

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Косенко Роман Анатолійович



УДК 621.314

СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ
З ДВОНАПРАВЛЕНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ З М'ЯКОЮ КОМУТАЦІЄЮ

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Чернігів – 2019

Дисертаційна робота є рукописом.

Робота виконана на кафедрі біомедичних радіоелектронних апаратів та систем в Чернігівському національному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Велігорський Олександр Анатолійович,
Чернігівський національний технологічний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри біомедичних радіоелектронних
апаратів та систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, ст. науковий співробітник
Юрченко Олег Миколайович,
Інститут електродинаміки НАН України,
завідувач відділу транзисторних перетворювачів

кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Олександр Федорович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової
електроніки

Захист відбудеться "31" травня 2019 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 79.051.03 в Чернігівському національному технологічному університеті МОН України за адресою: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, ауд. 244. Тел.: +38(0462) 665-103.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Чернігівського національного технологічного університету за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий "30" квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Р.В. Заровський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна електрична система в більшості країн світу є централізованою, де електрична енергія виробляється на електростанціях великої потужності, після чого по розподільчим електричним мережам передається до споживачів. В той же час, одним з безсумнівних трендів сучасності є поступовий перехід від виробництва електричної енергії з викопних джерел на відновлювальні. Хоча станом на даний момент біля 55% електроенергії в Україні виробляється на атомних, 29% – на теплових, 6% – на гідроелектростанціях, доля енергії з сонячних та вітроелектростанцій постійно зростає. Відновлювальні джерела, зокрема, фотовольтаїка, можуть бути додані до енергетичної системи на різних рівнях – як у вигляді потужних електростанцій, які замінюють існуючі станції, так і у вигляді будинкових або локальних електрогенеруючих установок. Слід відмітити також норми ЄС, зокрема, 2010/31/EU, які запроваджують нові вимоги до всіх новобудов, які повинні стати «будівлями з майже нульовим балансом енергії», де більшість енергії, що споживається будинком на протязі року, вироблятиметься з відновлювальних джерел енергії, в самому будинку, або поблизу нього, а будівлі повинні балансувати своє енергоспоживання з виробництвом енергії та виконувати функції керування попитом. Все це призводить до поступової зміни централізованої системи електропостачання на розподілену, яка складатиметься з множини локальних генеруючих об'єктів, ліній передачі та пристроїв для зберігання енергії.

Як результат, на ринку з'являються нові силові пристрої, які забезпечують інтерфейс між накопичувачами енергії та джерелами енергії і споживачами за рахунок двонаправленої передачі енергії, на даний момент серед них найбільш розповсюдженою є повномостова топологія, яка для забезпечення двонаправленого керованого потоку енергії має велику кількість двоквадрантних силових ключів, що впливає на вартість та коефіцієнт корисної дії (ККД).

Дослідженню систем живлення на базі двонаправлених перетворювачів електричної енергії для інтеграції з накопичувачами енергії на базі акумуляторних батарей (АКБ) займаються такі відомі українські фахівці у галузі силової електроніки, як Жуйков В.Я., Юрченко О.М., Петергеря Ю.С., та ін. Значна увага подібним системам приділялась закордонними науковцями – Блабджергом Ф., Коларом, Вінніковим Д., та ін. Ними визначені основні схемні рішення, розрахункові співвідношення та обмеження найбільш розповсюджених повномостових схем, в той же час, нові топології зі зменшеною кількістю силових напівпровідників в двонаправлених схемах на даний момент ще не до кінця визначені. Крім того, на даний момент не існує узагальненого методу вибору топології двонаправленого напівпровідникового перетворювача для роботи у складі розподіленої системи з накопичувачами енергії.

Досягнення високого ККД можливе за рахунок мінімізації всіх видів втрат у компонентах системи – статичних та динамічних втрат у напівпровідникових ключах, втрат у індуктивних компонентах, омичних втрат у провідниках, тощо. Одним з шляхів зменшення динамічних втрат є забезпечення так званої м'якої комутації, за якою силові напівпровідники перемикаються лише в той момент, коли напруга (перемикання при нульовій напрузі, ПНН) або струм (перемикання при

нульовому струмі, ПНС) впаде до нуля. Дослідженню режимів м'якої комутації силових ключів присвячені роботи українських вчених, зокрема – Денисова Ю.О., а також закордонних – Віннікова Д., Чуба А. Ними визначені особливості систем керування та умови забезпечення м'якої комутації для різних типів перетворювачів. В той же час, невирішеними залишаються питання забезпечення м'якої комутації всіх силових ключів у складі системи живлення, що дасть змогу суттєво зменшити динамічні втрати. Всі ці питання потребують глибокого дослідження.

Таким чином, враховуючи роль, яку в сучасному світі відіграють відновлювальні джерела енергії, та розподілені системи електроживлення зі зберіганням енергії в АКБ, дослідження, спрямовані на підвищення ККД складових таких систем, є пріоритетними, а науково-прикладне завдання, яке полягає у розробці систем електроживлення локальних об'єктів на базі високоефективних двонаправлених перетворювачів електроенергії зі зберіганням електроенергії в АКБ, є актуальним. Враховуючи вартість сучасних напівпровідникових силових ключів, практично важливими також є роботи, направлені на зменшення кількості силових ключів у схемах електроживлення, без погіршення їх технічних характеристик. Реалізація та впровадження результатів таких досліджень в розподілені системи електроживлення локальних об'єктів дозволить підвищити ефективність та надійність електроживлення таких систем, а також зменшити їх вартість.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Чернігівському національному технологічному університеті за пріоритетним напрямом розвитку науки та техніки України «Енергетика та енергоефективність» в рамках науково-дослідної роботи «Портативні високоефективні фотоелектричні джерела живлення для військових застосувань» №0116U004695 у відповідності до рішення науково-експертної ради МОН України, Накази Міністерства освіти і науки України №153 від 24.02.2016 р. та №158 від 25.02.2016. Крім того, за темою дисертаційної роботи автор приймав участь у закордонних грантах SF0140016s11 Міністерства освіти і досліджень Естонії (синтез нових топологій перетворювачів силової електроніки та вдосконалених методів керування для електричних розподільчих мереж), PUT744 «Нове сімейство гальванічно-ізолюваних перетворювачів постійного струму» та PUT1680 «Системи енергоменеджменту на базі силової електроніки для будівель з нульовим споживанням енергії» від Естонської дослідницької ради.

