УДК 624.314 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.024

ДВОНАПРАВЛЕНИЙ DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ АСИМЕТРИЧНОГО ІНВЕРТОРА ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Д.В. Мартинов[*], докт. філософії, **Ю.В. Руденко**[**], докт. техн. наук,
В.В. Мартинов[***], докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. **E-mail: d.martynov@electrotechimpulse.com.**

Роботу присвячено дослідженню та аналізу електромагнітних процесів у двонаправленому перетворювачі постійного струму в змінний на основі асиметричного інвертора з магнітопов'язаними дроселями, а також визначенню його параметрів з метою підвищення енергетичної ефективності. Для дослідження процесів використано метод усереднення в просторі станів та методи імітаційного моделювання. У результаті роботи отримано аналітичні вирази для розрахунку струмів в асиметричному інверторі з магнітопов'язаними дроселями на інтервалах комутації. Визначено взаємозв'язок між індуктивностями дроселів та параметрами вхідних і вихідних джерел електроживлення, за яких циркуляційні струми в колах інвертора відсутні, що забезпечує зниження статичних втрат потужності у перетворювачі. У ході досліджень отримано нові аналітичні та графічні залежності для роботи двонаправленого DC-AC перетворювача в режимах передачі активної та реактивної потужності, що розширюють попередні моделі асиметричних DC-DC перетворювачів. Отримані залежності дають можливість на етапі проєктування підвищити ефективність перетворювача шляхом зниження втрат потужності, зумовлених циркуляційними струмами, за рахунок вибору оптимального співвідношення параметрів інвертора. Бібл. 24, рис. 8.
Ключові слова: системи накопичення електроенергії, двонаправлений DC-AC перетворювач, асиметричний інвертор, високодинамічне двонаправлене перетворення електроенергії, гібридний електромобіль.

Задля забезпечення функцій накопичення, збереження та подальшого ефективного використання електричної енергії в мережах змінного струму традиційно застосовують акумуляторні системи енергонакопичення [1]. Основними сферами їхнього використання є системи зберігання електроенергії, джерела безперебійного живлення [2], електричні та гібридні електромобілі [3–5], а також системи відновлюваної електрогенерації [6]. Обмін енергії між накопичувачем та мережею змінного струму здійснюється за допомогою двонаправлених напівпровідникових DC-AC перетворювачів. На сьогодні такі перетворювачі набули широкого застосування для забезпечення передачі потужності в обох напрямках.

Окремо слід відзначити застосування двонаправлених DC-AC перетворювачів в електротранспорті. На прикладі гібридних та електричних транспортних засобів можна наочно продемонструвати принципи роботи та основні підходи до використання таких перетворювачів. Гібридні системи накопичення енергії типу «паливний елемент – акумулятор» дедалі ширше застосовуються в сучасних автомобілях. У таких системах розподіл електричної потужності здійснюється на різних рівнях напруги, що зумовлено наявністю акумуляторних накопичувачів. Процеси як розряду, так і заряду акумулятора, зокрема під час роботи генератора, що рухається двигуном внутрішнього згоряння, або під час рекуперативного гальмування, потребують двонаправленого перетворення енергії [7]. Динаміка руху транспортного засобу характеризується швидкими прискореннями, що вимагають значної потужності від енергосистеми автомобіля [8]. Водночас під час гальмування завдяки системі рекуперації виникають надлишки енергії, які доцільно акумулювати задля підвищення енергоефективності та збільшення запасу ходу. Така енергія може зберігатися як в акумуляторі, так і в супер-конденсаторі, який використовується задля забезпечення швидких змін динаміки руху (прискорення) автомобіля [9].

© Мартинов Д.В., Руденко Ю.В., Мартинов В.В., 2026
ORCID: [*] https://orcid.org/0000-0002-2040-872X; [**] https://orcid.org/0000-0003-1852-215X;
[***] https://orcid.org/0000-0003-2184-0394
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

Структури енергетичних систем у різних автомобілях можуть відрізнятися, проте загальна концепція, що передбачає використання акумуляторних батарей, суперконденсаторів та двонаправлених перетворювачів, залишається незмінною. Застосування двонаправлених перетворювачів дає змогу реалізувати компактні, енергоефективні та адаптивні рішення, що є критично важливими для високодинамічних енергетичних систем, зокрема електромобілів, систем накопичення енергії та систем з рекуперацією енергії. На рис. 1 зображено структуру системи перетворення та накопичення електричної енергії з використанням електромобілів.

