценарій зворотний: коли конденсатор досягає свого нижнього порогу, він залишається там до тих пір, поки струм позитивний. Коли струм знову перетинає нуль, відбувається новий цикл. На рисунку 3 показано спрощену блок схему TSC. Експериментальні результати зображені на рисунку 4.

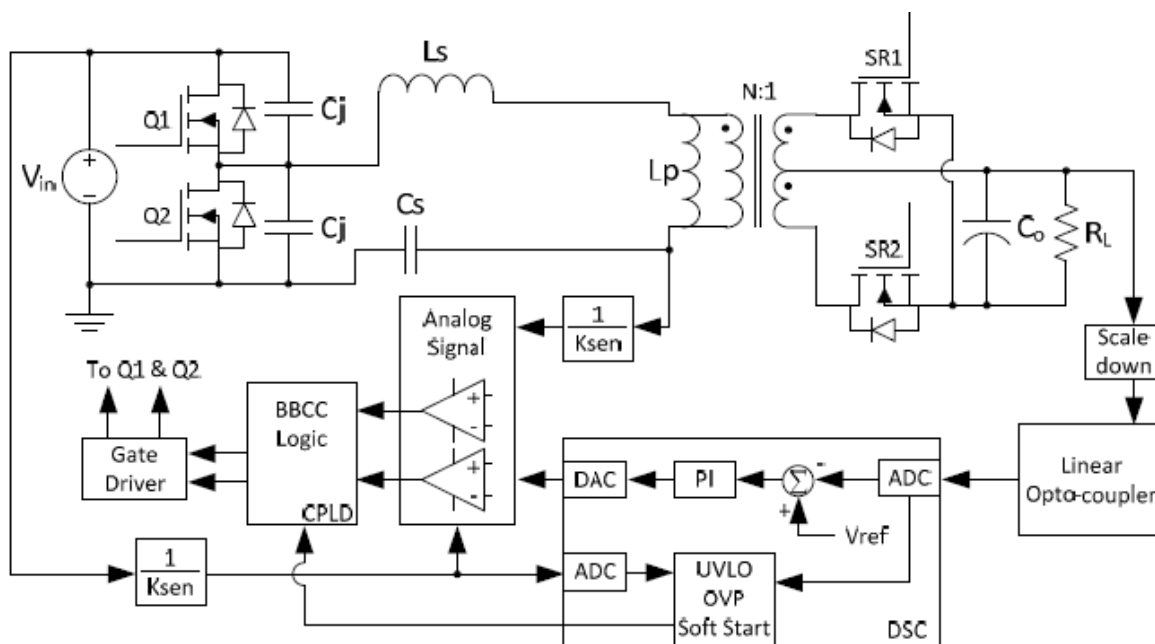


Рис. 1. Реалізація Bang-Bang Charge Control

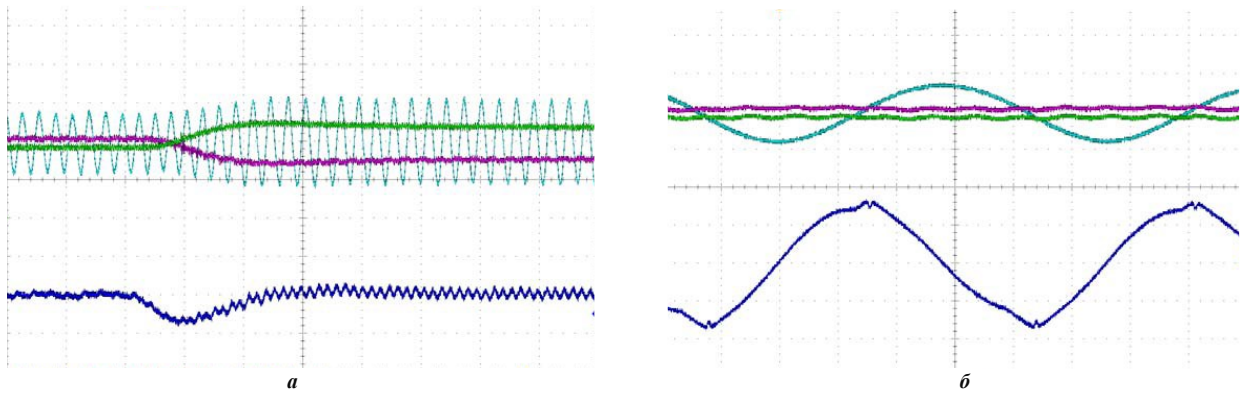


Рис. 2. Апроксимація перехідної характеристики (а) та напруги резонансного конденсатор (б)