Мета та задачі досліджень. Мета дисертаційного дослідження полягає у підвищенні енергоефективності розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з АКБ за рахунок розробки високоефективних двонаправлених гальванічно ізолюваних перетворювачів напруги.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення такого комплексу задач:

- аналіз існуючих підходів до побудови розподілених систем електроживлення локальних об'єктів на базі перетворювачів постійної напруги, що живляться струмом та мають режим м'якої комутації;
- синтез нових чотириквadrантних повномостових топологій перетворювачів напруги з фазовою модуляцією, які матимуть меншу кількість силових ключів;
- розробка аналітичних моделей електромагнітних процесів у системах електроживлення локальних об'єктів з запропонованими новими чотириквadrантними

повномостовими перетворювачами напруги з фазовою модуляцією та зменшеною кількістю силових ключів;

- розробка методу оцінки перетворювачів постійного струму з м'якою комутацією для розподілених систем живлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторах;

- експериментальна перевірка запропонованих рішень щодо побудови розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторах з новими чотириквADRантними повномостовими топологіями перетворювачів напруги з фазовою модуляцією та зменшеною кількістю силових ключів.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в системах електроживлення локальних об'єктів зі зберіганням електроенергії в акумуляторних батареях.

Предметом досліджень є топології, моделі та методи регулювання та оцінювання перетворювачів напруги в системах живлення з функцією зберігання енергії в акумуляторах.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в дисертації задач використовувались фундаментальні положення теорії електричних кіл, математичне та фізичне моделювання для розрахунків електромагнітних процесів, фізичний експеримент для експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів.

Математичний аналіз проводився на основі методу усереднення, з використанням вольт-секундного балансу в індукторах та балансу заряду в конденсаторах. Отримані за результатами аналітичних розрахунків результати порівнювались з результатами комп'ютерного моделювання та фізичного експерименту. Математичне моделювання процесів у системі електроживлення локальних об'єктів проводилось з використанням програм MATLAB, Mathcad та PSIM, а також на мові програмування Python; розробка схем та друкованих плат експериментальних зразків системи – Altium Designer; програмного забезпечення для системи керування – Keil uVision. Для отримання даних з цифрових вимірювальних пристроїв використовувалося комп'ютерне програмне забезпечення від його виробників.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано три нові топології гальванічно ізольованих двонаправлених перетворювачів постійної напруги для розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторних батареях, які, на відміну від існуючих, мають зменшену кількість силових напівпровідникових ключів, що дозволяє зменшити вартість та підвищити ККД таких систем;

- набули подальшого розвитку аналітичні моделі електромагнітних процесів систем електроживлення локальних об'єктів, які, на відміну від існуючих, враховують особливості запропонованих нових гальванічно ізольованих двонаправлених перетворювачів постійної напруги, що дозволило встановити зони, в яких забезпечується м'яка комутація всіх силових ключів перетворювачів;

- удосконалено метод оцінки двонаправлених перетворювачів напруги у складі розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з акумуляторними системами зберігання енергії, який, на відміну від існуючих, дозволяє провести

оцінку перетворювача у всьому діапазоні його робочих режимів на основі трьох нормованих величин, що дозволяє сформулювати пропозиції щодо вибору більш ефективної топології перетворювача.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблені експериментальні зразки розподіленої системи електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторах дозволили зменшити кількість силових ключів та збільшити енергоефективність, що знижує собівартість розподілених систем електроживлення локальних об'єктів;

– розроблено три експериментальні зразки розподіленої системи електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторах з двонаправленими перетворювачами напруги з фазовою модуляцією на базі повномостової топології та нових запропонованих асиметричної та двотактної двоіндукторної топологій зі зменшеною кількістю силових ключів;

– розроблено програмне забезпечення для мікроконтролерної системи керування, яке використовується в експериментальних зразках розподіленої системи електроживлення локальних об'єктів;

– встановлено, що запропонована система електроживлення на базі двотактної топології з двома індукторами та зменшеною кількістю силових ключів має вищі значення ККД у порівнянні з базовою системою на основі повномостового перетворювача для режимів розряду та заряду акумулятора в діапазоні потужностей, близьких до номінального рівня, і менші, в режимі малих потужностей.

– отримані результати в частині програмного забезпечення для мікроконтролерної системи керування та запропонованої топології двонаправленого перетворювача впроваджено на ПАТ «ЧЕЗАР», а також в навчальний процес при проведенні лекційних та лабораторних заняттях з курсів "Мікропроцесорні системи" та "Джерела живлення РЕА" на кафедрі біомедичних радіоелектронних апаратів та систем Чернігівського національного технологічного університету.

Особистий вклад здобувача. Наукові положення та результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. У матеріалах досліджень, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі результати: розробка прототипу перетворювача та системи керування для нього, проведення експериментальних досліджень [1,2]; розробка інструментарію для оцінки топологій та проведення моделювання [3]; математичні розрахунки та огляд літературних джерел [4]; розробка та застосування методу для оцінки гальванічно-ізолюваних двонаправлених перетворювачів для фотоелектричних систем [5]; розробка моделі та моделювання перетворювачів, огляд літератури [6]; синтез алгоритму керування, розробка імітаційних моделей [7]; огляд джерел, синтез та імітаційне моделювання нової топології перетворювача [8]; синтез нової топології перетворювача [9]; синтез топології перетворювача та закону модуляції, розробка прототипу та експериментальне дослідження [10-13], синтез алгоритму керування перетворювачем, розробка імітаційних моделей [14]; моделювання пристрою [15].

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: міжнародній науково-технічній конференції «IEEE 5th Int. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives» (Рига, Латвія, 2015); міжнародній

науково-технічній конференції «IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering») (Київ, 2017); міжнародній науково-технічній конференції «42nd Annual Conf. of the Industrial Electronics Society» (Флоренція, Італія, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Doctoral Conf. on Computing, Electrical and Industrial Systems», (Лісабон, Португалія, 2017); на наукових семінарах НАН України «Методи та засоби керування якістю енергетичних і динамічних характеристик напівпровідникових перетворювачів» в Чернігівському національному технологічному університеті (Чернігів, 2014-2015pp.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт, в тому числі 6 статей у виданнях, внесених до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 8 тез у матеріалах міжнародних конференцій, внесених до наукометричних баз Scopus або Web of Science, 1 деклараційний патент України на корисну модель.