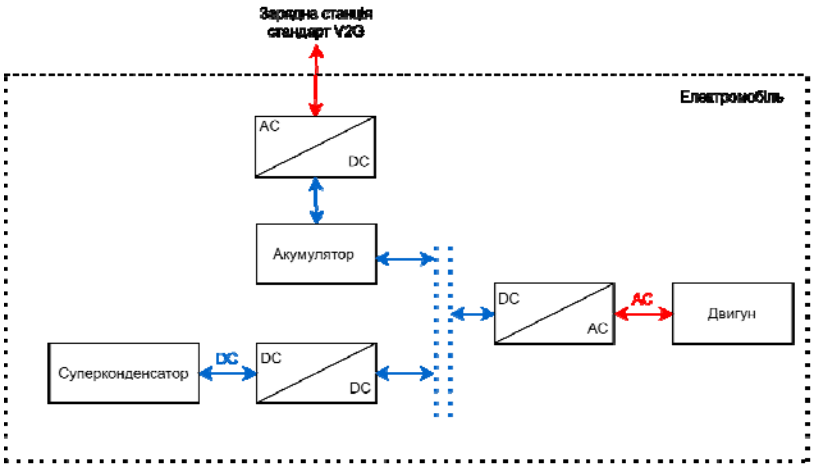


Рис. 1

Двонаправлений перетворювач DC-AC працює у двох режимах. Перший режим – режим випрямлення, у якому перетворювач функціонує як активний випрямляч та забезпечує передавання активної потужності від трифазної мережі змінного струму до шини постійної напруги. Другий режим – режим інвертування, у якому енергія передається від шини постійної напруги до трифазної мережі змінного струму, а перетворювач функціонує як інвертор напруги.

Інтеграція акумуляторних систем накопичення електроенергії до мереж змінного струму набуває все більшого поширення у зв'язку з необхідністю оптимізації гібридних джерел живлення. З урахуванням вимог до зменшення вартості та габаритів перетворювачів двонаправлені DC-AC перетворювачі стають ефективним рішенням завдяки використанню спільних силових елементів для передачі потужності в обох напрямках. На сьогодні існує значна кількість схемотехнічних рішень для побудови двонаправлених напівпровідникових перетворювачів, вибір яких визначається поставленими вимогами та умовами застосування. Багато наукових робіт присвячено класифікації двонаправлених перетворювачів за топологією, наявністю гальванічної розв'язки між вхідною та вихідною сторонами, а також підходами до керування [10–13].

Широке застосування в системах накопичення електроенергії знаходять двонаправлені DC-AC перетворювачі, побудовані на основі асиметричного інвертора [11, 14–17], структуру якого наведено на рис. 2. Дана структура має ряд переваг порівняно з класичними мостовими інверторами. По-перше, відсутні наскрізні струми, оскільки активні силові ключі не з'єднані послідовно в межах одного фазного плеча, що виключає можливість їхнього протікання навіть за одночасного відкривання всіх ключів. По-друге, суттєво зменшуються втрати потужності, пов'язані з процесом зворотного відновлення силових ключів, оскільки відсутній контур протікання струму через їхні внутрішні діоди. По-третє, інвертор може працювати без мертвого часу під час широтно-імпульсної модуляції, що усуває проблеми, пов'язані з наскрізними струмами, та дає можливість підвищити частоту перетворення. По-четверте, забезпечується висока динаміка переходу між режимами заряду та розряду, що сприяє ефективнішому використанню енергії, зокрема під час рекуперативного гальмування в електротранспорті [14], і є суттєвою перевагою даного перетворювача для застосування в автомобільних гібридних системах накопичення енергії.

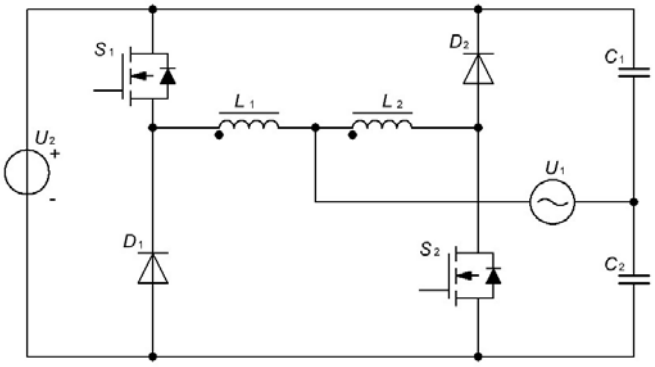


Рис. 2

Двонаправлені DC-AC перетворювачі на основі асиметричного інвертора реалізуються у двох варіантах залежно від виконання дроселів: з магнітопов'язаними та магнітно непов'язаними

дроселями. Як показує аналіз процесів в інверторі, основна відмінність між цими варіантами полягає у тривалості переходу між режимами накопичення та віддачі енергії [14]. У перетворювачах з магнітно не пов'язаними дроселями час переходу визначається величиною їхньої індуктивності. Натомість у випадку магнітопов'язаних дроселів цей час визначається лише індуктивністю розсіювання між обмотками. Таким чином, завдяки зменшенню індуктивності розсіювання перетворювачі з магнітопов'язаними дроселями можуть забезпечувати вищу швидкодію, що є критично важливим для ряду застосувань.

Незважаючи на зазначені переваги, використання магнітопов'язаних дроселів в асиметричному інверторі супроводжується рядом недоліків. Як показано в роботах [11, 14, 15, 18–20], у колах такого інвертора (рис. 2) можуть виникати циркуляційні струми, що призводить до додаткового навантаження на силові ключі та збільшенню втрат потужності. Крім того, виникнення циркуляційних струмів зумовлюється певними співвідношеннями параметрів джерел живлення на низьковольтній та високовольтній сторонах [14, 21, 22].

У перетворювачах із магнітно непов'язаними дроселями циркуляційні струми відсутні, проте це супроводжується погіршенням динамічних характеристик, зокрема збільшенням тривалості перехідних процесів під час зміни напрямку потоку потужності. Натомість асиметричний інвертор з магнітопов'язаними дроселями забезпечує високу швидкодію, однак за певних умов виникнення циркуляційних струмів призводить до додаткових втрат потужності.