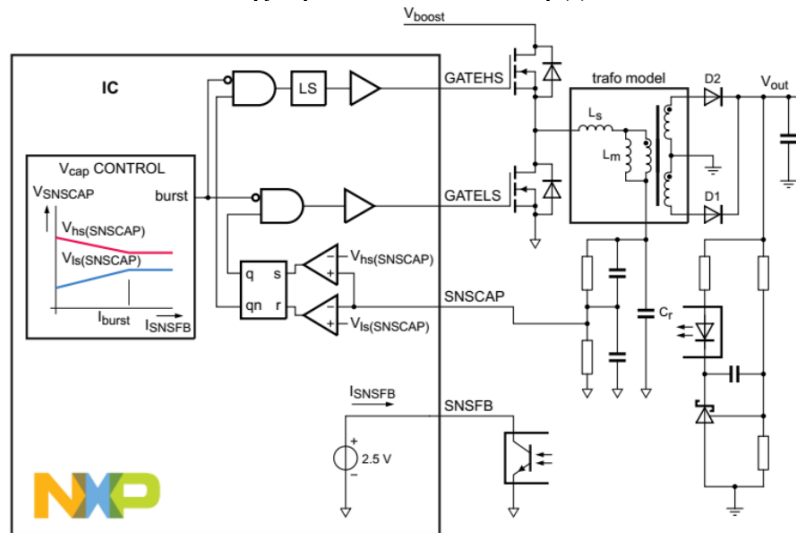


Рис. 3. Реалізація Bang-Bang Charge Control

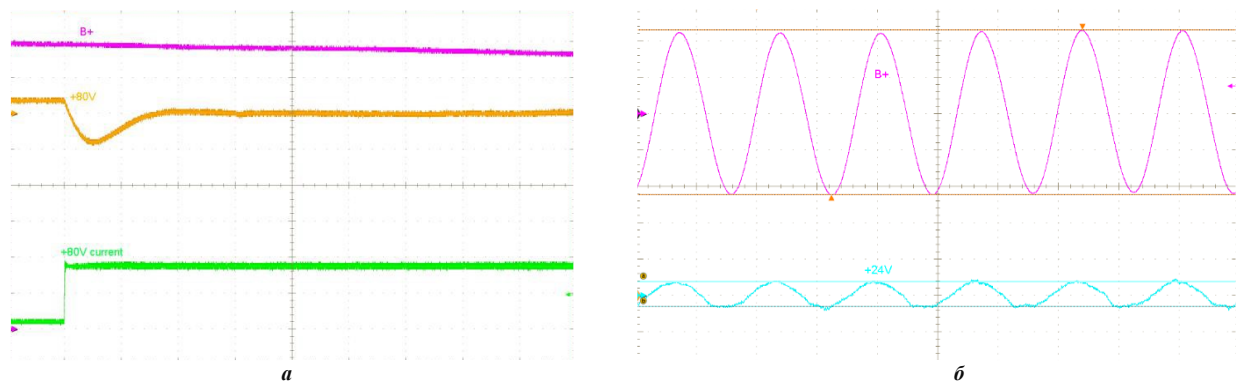


Рис. 4. Апроксимація перехідної характеристики (а) та пульсації змінного струму (б)

Як і в попередньому дослідженні, TSC спрощує стратегію керування, роблячи відповідь змінного струму LLC швидкою, що дозволяє використовувати різні стратегії компенсації.

Мета роботи

Метою цього дослідження є розробка системних і схемних методів для підвищення продуктивності високочастотного напівмостового резонансного LLC перетворювача.