Структура і об'єм роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 125 найменувань та 6 додатків. Загальний об'єм роботи складає 165 сторінок, в тому числі 135 сторінка основного змісту, 71 рисунок, 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, сформована мета та задачі досліджень, відображено наукову новизну, практичне значення і реалізацію результатів дисертаційних досліджень, приведені дані про апробацію результатів роботи та публікації.

У першому розділі проведено аналіз структур сучасних розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в АКБ. Такі системи складаються з двонаправлених напівпровідникових перетворювачів, що підключені до акумуляторних батарей, однонаправлених перетворювачів, підключених до фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) або інших низьковольтних джерел постійного струму, високовольтної ланки постійного струму, мережевого інвертору та навантажень, підключених до централізованої мережі змінного струму. За результатами огляду встановлено, що АКБ на основі LiFePO_4 у порівнянні з іншими типами є більш безпечними, мають значну кількість циклів заряд-розряд та кращу температуру стабільність, що обумовлює їх доцільність використання в якості накопичувачів енергії для систем електроживлення локальних об'єктів.

Проаналізувавши основні наукові публікації за напрямом досліджень, встановлено, що для низьковольтних високострумівих джерел електричної енергії, таких як АКБ або паливні елементи, гальванічно ізольовані перетворювачі постійної напруги, що живляться струмом (ЖС), є кращими у порівнянні з аналогами, що живляться напругою (ЖН), м'яка комутація силових ключів дозволяє суттєво знизити динамічні втрати потужності в перетворювачах, а використання високочастотного трансформатора, який підвищує напругу, дозволяє зменшити напругу на силових ключах, що важливо з точки зору забезпечення надійності.

За результатами огляду методів обмеження напруги на індукторах перетворювачів ЖС, було сформовано їх класифікацію. Встановлено, що для обмеження можуть використовуватись снаберні кола, резонансні обмежувачі напруги, або ж перетворювачі з широтно- (ШІМ) або фазо-імпульсною модуляцією

(ФІМ) на стороні навантаження. Методи засновані на снаберних колах не можуть забезпечити обмеження напруги на індукторі в широкому діапазоні роботи та мають значні перетікання електричної енергії та втрати потужності. Резонансні обмежувачі напруги мають обмежений діапазон регулювання, який залежить від схемотехніки резонансного кола. Перетворювачі з ШІМ на стороні навантаження мають мінімальну кількість активних напівпровідникових компонентів і дозволяють одночасно обмежувати напругу і забезпечувати режим м'якої комутації без допоміжних кіл, але, піковий струм силових ключів на стороні ЖС залишається однаковим на всіх рівнях вихідної потужності, що призводить до значного падіння ефективності при роботі в режимі низької потужності. Перетворювачі напруги з ФІМ на стороні навантаження дозволяють забезпечити обмеження напруги на індукторі, та м'яку комутацію силових ключів у вхідній та вихідній частинах в широкому робочому діапазоні з простим керуванням. Однак, такі перетворювачі мають значну кількість силових ключів у випадку двонаправленої передачі енергії.

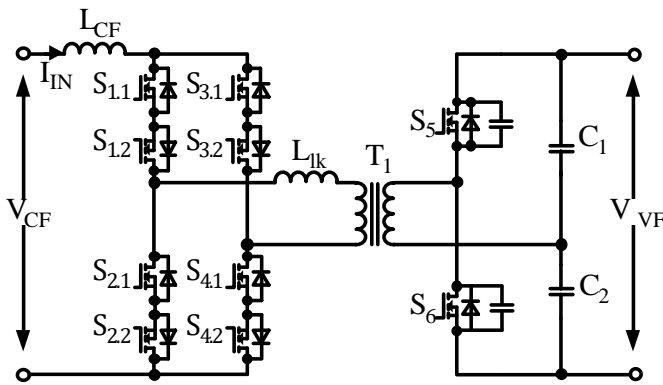


Рис. 1 Повномостовий двонаправлений перетворювач напруги з ФІМ зі сторони навантаження

В другому розділі проведено аналітичний аналіз та запропоновано нові топології гальванічно ізольованих двонаправлених перетворювачів ЖС з м'якою комутацією для використання у складі систем електроживлення локальних об'єктів.

Враховуючи особливості методів обмеження напруги на індукторах, повномостова топологія з модуляцією на стороні навантаження була обрана в якості базової топології для розробки нових топологій перетворювачів з ФІМ

(рис. 1). Для цього та всіх інших запропонованих двонаправлених перетворювачів було розроблено математичні моделі в режимах передачі енергії від порту ЖС в бік порту ЖН та у зворотному напрямку, при допущенні що всі компоненти не мають втрат, а індуктивність намагнічування трансформатора не впливає на роботу схеми. Роботу перетворювача було проаналізовано на окремих інтервалах протягом періоду роботи схеми та встановлено граничні інтервали модуляції, при яких забезпечується м'яка комутація всіх силових транзисторів з боку портів ЖС та ЖН. По отриманих аналітичних виразах було побудовано залежності коефіцієнту передачі по нарузі повномостового перетворювача (рис. 2) для режимів передачі енергії з боку порту ЖС до порту ЖН і навпаки, які визначаються тривалістю інтервалів на періоді роботи перетворювача D_{rev} – фазовим зсувом між портами ЖС та ЖН та D_s – тривалістю стану наскрізних струмів.

По отриманих аналітичних формулах було побудовано характеристику умов забезпечення м'якої комутації всіх силових ключів перетворювача (для $V_{CF} = 24$ В, $V_{VF} = 400$ В, $C_s = 270$ пФ, $N = 6$, $L_{Lkeqs} = 25$ мкГн, $f_{sw} = 100$ кГц), яка пов'язує потужність навантаження, напругу на порті ЖС та тривалості сигналів керування силовими ключами портів ЖН D_{VF} та ЖС D_{CF} , відповідно.