Таким чином, двонаправлені DC-AC перетворювачі на основі асиметричного інвертора потребують подальших досліджень з метою зменшення циркуляційних струмів за збереженні високої швидкодії. Одним із ключових інструментів для вирішення цієї задачі є розроблення математичних та імітаційних моделей, що дає змогу дослідити процеси в перетворювачі.

На відміну від попередніх досліджень [14, 21, 22], які переважно були зосереджені на топологіях двонаправлених DC-DC перетворювачів та окремих режимах їхньої роботи, у даній роботі розроблений аналітичний апарат поширено на системи двонаправленого DC-AC перетворення, що функціонують у режимах інвертування, активного випрямлення та передачі реактивної потужності. Крім того, отримано нові графічні залежності для визначення меж робочих режимів асиметричного інвертора в гібридних системах накопичення електроенергії змінного струму.

Метою даної роботи є розроблення математичної та імітаційної моделей асиметричного інвертора з магнітопов'язаними дроселями для двонаправленого DC-AC перетворювача та формування рекомендацій щодо вибору параметрів дроселів з метою підвищення ефективності перетворювача.

Дослідження двонаправленого DC-AC перетворювача на основі асиметричного інвертора з магнітопов'язаними дроселями здійснювалося шляхом аналізу його робочих режимів у програмному пакеті схемотехнічного моделювання PSIM на основі розробленої імітаційної моделі (рис. 3). Модель включає магнітопов'язані дроселі L_1=L_2=L=2 мГн та додатковий дросель L_s. Прийнято такі припущення: комутація силових ключів є миттєвою; їхній активний опір у відкритому стані дорівнює нулю; активний опір обмоток дроселів також дорівнює нулю. У схемі рис. 3 амплітуда джерела живлення становить U_1=220 В; напруги на конденсаторах $U_{C_1} = U_{C_2} = U_2/2$, де U_2=500 В. Задля покращення наочності результатів моделювання частоту мережевої напруги прийнято рівною 500 Гц, а частоту широтно-імпульсної модуляції – 20 кГц.

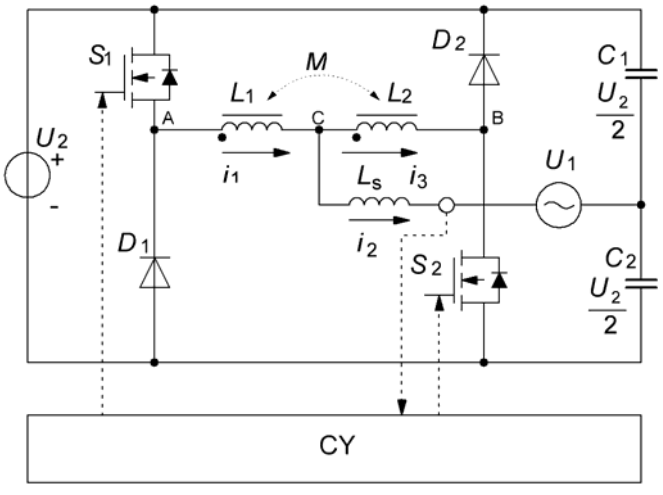


Рис. 3

Дроселі L_1 та L_2 забезпечують обмеження струмів у режимах комутації, зокрема, за можливого одночасного відкривання верхніх і нижніх силових ключів, а також виконують функцію індуктивного фільтра. Додатковий дросель L_s, включений між спільною точкою «*c*» дроселів L_1 і L_2 та

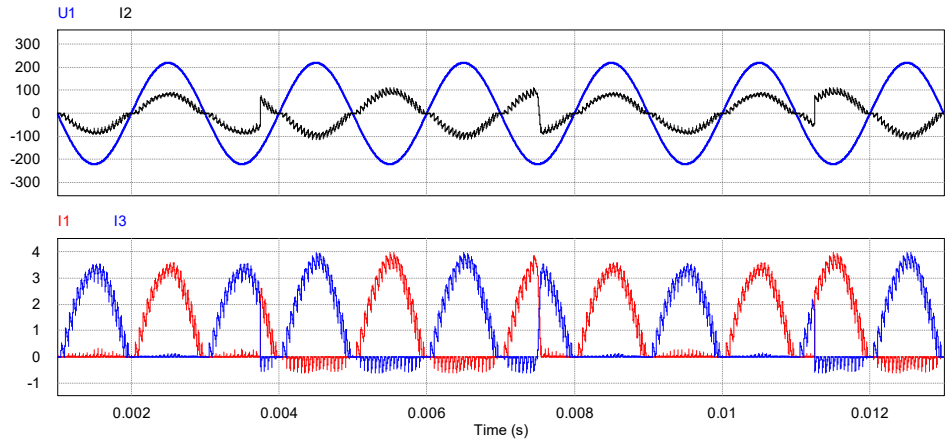
джерелом U_1, забезпечує додаткове обмеження струму i_2 у колі навантаження. Взаємна індуктивність між дроселями L_1 та L_2 дорівнює M.