В даній статті наведено наступні наукові внески:

- Використання гібридного гістерезисного керування для покращення перехідної характеристики в LLC перетворювачах;
- Придушення пульсацій змінного струму в LLC перетворювачах;

Виклад основного матеріалу

Перехідна характеристика є однією з ключових показників продуктивності LLC перетворювача живлення, яка описує, як перетворювач реагує на раптову зміну струму навантаження. Цей показник важливий для регулювання напруги в умовах динамічного навантаження, і зазвичай вимагає високої

вихідної ємності для мінімізації відхилення вихідної напруги. Перехідна характеристика залежить від зворотного зв'язку LLC перетворювача, де пропускна здатність і запас по фазі впливають на те, як швидко він реагує на перехідну подію, а також на тимчасову поведінку вихідної напруги.

Частотний метод керування вважається традиційним методом керування для LLC перетворювачів, де частота перемикання визначається безпосередньо вихідною напругою. [4] При використанні такого методу зворотний зв'язок від блоку компенсації використовується для визначення відповідної частоти сигналів керування затвором транзистора. Зміна частоти перемикання змінює коефіцієнт підсилення, що в свою чергу підлаштовує коефіцієнт підсилення для забезпечення необхідної вихідної напруги. Цей метод широко використовується у LLC перетворювачах, але через високу залежність від робочої частоти, вимагає складного обчислювального моделювання та ітераційних експериментів.

Для реалізації поставлених задач використовується інноваційний метод керування, відомий як гібридний гістерезисний контроль (ННС) [5]. Він забезпечує чудову характеристику перехідних процесів за рахунок спрощення каскаду живлення LLC перетворювача в однополюсну систему, яку легше компенсувати при збільшенні смуги пропускання. Його використання мінімізує величину вихідної ємності, яка необхідна для забезпечення правильного регулювання напруги, а також дозволяє зменшити кількість елементної бази, що в свою чергу – дає змогу зменшити розмір та вартість кінцевого виробу. На рисунку 5 показана спрощена блок-схема ННС.

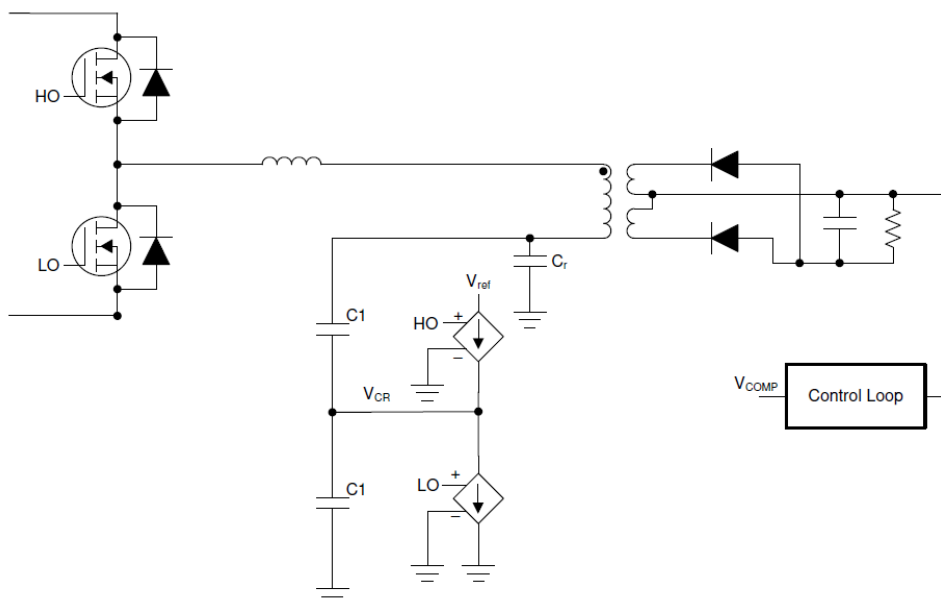


Рис. 5. Реалізація гібридного гістерезисного керування

ННС використовує комбінацію контролю частоти та контролю заряду резонансного конденсатора C_r . Напруга резонансного конденсатора V_{CR} вимірюється через ємнісний дільник, утворений C_1 і C_2 . Ця дискретизована напруга резонансного конденсатора V_{CR} , підключена до двох джерел струму що живляться V_{ref} та керує сигналами затворів LO та HO. В залежності від заряду чи розряду конденсатора у точці V_{CR} , напруга трикутної форми з блоку компенсації V_{COMP} додається до напруги резонансного конденсатора V_{CR} . Напруга резонансного конденсатора зображено на рисунку 6.