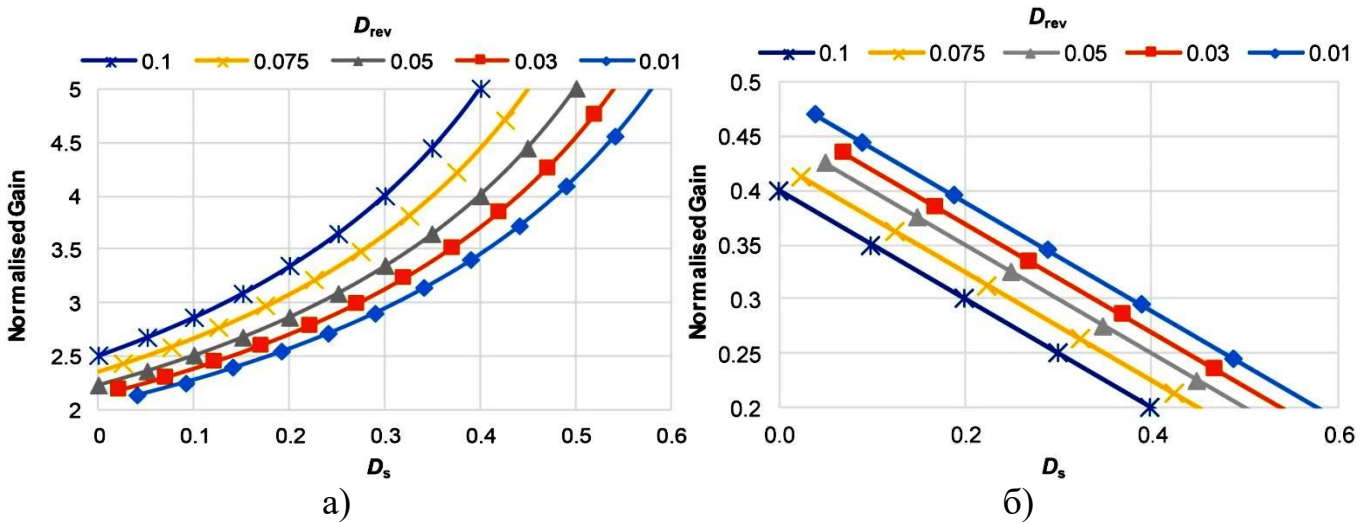


Рис. 2 Аналітичний коефіцієнт підсилення повномостового двонаправленого перетворювача напруги при передачі енергії від порту ЖС (а), від порту ЖН (б)

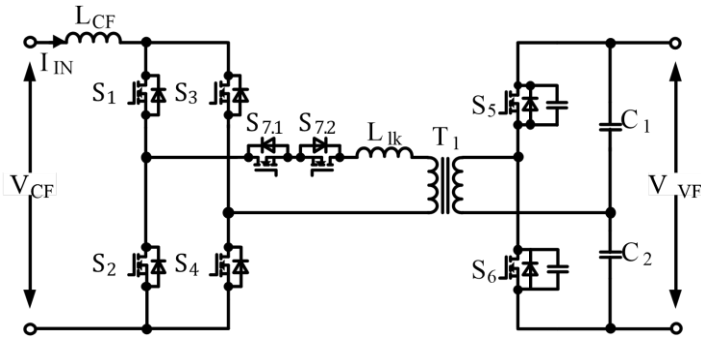


Рис. 3 Топологія двонаправленого ППН з допоміжним силовим ключем

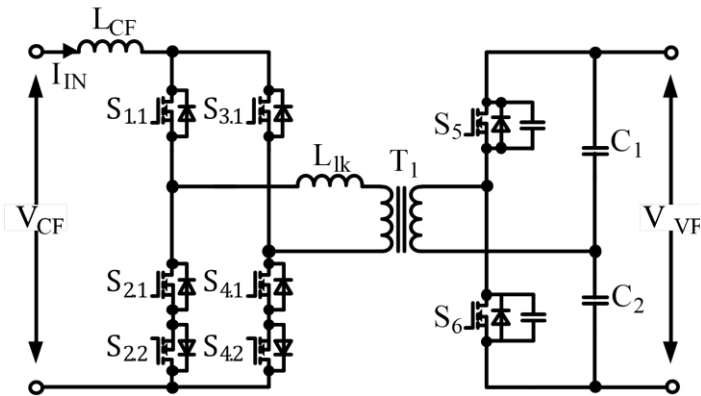


Рис. 4 Топологія асиметричного двонаправленого ППН

Для зменшення числа силових ключів у порті ЖС схеми, було запропоновано нову топологію з допоміжним активним силовим ключем (рис. 3). Аналітичний коефіцієнт передачі по напрузі такої схеми:

$$G_{CF-VF} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{2}{1 - (2t_c + 2t_d + 2t_e)/T_{SW}}, \quad (1)$$

де t_c , t_d , t_e – тривалість інтервалів наскрізного струму в порту ЖС перетворювача, відновлення зворотної провідності $S_{2,2}$ та включення транзисторів S_2 та S_3 , відповідно; T_{SW} – період роботи перетворювача, N_p та N_s – кількість витків первинної та вторинної обмоток. Ця топологія має меншу кількість силових ключів, однак має обмеження в керуванні, так як в ній відсутній додатковий інтервал безпеки. Без можливості регулювати цей інтервал діапазон м'якої

комутації буде меншим, у порівнянні з базовою топологією, через збільшення часу перезарядження паразитних ємностей транзисторів з боку порту ЖН при низькому вхідному струмі.

Інша запропонована топологія – *асиметричний двонаправлений* перетворювач з ФІМ (рис. 4), додає перевагу узгодження швидкості перезаряджання ємності C_{eq} транзисторів з боку порту ЖН до топології з ФІМ зі сторони навантаження, яка раніше була доступна тільки в перетворювачах з ШІМ на стороні навантаження.

Аналітичний коефіцієнт передачі:

$$G_{CF-VF} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{2}{1 - (t_{2-3} + t_{1-6(\min)})/T_{sw}}, \quad (2)$$

де t_{2-3} та $t_{1-6(\min)}$ – тривалість інтервалів роботи перетворювача. Використання двох двоквadrантних силових ключів та запропонованого методу модуляції дозволило розширити діапазон м'якої комутації до нульової вихідної потужності при зменшеній кількості силових ключів.