У двонаправленому DC-AC перетворювачі на рис. 3 можна виділити декілька режимів роботи. У першому режимі перетворювач здійснює перетворення енергії постійного струму, отриманої від накопичувача, в енергію змінного струму для передачі в мережу, при цьому напруга мережі та вихідний струм інвертора є синфазними. У другому режимі перетворювач функціонує як активний випрямляч, формуючи струм заряду накопичувача з низьким рівнем гармонічних спотворень. При цьому напруга мережі та вхідний струм інвертора знаходяться у протифазі з кутом 180°. У більш універсальних застосуваннях DC-AC перетворювачі також використовуються для компенсації реактивної потужності.

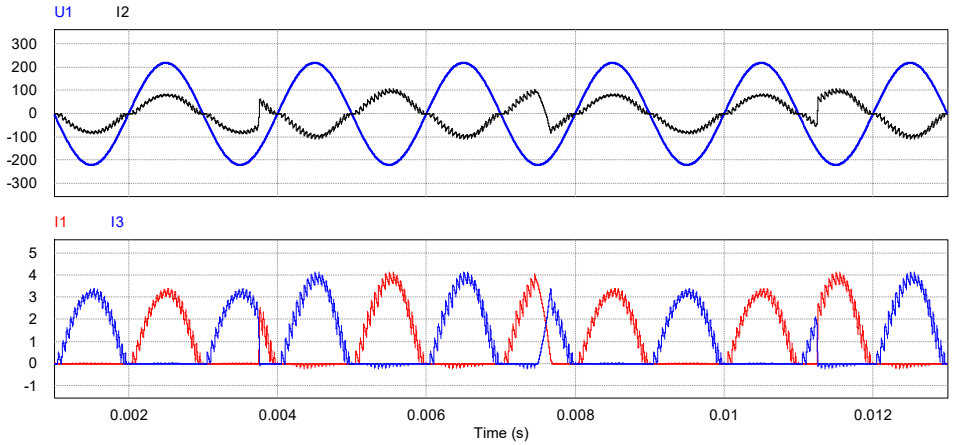
У режимі випрямлення з активним споживанням потужності у позитивному напівперіоді працюють ключ S_1 та діод D_1 (рис. 3), а у негативному – ключ S_2 та діод D_2. У режимі інвертора з передачею активної потужності процеси є аналогічними режиму випрямлення за винятком фазового співвідношення між струмом і напругою, внаслідок чого енергія передається від джерела постійного струму до мережі змінного струму.

На рис. 4, *а* наведено результати моделювання інверторного та випрямляючого режимів асиметричного інвертора за відсутності додаткової індуктивності (L_s=0). Як видно з результатів, у перетворювачі одночасно існують струми i_1 та i_3 як в інверторному, так і у випрямляючому режимах. Струм, що одночасно протікає через два магнітопов'язані дроселі L_1 і L_2, є циркуляційним струмом [18, 21, 22]. Як показали дослідження, циркуляційний струм може протікати через діоди D_1 або D_2, а також через антипаралельні діоди силових ключів S_1 та S_2.

На рис. 4, *б* наведено результати моделювання для випадку L_s =200 мкГн. Як видно з отриманих результатів, рівень циркуляційних струмів зменшується, що свідчить про ефективність введення додаткової індуктивності для їхнього обмеження.



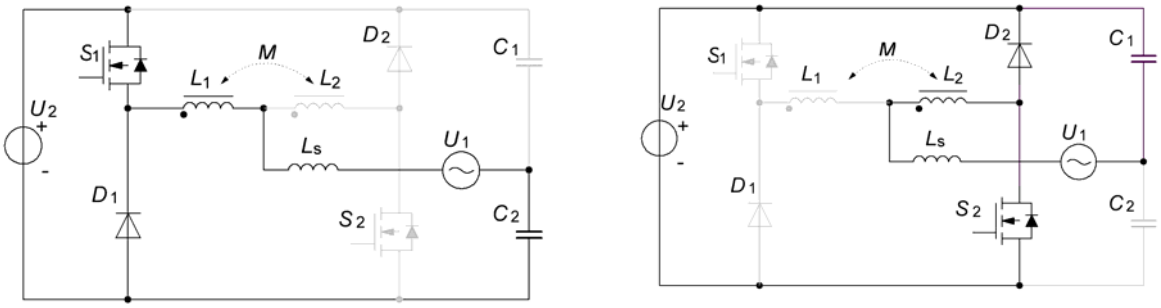
а



б

Рис. 4

Протягом інтервалу, коли змінний струм є додатним, незалежно від полярності напруги змінного струму, активна схема включає ключ S_1, діод D_1, дроселі L_1 та L_s (рис. 5, *а*).



а *б*

Рис. 5

Аналогічно протягом інтервалу, коли змінний струм є від'ємним (рис. 5, *б*), незалежно від полярності напруги мережі, провідний контур утворюють ключ S_2, діод D_2 та дроселі L_2 і L_s. У цьому випадку елементи, пов'язані з ключем S_1, діодом D_1 та дроселем L_1, не повинні проводити струм. Аналогічно, за активного ключа S_1 струм через дросель L_2 відсутній.