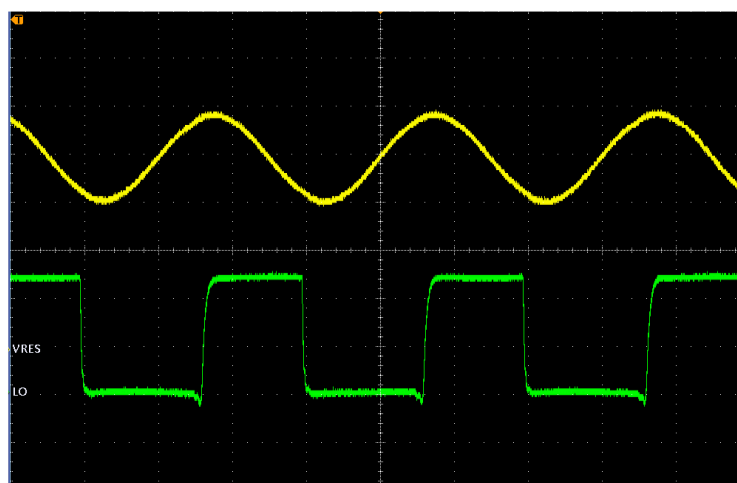


Рис. 6. Напруга резонансного конденсатора V_{CR}

Логіка перемикання формується з напруги резонансного конденсатора V_{CR} та вихідної напруги блоку компенсації V_{COMP} . Синфазна напруга V_{CM} та амплітуда вихідного сигналу V_{COMP} використовуються для генерації двох логічних рівнів $V_{TH(H)}$ та $V_{TH(L)}$, які обчислюються за формулами (1) та (2).

$$V_{TH(H)} = V_{CM} + \frac{V_{COMP}}{2} \tag{1}$$

$$V_{TH(L)} = V_{CM} - \frac{V_{COMP}}{2} \tag{2}$$

Принцип керування затворами ключів зображено на рисунку 7. Напруга резонансного конденсатора V_{CR} порівнюється з логічними рівнями $V_{TH(H)}$ та $V_{TH(L)}$. Коли V_{CR} більша за $V_{TH(H)}$, то верхній ключ вимикається, а при умові коли V_{CR} менша за $V_{TH(L)}$ – вимикається нижній ключ.

На рисунках 8 показана апроксимація затримки та спаду напруги перехідної характеристики при зміні навантаження від 0А до 10А. Більша смуга пропускання дозволяє конвертеру реагувати значно швидше, обмежуючи максимальне відхилення вихідної напруги ΔV до 1,25%. Вихідна напруга повертається до норми протягом 50 мкс.