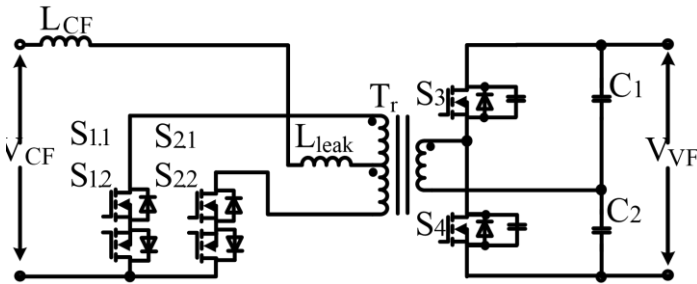


Рис. 5 Топологія одноіндукторного двотактного ППН з МСН

Одноіндукторний двотактний перетворювач з модуляцією на стороні навантаження (рис. 5) має ще менше силових ключів, а відповідно, меншу вартість та втрати. Однак, має й певні недоліки – три обмотки ВЧ-трансформатора, вдвічі більші перенапруження на ключах порту ЖС та підвищена циркуляція енергії при високих значеннях коефіцієнту передачі схеми. Коефіцієнт передачі схеми:

$$G_{CF-VF} = \frac{V_{VF}}{2nV_{CF}} = \frac{1}{1 - 2 \cdot D_{rev}}, \quad (3)$$

де n – коефіцієнт передачі ВЧ-трансформатора, D_{rev} – шпаруватість інтервалу зворотної передачі енергії.

Ще одна запропонована топологія з малою кількістю ключів – двотактна топологія з двома індукторами (рис. 6), має низку переваг, зокрема, внаслідок особливої конфігурації інтервалів перемикання, струми через індуктори досягають свого пікового значення зі зміщенням фази на 180 градусів, за рахунок чого ППН ніколи не працює в режимі розривної провідності. Коефіцієнт передачі схеми, розрахований аналітично, складає:

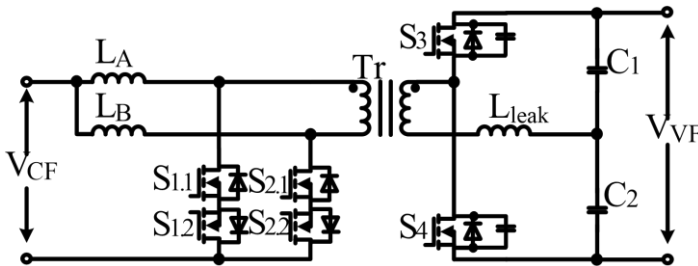


Рис. 6 Топологія двоіндукторного двотактного ППН з МСН

В той же час, така топологія у порівнянні з базовою має вдвічі більші перенапруження на ключах порту ЖС, додатковий індуктор та підвищену циркуляція енергії, що є недоліками схеми.

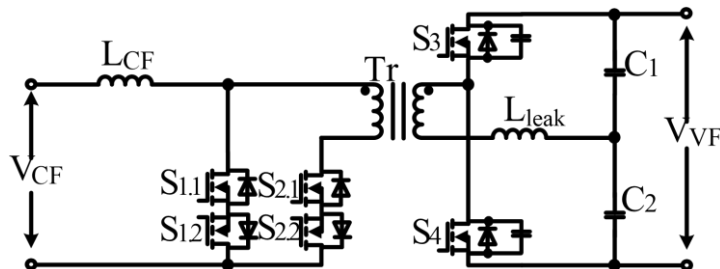


Рис. 7 Топологія зворотноходового двонаправленого ППН з модуляцією на стороні навантаження

Запропонований зворотноходовий двонаправлений перетворювач (рис. 7),

теж має мінімальну кількість силових ключів, але, має лише один індуктор. Слід відмітити, що пульсації вхідного струму будуть вдвічі вищими за амплітудою та нижчими за частотою, ніж для двоіндукторної топології, що призводитиме до більших габаритів індуктора. Аналітично отримана залежність коефіцієнту передачі топології аналогічна до (4).

В третьому розділі проведено експериментальні дослідження прототипів системи електроживлення локальних об'єктів на базі запропонованих двонаправлених гальванічно-ізолюваних перетворювачів (параметри в табл. 1), в якій у якості елемента для зберігання енергії використовується 8-

Таблиця 1. Робочі параметри експериментального прототипу

Параметр	Символ	Значення
Номінальна потужність, Вт	P	500
Вхідна напруга, В	V_{CF}	20-30
Напруга ланки постійного струму, В	V_{DC}	400
Робоча частота ланки dc-dc, кГц	f_{sw}	50
Робоча частота ланки dc-ac, кГц	f_{sw}	20
Коефіцієнт передачі трансформатора	N	33/6

комірчаста АКБ $LiFePO_4$ (LFP), ланка постійного струму має напругу 400 В, до якої підключено мережевий інвертор напруги. Система призначена для покриття всього діапазону

робочої напруги батареї в режимах заряду та розряду (в діапазоні 20-30 В для АКБ марки B24050, ємністю 50 А·год та номінальною робочою напругою 25.6 В). Електрична схема системи показана на рис. 8, вона складається з двох двонаправлених перетворювачів, з'єднаних з проміжною ланкою постійного струму. Перший – перетворювач ЖС з м'якою комутацією силових ключів, побудований за базовою або за однією з запропонованих у другому розділі топологій, другий – мережевий інвертор.

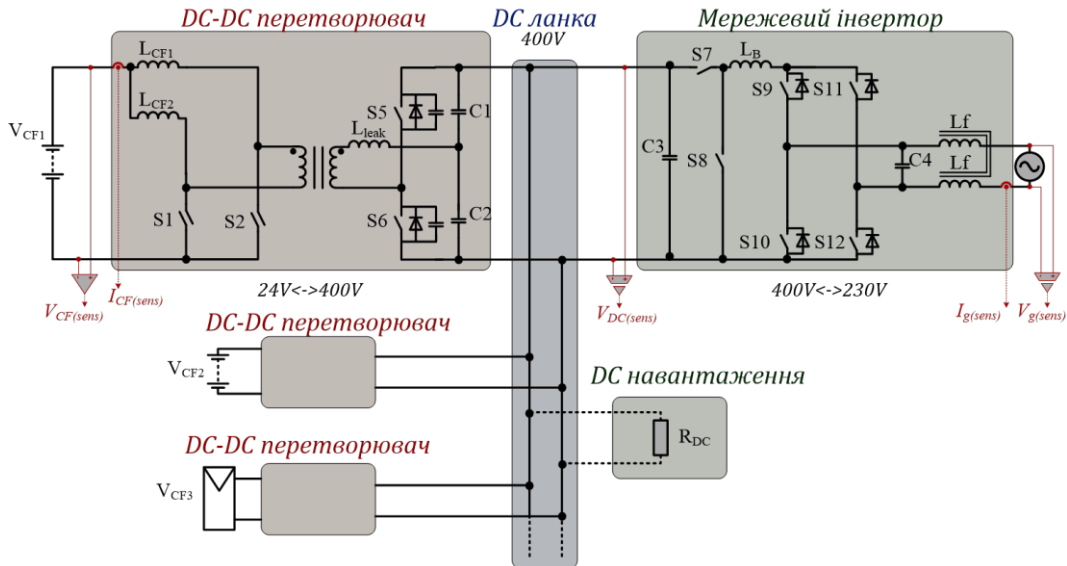


Рис. 8 Електрична схема двоступеневої системи електроживлення локальних об'єктів з двонаправленим повномостовим перетворювачем