Як зазначалося раніше, однією з основних проблем асиметричного інвертора з магнітопов'язаними дроселями є наявність циркуляційних струмів, що призводять до додаткових втрат потужності. Тому важливо визначити параметри або їхні співвідношення, за яких циркуляційний струм може бути істотно зменшений. Для цього розглянемо процес формування позитивної напівхвилі напруги мережі за активного ключа S_1. У роботі [23] показано, що за прийнятих припущень у разі відкритого транзистора S_1 циркуляційний струм через діод D_2 не виникає. У цьому випадку циркуляційний струм може протікати лише через внутрішній діод ключа S_2. Для визначення умов, за яких циркуляційний струм у разі ввімкненого ключа S_1 прямує до нуля, складемо еквівалентну схему асиметричного інвертора (рис. 6).

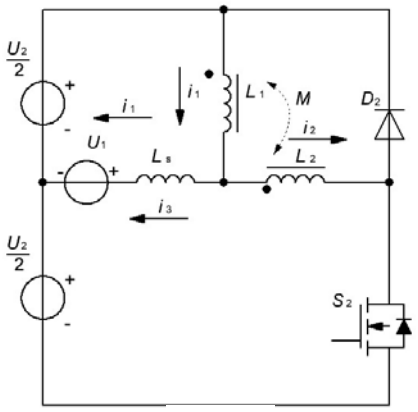


Рис. 6

Для аналізу процесів розроблено математичну модель перетворювача за допомогою методу усереднення [24]. Відповідно до цього складено систему рівнянь (1) у приростах для інтервалу, коли ключ S_1 є відкритим, згідно зі схемою заміщення рис. 6

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta I_1}{T_i}(L_1+M)+\dfrac{\Delta I_3}{T_i}(L_S-M)=\dfrac{U_2}{2}-U_1, \\ \dfrac{\Delta I_3}{T_i}(L_S-M)-\dfrac{\Delta I_2}{T_i}(L_2+M)=-U_1-\dfrac{U_2}{2}, \\ \Delta I_2+\Delta I_3=\Delta I_1, \end{cases} \tag{1}$$

де T_i – тривалість інтервалу імпульсу керування; $M=K_{зв}\sqrt{L_1L_2}$ – величина взаємної індуктивності між обмотками дроселя, $K_{зв}$ – коефіцієнт магнітного зв'язку.

Розв'язуючи систему рівнянь (1) щодо приросту струмів та тривалості другого інтервалу, отримаємо

$$\Delta I_1=\frac{T_i}{2}\cdot\frac{U_2L_2-2U_1M-2U_1L_2+2L_SU_2-U_2M}{L_1L_S+2L_SM-M^2+L_1L_2+L_SL_2}, \tag{2}$$

$$\Delta I_2=\frac{T_2}{2}\cdot\frac{2L_sU_2-U_2M+U_1M+2L_1U_1+L_1U_2}{L_1L_S+2L_SM-M^2+L_1L_2+L_SL_2}, \tag{3}$$

$$\Delta I_3 = \frac{T_2}{2} \cdot \frac{U_2 L_2 - 2L_1 U_1 - L_1 U_2 - 2U_1 M - 2U_1 L_2}{L_1 L_S + 2L_S M - M^2 + L_1 L_2 + L_S L_2}. \quad (4)$$

Розглянемо випадок, близький до ідеального магнітного зв'язку між напівобмотками дроселя, коли $M \sim L_1 = L_2 = L$. За цих умов визначимо співвідношення параметрів, за яких приріст струму на даному інтервалі прямує до нуля. Перепишемо вираз (3) у спрощеному вигляді

$$\Delta I_2 = \frac{T_i}{4} \cdot \frac{L_S U_2 + 2LU_1}{LL_3}. \quad (5)$$

Прирівнявши вираз (5) до нуля та врахувавши напрямок струму, визначимо значення додаткової індуктивності L_s, за якого приріст циркуляційного струму прямує до нуля

$$L_S = 2L\frac{U_1}{U_2}. \quad (6)$$

Згідно з виразом (6), зі зростанням величини подвоєної амплітуди напруги джерела змінного струму до значення напруги джерела постійного струму необхідне значення додаткової індуктивності L_s збільшується. Отже, у граничному випадку, коли подвоєна амплітуда напруги джерела змінного струму наближається до напруги джерела постійного струму, необхідне значення додаткової індуктивності L_s наближається до індуктивності обмотки магнітопов'язаного дроселя. Це свідчить про те, що за таких співвідношень параметрів ефект переваги магнітного зв'язку щодо зменшення циркуляційного струму істотно послаблюється, а мінімізація циркуляційних струмів потребує збільшення додаткової індуктивності.

Як випливає зі структури інвертора на рис. 5, *б* та результатів моделювання, за активного ключа S_2 діод D_1 не проводить струм. Таким чином, у разі виконання умови (6) циркуляційні струми в інверторі відсутні.

Задля підтвердження отриманих результатів виконано моделювання. У випадку передачі чисто активної потужності розглянуто два режими: інверторний, у якому напруга та струм є синфазними, та випрямляючий, у якому вони перебувають у протифазі (рис. 7). У процесі моделювання виконувалася умова (6).