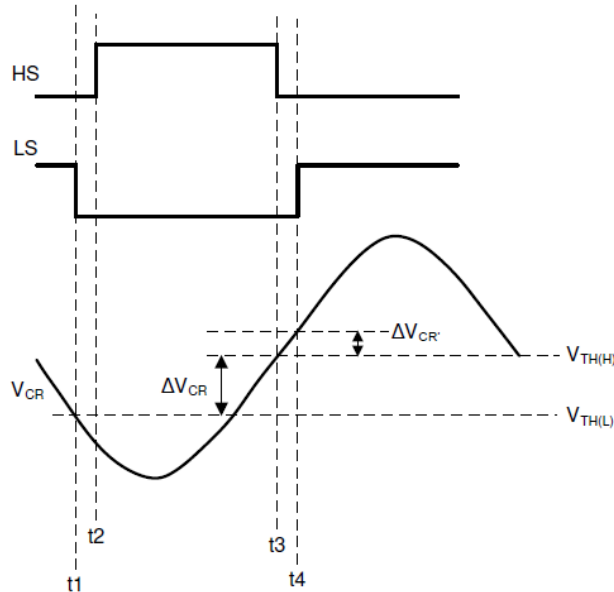


Рис. 7. Принцип керування затворами ННС

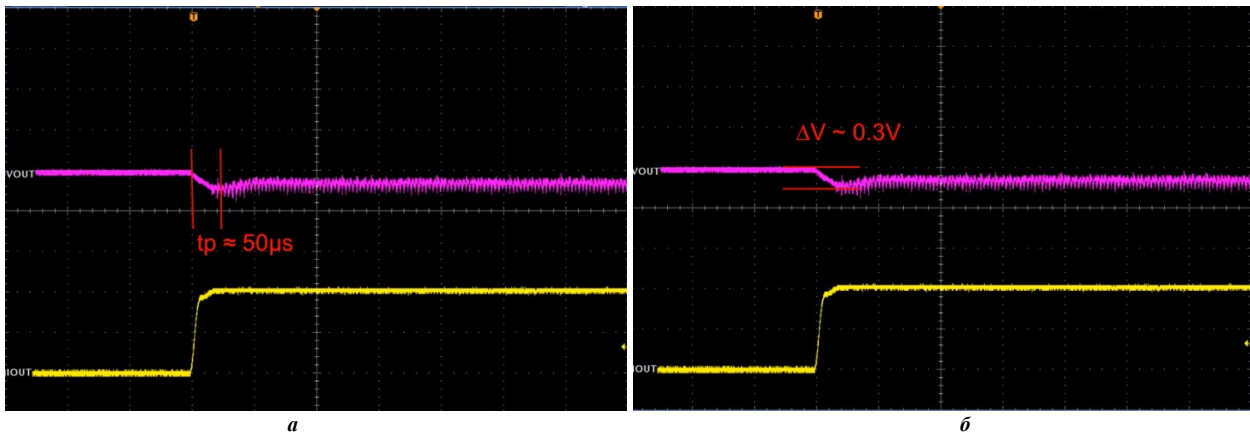


Рис. 8. Апроксимація затримки (а) та спаду напруги (б) перехідної характеристики

Однією з основних функцій стадії PFC є відстеження вхідного струму, щоб він був у фазі з вхідною напругою для досягнення високого коефіцієнта потужності в усьому діапазоні навантаження та для обмеження гармонічних спотворень лінійного струму. Це означає, що миттєва вхідна потужність каскаду PFC змінюється від джерела перемінного струму протягом робочого циклу. В каскаді PFC у режимі перехідної роботи, вхідну потужність можна виразити формулою 3.

$$P_{IN} = 2V_{LineRSM}I_{LineRSM}(\sin\theta)^2 \tag{3}$$

Припускаючи типове застосування з навантаженням постійної потужності, трапляються моменти протягом робочого циклу, коли потужність від джерела перемінного струму, перевищує потужність, що необхідна. У цьому випадку надмірна потужність накопичується в вихідному конденсаторі. З іншого боку, існують моменти протягом робочого циклу, коли потужність навантаження, перевищує потужність від джерела перемінного струму. У цьому випадку дефіцит потужності забезпечує вихідний конденсатор. В режимі стабільного навантаження ця поведінка призводить до низькочастотної пульсації на виході каскаду.

На рисунку 9, зображено спрощена принципова схема появи пульсацій. Низькочастотні пульсації можуть бути виражені за допомогою формули 4.

$$V_{ripple} = \frac{P_{OUT}}{2\pi f_{Line} R_{SM} V_{OUT} C_{OUT}} \quad (4)$$

Низькочастотні пульсації можна зменшити шляхом збільшення вихідної ємності PFC, але цей підхід може бути дорогим через високу вартість високовольтних конденсаторів, здатних впоратися зі значними пульсаціями струму PFC.