Схема керування експериментальною системою електроживлення локальних об'єктів побудована на мікроконтролері STM32F334R8T6, який керує всіма силовими ключами як dc-dc так і dc-ac перетворювачів. Система керування інвертора з боку мережі включає універсальний інтегратор першого порядку (УІПП)

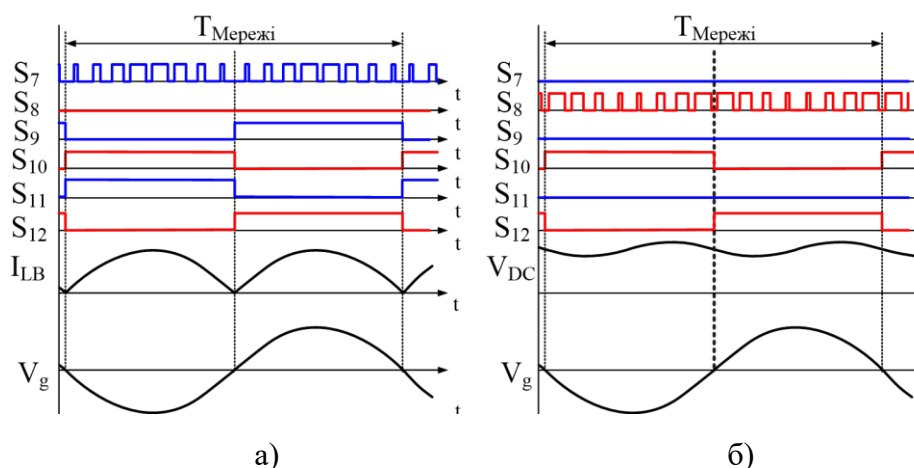


Рис. 9 Часові діаграми роботи системи електроживлення з двонаправленим повномостовим перетворювачем для режимів розряду (а), заряду (б)

для генерації вихідної напруги, синхронної до напруги мережі.

Пропорційно-резонансний регулятор (ПР) регулює вихідну напругу перетворювача для досягнення вихідного струму з низьким рівнем гармонічних спотворень. Пропорційно-інтегральні регулятори (ПІ) використовуються як базові регулятори в колах

зворотного зв'язку для керування dc-dc перетворювачем напруги та мережевим інвертором. В режимі заряду блок УППІ керує інвертором з боку мережі, тобто, діє як керований синхронний випрямляч з підсиленням напруги.

Послідовність керування інвертором з боку мережі в режимі розряду показана на рис. 9а. Синусоїдальну модуляцію здійснюють за допомогою силового ключа S7. Ключі S9-S12 діють як розгортаючі, змінюючи полярність вихідної напруги двічі на періоді мережі. При такому підході тільки один силовий ключ працює на високій частоті (20 кГц), а всі інші перемикаються з частотою мережі. Це мінімізує динамічні втрати в силових ключах та збільшує загальну ефективність системи. Часові діаграми в режимі заряду показані на рис. 9б, у цьому режимі мережевий інвертор працює як керований випрямляч, а силовий ключ S7 вимкнено. Перемикачі S10 і S12 працюють як синхронний випрямляч відповідно до фазового кута напруги мережі, розрахованого за алгоритмом універсальної інтеграції першого порядку. Ключ S8 модулюється контролером коректору коефіцієнту потужності для забезпечення додаткового підвищення для отримання напруги мережі 400 В.

Всі експерименти були проведені з використанням осцилографа Tektronix MSO4034B, струмових пробників РЕМ CWTUM / 015/R, струмового зонда Tektronix TCP0030A, датчиків напруги Tektronix P5205A. ККД вимірювався при живленні з джерел Elektro-Automatik EA-PSI 9080-60 і TDK-Lambda GEN600-5.5 аналізатором потужності YOKOGAWA WT1800. Фото експериментального прототипу системи електроживлення (на прикладі двотактної топології з двома індукторами) показано на рис. 10, а часові діаграми включення транзисторів при ПНС на рис. 11. Керування забезпечувало м'яку комутацію силових транзисторів в діапазоні 50-500 Вт вхідної потужності і 20-30 В на стороні порту ЖС, за розрахованими в попередньому розділі значеннями $D_{VF} = 0.47$ і $D_{CF} = 0.516$.

Діапазон м'якої комутації та робочого режиму перетворювача (БТ – базова топологія) показано на рис. 12. Робочий режим показано як заштрихований прямокутник, в ньому м'яка комутація всіх силових ключів забезпечується при всіх співвідношеннях напруги АКБ та потужності. Аналогічні дослідження проведено для системи зберігання енергії на базі АКБ з повномостовим асиметричним

перетворювачем (АП), та з перетворювачем на базі двотактної топології з двома індукторами (ДТДІ). Для кожного з прототипів було визначено ККД в режимах заряду та розряду, при зміні потужності та напруги на АКБ, результати показано в таблиці 2. Як видно, для низьких напруг найвищий ККД для більшості потужностей має система на базі ДТДІ, що особливо помітно при великих потужностях, де мінімальний ККД при $P=500$ Вт складає 94.3%, що на 1.3% більше базової системи. В той же час, в діапазоні малих потужностей базова система має перевагу, забезпечуючи ККД до 96.8%. Система на базі АП програє двом іншим. В той же час, слід відмітити вищі рівні ККД для всіх розглянутих систем при $V_{cf}=25$ В, зокрема, максимальний ККД для режиму роботу перетворювача в режимі розряду досягає 97.2% для базової схеми, 96.7% для системи з двотактною топологією з двома індукторами, та 95.4% для системи з асиметричною повномостовою топологією, у порівнянні з 96.7%, 96.1% та 94.4% для напруги 20 В, відповідно. В режимі заряду (позитивна потужність) залежність зберігається, але абсолютні значення ККД нижчі.