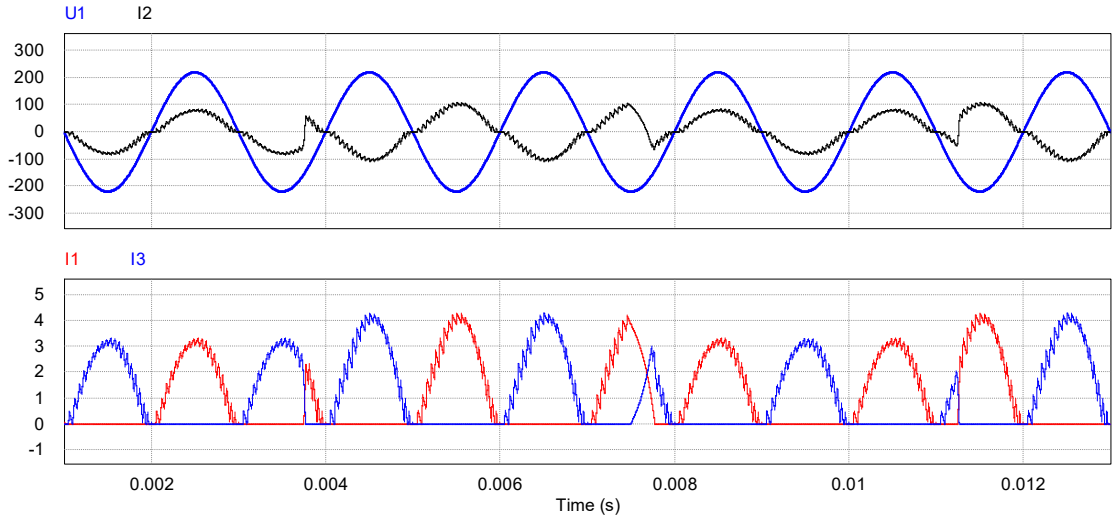
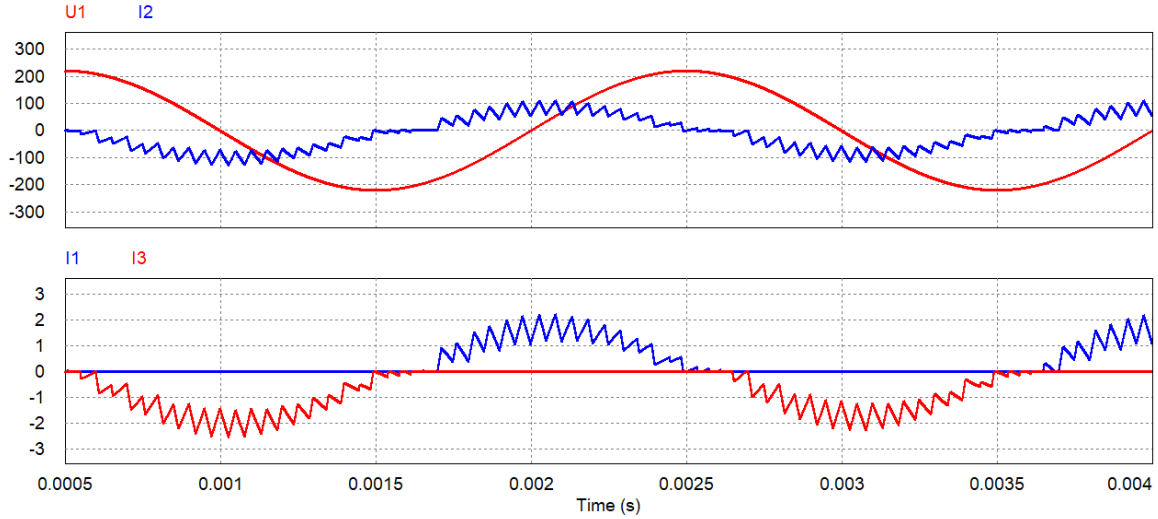


Рис. 7

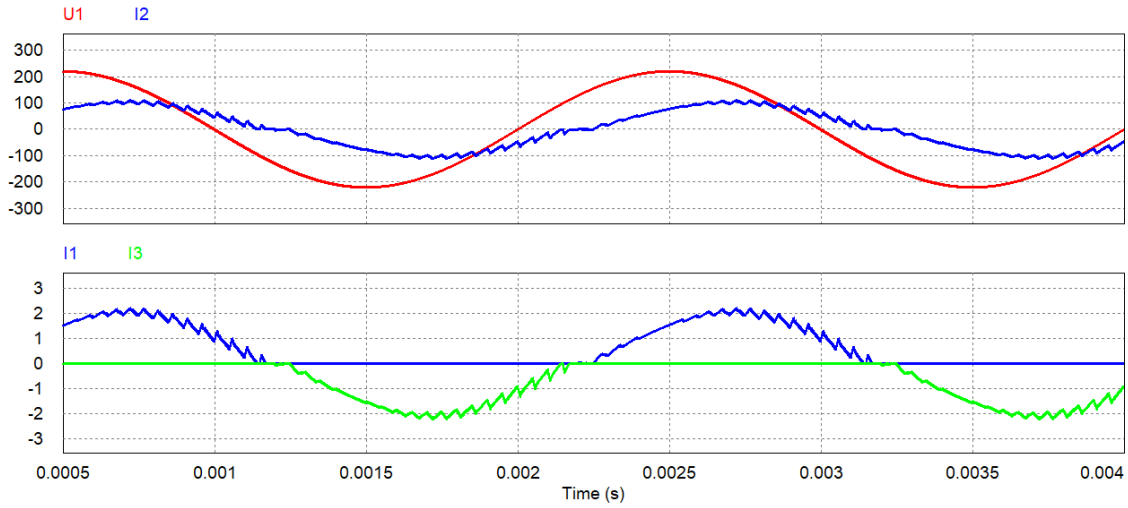
На рис. 7 наведено результати моделювання інверторного та випрямляючого режимів асиметричного інвертора за умови $L_s = L_1 = L_2 = 2$ мГн. Як видно з отриманих результатів, циркуляційний струм відсутній.