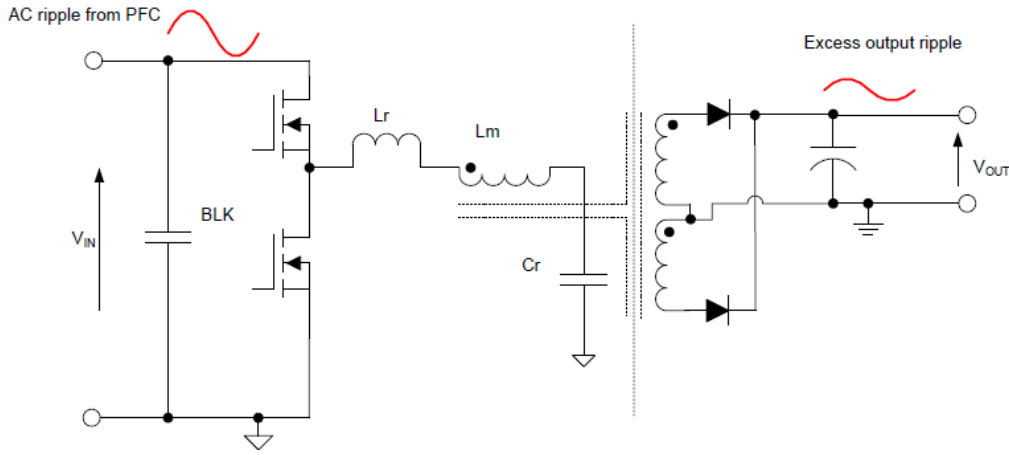


Рис. 9. Пульсації змінного струму в LLC перетворювачах

Другий підхід полягає в зменшенні пульсацій змінного струму в перетворювачі LLC. Щоб реалізувати це, використовуємо метод гібридного гістерезисного керування (ННС). Реалізацію даного методу зображено на Рисунку 10. [6]

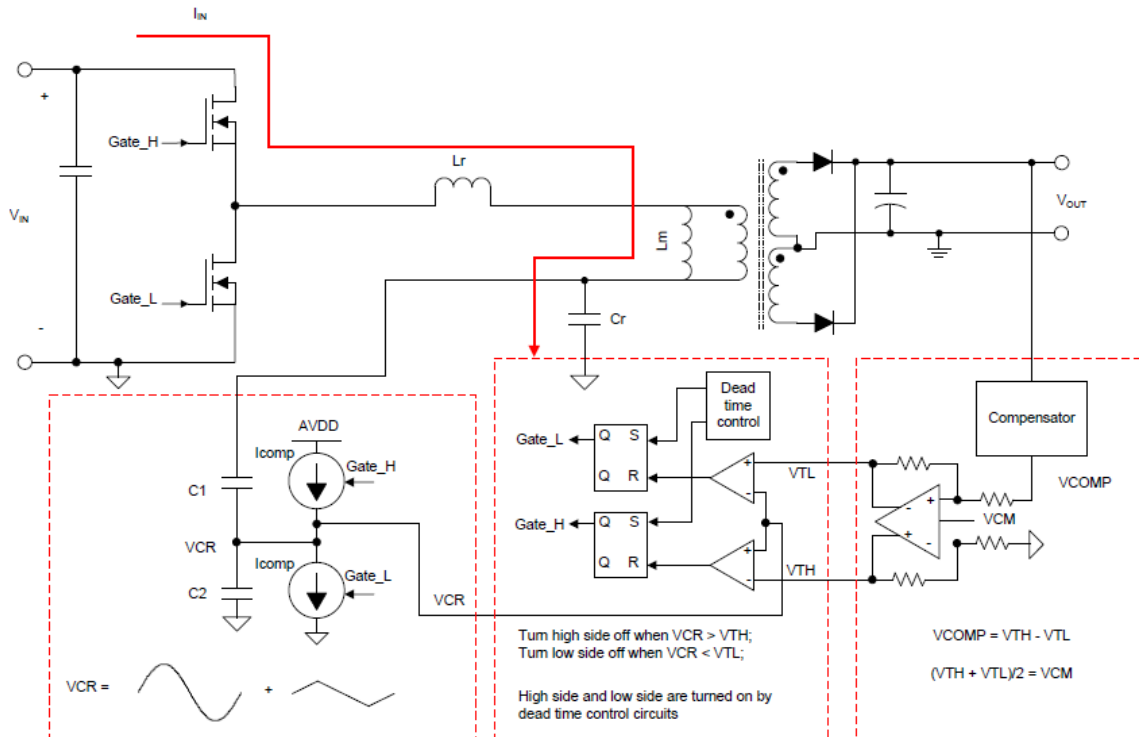


Рис. 10. Реалізація гібридного гістерезисного керування для зменшення пульсацій змінного струму

ННС поєднує контроль заряду та контроль частоти. Зміна напруги на резонансному конденсаторі C_r знімається через ємнісний дільник і використовується для керування логікою перемикання. Два джерела струму, з'єднані з середньою точкою ємнісного дільника утворюють дискретизовану напругу з частотною компенсацією.