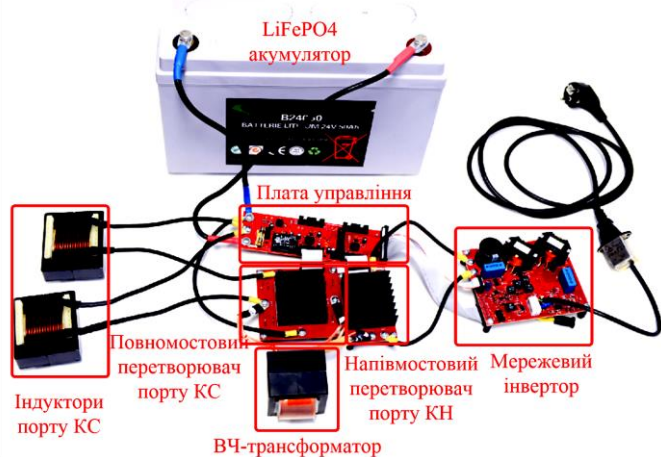


Рис. 10 Експериментальний прототип системи живлення на базі АКБ з двотактною топологією з двома індукторами

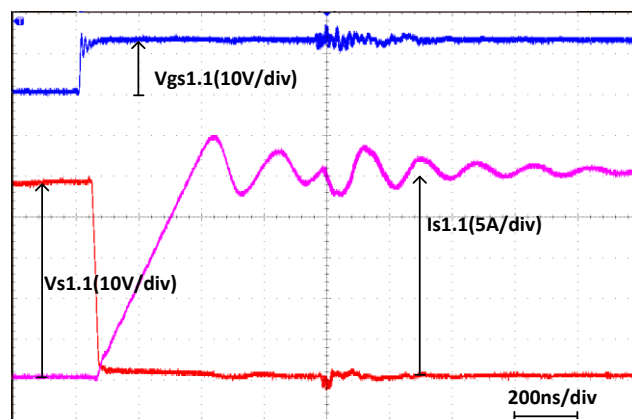
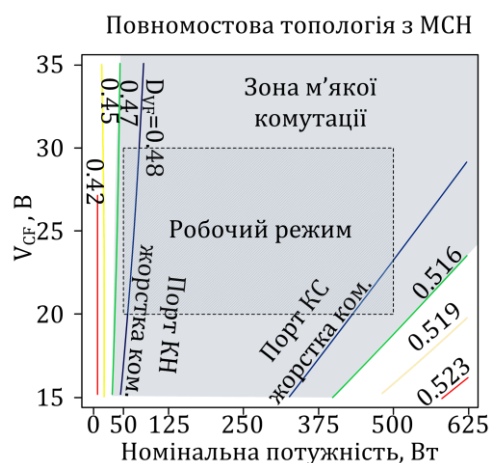


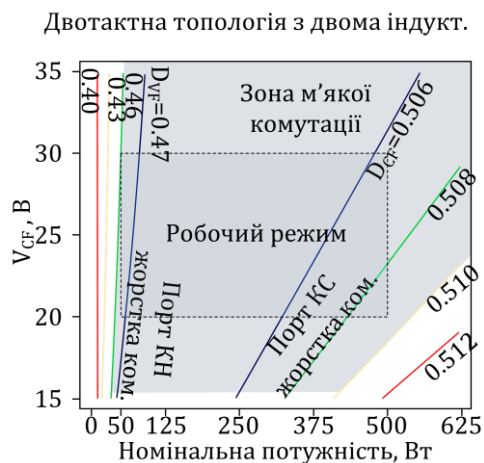
Рис. 11 Часові діаграми включення транзистора S1 для $V_{CF} = 20$ В, $P_{CF} = 500$ Вт

Таблиця 2. ККД експериментальних прототипів двонаправлених перетворювачів

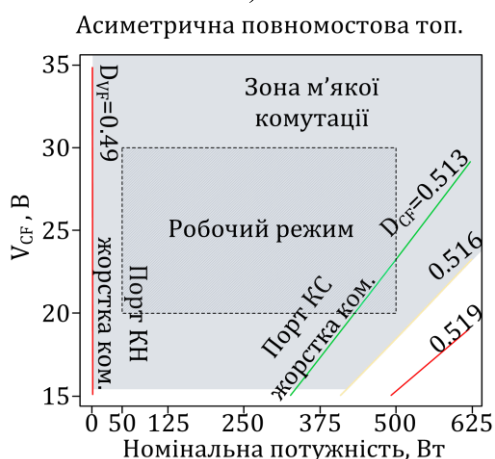
$P_{in}, \%$	$P_{in}, \text{Вт}$	$V_{cf}, \text{В}$								
		20			25			30		
		БТ ККД, %	АП ККД, %	ДТДІ ККД, %	БТ ККД, %	АП ККД, %	ДТДІ ККД, %	БТ ККД, %	АП ККД, %	ДТДІ ККД, %
-100	-500	92.9	91.7	94.30	94.6	94.3	95.90	95.6	95.4	96.30
-70	-350	94.3	93.4	95.30	95.4	95.3	96.50	96.7	95.8	96.40
-40	-200	96.2	94.4	96.10	97.0	95.4	96.70	97.6	95.7	96.20
-25	-125	96.7	93.7	95.70	97.2	94.2	96.10	97.4	94.4	95.10
-10	-50	95.2	87.8	93.00	96.1	88.0	92.70	96.0	87.9	90.00
10	50	94.2	90.5	92.98	94.6	91.0	91.00	94.9	90.6	86.60
25	125	95.7	94.3	96.15	96.4	95.0	95.70	96.7	95.3	94.44
40	200	95.6	94.9	96.20	96.7	95.8	96.30	97.1	96.0	96.30
70	350	94.4	93.2	95.40	96.0	95.1	96.20	96.6	95.8	96.40
100	500	92.9	91.2	94.30	94.7	93.9	95.32	95.9	95.0	96.00



а)



б)



в)