Передавання реактивної потужності між мережею змінного струму та джерелом постійного струму супроводжується ускладненням алгоритму керування. Виходячи з аналізу процесів, можна зробити висновок, що плече, яке складається з S_1 та D_1, проводить додатний струм, тоді як плече S_2 та D_2 проводить від'ємний струм незалежно від полярності напруги.

Для передачі реактивної потужності фазовий зсув між струмом і напругою повинен знаходитися у межах від 0 до 180°. На рис. 8 наведено результати моделювання для двох випадків передачі реактивної потужності: у ємнісному режимі (рис. 8, *а*) та індуктивному режимі (рис. 8, *б*).



а



б

Рис. 8

Як випливає з результатів моделювання, у разі виконання умови (6) циркуляційні струми в інверторі відсутні в усіх можливих режимах функціонування системи накопичення енергії на основі асиметричного інвертора.

Проведене моделювання підтверджує достовірність отриманих аналітичних результатів.

Висновки. Розроблено нову математичну модель для розрахунків двонаправленого DC-AC перетворювача на основі асиметричного інвертора з магнітопов'язаними дроселями та додатковою індуктивністю L_s, а також сформульовано рекомендації щодо вибору його параметрів.

Отримані аналітичні співвідношення дають можливість на етапі проєктування визначати параметри інвертора, що забезпечують підвищення його енергетичної ефективності. Запропоновано спосіб удосконалення структури асиметричного інвертора шляхом введення додаткової індуктивності, що дає змогу усунути небажані циркуляційні струми в колах перетворювача. Встановлено, що за певного співвідношення параметрів додаткової індуктивності та напруг джерел постійного і змінного струму циркуляційний струм в асиметричному інверторі з ідеально магнітопов'язаними дроселями наближається до нуля. Показано, що зі зростанням різниці перевищення напруги джерела постійного струму над амплітудним значенням напруги джерела змінного струму необхідне значення додаткової індуктивності зменшується. Результати моделювання підтверджують достовірність отриманих аналітичних результатів та ефективність запропонованого підходу.

Роботу виконано за бюджетною програмою за темою «Режим–3», номер державної реєстрації 0125U000609 (КПКВК 6541030).

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

1. Yang Y., Bremner S., Menictas C., Kay M. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018. Vol. 91. Pp. 109–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047.

2. Naden N., Bax R. Generator with DC boost and split bus bidirectional DC-to-DC converter for uninterruptible power supply system or for enhanced load pickup. Patent US No 20040155526A1, 2024.

3. Onar O.C., Kobayayashi J., Erb D.C., Khaligh A. A bidirectional high-power-quality grid interface with a novel bidirectional noninverted buck-boost converter for PHEVs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2012. Vol. 61. Issue 5. Pp. 2018–2032. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2192459.

4. Hein K., Xu Y., Wilson G., Gupta A.K. Coordinated Optimal Voyage Planning and Energy Management of All-Electric Ship With Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Power Systems.* 2021. Vol. 36. No 3. Pp. 2355–2365. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3029331.

5. Fonseca de Freitas C.A., Bartholomeus P., Margueron X., Le Moigne P. Partial Power Converter for Electric Vehicle Hybrid Energy Storage System Using a Controlled Current Source Cascade Architecture. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 150898–150913. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3477935.

6. Zharkin A.F., Novsky V.O., Martynov V.V., Pazieiev A.G. Provision of high quality power supply in distribution networks with renewable energy sources. *Visnyk NTU KhPI. Seriia: Elektrychni mashiny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii*. 2019. Vyp. 20(1345). Pp. 4–14. DOI: https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.01. (Ukr)

7. Zharkin A., Novskyi V., Martynov V. Powerful Unified Inverter Modules for Energy Storage Systems. IEEE 6th International Conference on *Energy Smart Systems* (*ESS*), Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 144–149. DOI: https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764177.

8. Santiago J., Oliveira J.G., Lundin J., Abrahamsson J., Larsson A., Bernhoff H. Design parameters calculation of a novel driveline for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3(1). DOI: https://doi.org/10.3390/wevj3020225.

9. Yi F., Lu D., Wang X., Pan C., Tao Y., Zhou J., Zhao C. Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Battery Degradation. *Sustainability.* 2022. Vol. 14. No 3. P. 1214. DOI: https://doi.org/10.3390/su14031214.