Контролюючи зміну напруги на резонансному конденсаторі, керується чистий вхідний заряд, що поступає до резонансного каскаду, і, отже, керується вхідна потужність, яка подається на вихід. Ця схема керування дозволяє враховувати зміну пульсацій змінного струму на вході перетворювача LLC.

Загальна амплітуда пульсацій на виході становить 300 мВ (від піка до піка), що складає 2,5% від загальної вихідної напруги. Як показано на рисунку 11, частотна складова 50 Гц відсутня в вихідній напрузі; присутні лише пульсації, спричинені перемиканням у LLC перетворювачі.

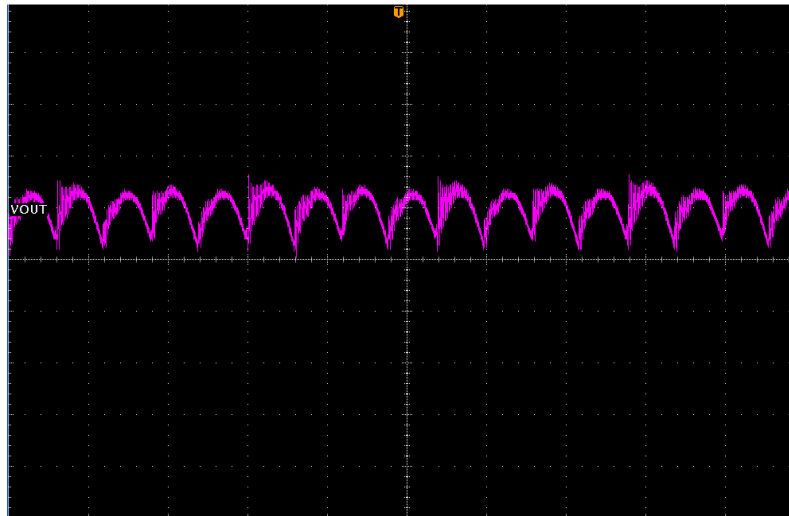


Рис. 11. Пульсації змінного струму в LLC перетворювачах з гібридним гістерезисним керуванням

Висновки

Інноваційний метод гібридного гістерезисного контролю забезпечує чудову характеристику перехідних процесів за рахунок спрощення каскаду живлення LLC перетворювача в однополюсну систему, яку легше компенсувати при збільшенні смуги пропускання. Також, даний метод забезпечує чудове усунення пульсацій змінного струму шляхом прямого контролю загальної вхідної потужності, що подається на вторинну обмотку кожного циклу перемикання. Усунення пульсацій змінного струму дозволяє розробнику відповідати суворим вимогам до вихідної напруги при меншій ємності вихідного конденсатора PFC, що зменшує вартість кінцевого виробу і розмір плати.

Література

1. Christophe Basso “Understanding the LLC Resonant Structure”, onsemi application note AND8311/D, January 2008.
2. Zhiyuan Hu, Laili Wang, Yan-Fei Liu, and P. C. “Bang-Bang Charge Control for LLC Resonant Converters” by Sen, IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, Vol. 30, Issue 2.
3. Fixed-frequency DCS-Control: Fast transient response with clock synchronization. <https://www.ti.com/lit/pdf/slyt846>
4. “Charge Current Control for LLC Resonant Converter” by Hangseok Choi, Applied Power Electronics Conference, 2015, Charlotte (NC).
5. Feedback Loop Design of an LLC Resonant Power Converter. <https://www.ti.com/lit/pdf/SLUA582A>
6. UCC25640x LLC Resonant Controller with Ultra-Low Audible Noise and Standby. <https://www.ti.com/lit/pdf/SLUSD90>
5. Feedback Loop Design of an LLC Resonant Power Converter. Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/SLUA582A>
6. UCC25640x LLC Resonant Controller with Ultra-Low Audible Noise and Standby. Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/SLUSD90>