10. Tytelmaier K.O., Husev O.O., Veligorskyi O.A Review of non-isolated bidirectional converters topologies for portable application based on renewable energy sources. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii.* 2018. No 2(12). Pp. 176–189. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-176-188. (Ukr)

11. Patarroyo-Gutierrez L.D., Hernández Gómez O.M., Jiménez López F.R. El inversor dual buck de inductor simple: control de voltaje y procedimiento para obtener su modelo matemático. *Revista EIA*. 2024. Vol. 21. No 41. Article no: 4117. Pp. 1–21. DOI: https://doi.org/10.24050/reia.v21i41.1692.

12. Bui D-V., Cha H., Nguyen V-C. Asymmetrical PWM Scheme Balancing Voltages Dual-outputs Interleaved Four-switch Buck-Boost DC-DC Converter. IEEE Ninth International Conference on *Communications and Electronics* (*ICCE*), Nha Trang, Vietnam, 27-29 July 2022. Pp. 482–487. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCE55644.2022.9852055.

13. Mirza A.B., Emon A.I., Vala S.S., Luo F.A Comprehensive Analysis of Current Spikes in a Split-Phase Inverter. *IEEE Applied Power Electronics* Conference and Expo-sition (*APEC*), Houston, TX, USA, 20-24 March 2022. Pp. 1580–1585. DOI: https://doi.org/10.1109/APEC43599.2022.9773407.

14. Yurchenko O.M., Martynov D.V., Martynov V.V. Research of a bidirectional voltage converter for application in energy storage system. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy.* 2023. Vyp. 65. Pp. 121–126. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.121. (Ukr).

15. Stanley G.R., Bradshaw K.M. Precision DC-to-AC power conversion by optimization of the output current waveform-the half-bridge revisited. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 1999. Vol. 14. No 2. Pp. 372–380. DOI: https://doi.org/10.1109/63.750191.

16. Quin H.A High-Efficiency Grid-Tie Battery Energy Storage System. URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/10919/29008/1/Qian_H_D_2011_Revised4.pdf (accessed at 30.03.2026)

17. Akbar F., Khan U.A., Khan A.A., Ahmed H.F., Elkhateb A., Cha H., Park J.-W. Dual-Buck Three-Switch Leg Converters With Reduced Number of Passive Components. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. Vol. 37. No 11. Pp. 13484–13498. DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3183834.

18. Guo S., Huang A.Q. Control and analysis of the high efficiency split phase PWM inverter. *IEEE Applied Power Electronics* Conference and Exposition (*APEC*), Fort Worth, TX, USA, 16-20 March 2014. Pp. 2415–2420. DOI: https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803641.

19. Salmon J., Ewanchuk J., Knight A. PWM Inverters Using Split-Wound Coupled Inductors. *IEEE Industry Applications Society Annual* Meeting, Edmonton, AB, Canada, 05-09 October 2008. Pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.299.

20. Gu B., Dominic J., Chen B., Lai J.-S. A high-efficiency single-phase bidirectional AC-DC converter with miniminized common mode voltages for battery energy storage systems. *IEEE Energy Conversion* Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 15-19 September 2013. Pp. 5145–5149. DOI: https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6647396.

21. Martynov D.V, Rudenko Yu.V., Martynov V.V. Study of a bidirectional converter using an asymmetric inverter with a magnetically coupled two-winding inductor in an energy storage system. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2025. No 3. Pp. 15–21. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.03.015. (Ukr)

22. Martynov D.V., Rudenko Yu.V., Martynov V.V. Improving the operation of an asymmetric inverter with magnetically coupled inductors for energy storage systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No 4. Pp. 53–58. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.07.

23. Zhang Y., Chen Y., Wei L., Jiang J. Asymmetric Full Bridge Bidirectional DC-AC Converter Based on V2G Platform. IEEE 2nd China International Youth Conference on *Electrical Engineering* (*CIYCEE*), Chengdu, China. 2021. Pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/CIYCEE53554.2021.9676941.

24. Rudenko Yu.V., Shcherba A.A. Analysis of multi-interval processes in semiconductor converters. Kyiv: Pro Format, 2020. 352 p. (Ukr)

A BIDIRECTIONAL DC-AC CONVERTER BASED ON AN ASYMMETRIC INVERTER FOR HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEMS

D.V. Martynov, **Yu.V. Rudenko**, **V.V. Martynov**
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: d.martynov@electrotechimpulse.com.

This paper presents the analysis of electromagnetic processes in a bidirectional DC–AC converter based on an asymmetric inverter with magnetically coupled inductors, as well as the determination of its parameters aimed at improving energy efficiency. The study is based on the state-space averaging method and simulation modelling techniques. As a result, analytical expressions for calculating currents in the asymmetric inverter with magnetically coupled inductors during switching intervals are derived. The relationship between the inductances of the inductors and the parameters of the input and output power sources is established, under which circulating currents in the inverter circuits are eliminated, resulting in reduced static power losses in the converter. In this research, new analytical and graphical relationships are obtained for the operation of a bidirectional DC–AC converter in active and reactive power transfer modes, thereby extending previous models of asymmetric DC–DC converters. The derived relationships enable improved converter efficiency at the design stage by minimizing power losses caused by circulating currents through optimal parameter selection. References 24, figures 8.

Keywords: energy storage systems, bidirectional DC-AC converter, asymmetric inverter topology, highly dynamic bidirectional power conversion, hybrid electric vehicle.

Надійшла 22.04.2026
Прийнята 26.05.2026