Рис. 12 Діапазони м'якої комутації експериментальних прототипів

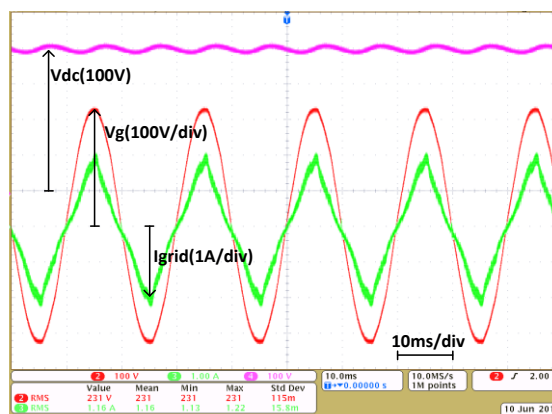


Рис. 13 Форми сигналів вихідного струму і напруги та напруги в ланці постійного струму в режимі заряду при $P = 250$ Вт

При великих вхідних напругах в режимі заряду акумулятору система на базі повномостової топології має перевагу в усьому діапазоні потужностей, в той час як система з двотактним перетворювачем з двома індукторами при заряді в діапазоні малих потужностей (до 180 Вт) програє як базовій системі, так і системі на базі

Таблиця 3. ККД мережевого інвертору експериментального прототипу

V_{dc} , В	V_g , В	P_{in} , Вт	Розряд		Заряд	
			Шпар	ККД, %	Шпар	ККД, %
400	230	500	0.830	98.3	0.810	97.7
400		375	0.824	98.6	0.735	97.6
400		250	0.805	98.8	0.401	97.4
400		125	0.685	99.0	0.252	96.1
400		50	0.430	98.5	0.140	93.5

асиметричної повномостової топології. В той же час, в режимі розряду залежності ККД аналогічні до розглянутих вище режимів роботи з напругами 20 та 25 В – максимальний ККД при великих потужностях у системи на базі двотактної топології з двома індукторами, при малих потужностях – у базовій системі, а система з асиметричною повномостовою топологією програє іншим топологіям. Слід відмітити, що в режимі роботи з напругою 30 В максимальні значення ККД кожної з розглянутих систем вищі, ніж при роботі з напругами 20 та 25 В.

Експериментально отримані значення ККД мережевого інвертору експериментального прототипу показані в таблиці 3. Як видно, в режимі розряду

максимальна ефективність досягається при потужності 125 Вт, в той час як для режиму заряду – при максимальній потужності 500 Вт.

В четвертому розділі представлено методи оцінки ефективності систем електроживлення локальних об'єктів, які використано для оцінки запропонованих топологій двонаправлених перетворювачів ЖС, та для оцінки системи електроживлення зі зберіганням енергії в АКБ. Оскільки кожна сфера застосування має свої специфічні вимоги та пріоритети щодо оптимізації, вибір найбільш оптимальної топології для конкретного застосування вимагає проведення порівняння за певними критеріями. В роботі запропоновано метод, який дозволяє оцінювати не тільки повномостові топології, але й інші топології перетворювачів.

Для аналізу були визначені наступні припущення: всі компоненти ідеальні без втрат, пульсаціями вхідного струму індуктора (або пульсаціями напруги на вхідному конденсаторі) і пульсаціями вихідної напруги нехтуємо, індуктивність намагнічування трансформатора – нескінченно велика. Оцінку проводимо з використанням трьох нормованих величин, які представляють параметри навантаження первинного інвертора, високочастотного трансформатора, і вторинного випрямляча:

$$V_{SpN} \cdot I_{SpN} = \frac{\sum_{\text{Switch Primary}} I_{Sp(rms)} \cdot V_{Sp(DC)}}{I_{in} \cdot V_{in}}, \quad V_{TXpN} \cdot I_{TXpN} = \frac{\sum_{\text{Winding Primary}} I_{TXp(rms)} \cdot V_{TXp(DC)}}{I_{in} \cdot V_{in}}, \quad V_{SsN} \cdot I_{SsN} = \frac{\sum_{\text{Switch Secondary}} I_{Ss(rms)} \cdot V_{Ss(DC)}}{I_{out} \cdot V_{out}}.$$

де $I_{Sp(RMS)}$ та $I_{Ss(RMS)}$ – сумарний середньоквадратичний струм в напівпровідникових ключах з боку порту ЖС та ЖН, $V_{Sp(DC)}$ та $V_{Ss(DC)}$ – напруга в усталеному режимі на напівпровідникових ключах з боку порту ЖС та ЖН, I_{in} та I_{out} – вхідний та вихідний струми, V_{in} та V_{out} – вхідна та вихідна напруги, $I_{TXp(RMS)}$ – сумарний первинний струм трансформатора, $V_{TXp(DC)}$ – первинна напруга трансформатора в усталеному режимі.

У запропонованому методі область роботи для конкретного застосування поділяється на робочі напруги та потужності. Такий підхід забезпечує набір точок, які представляють різні умови роботи системи, від мінімальної потужності при максимальній вхідній напрузі до номінальної потужності при найменшій вхідній напрузі (рис. 14). Криві заряду і розряду АКБ показані червоною лінією. У системі зберігання енергії в АКБ зарядка та розрядка акумулятора може виконуватися за будь-

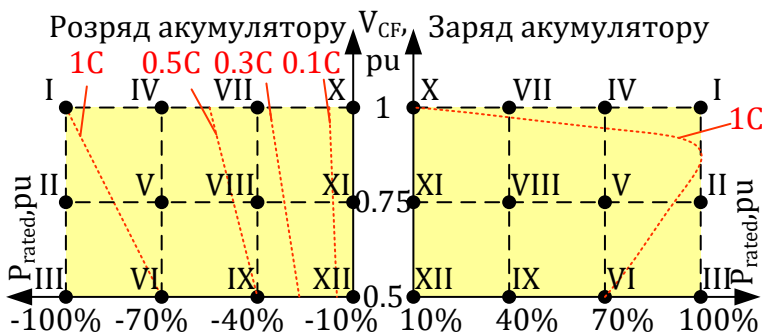


Рис. 14 Робочі точки системи

якої потужності. Для збільшення використання відновлюваної енергії, АКБ буде заряджатися в будь-якому випадку залежно від доступної енергії з ФЕП, і буде розряджатися з максимальною швидкістю для підтримки системи електроживлення, або розряджатися з низькою швидкістю протягом ночі для підтримки побутового обладнання малої потужності. При купівлі та продажу енергії з енергосистеми, і заряд і розряд відбуватимуться з максимальною швидкістю. Для кожної вказаної робочої точки у програмному забезпеченні «PSIM Simulation Software»

якої потужності. Для збільшення використання відновлюваної енергії, АКБ буде заряджатися в будь-якому випадку залежно від доступної енергії з ФЕП, і буде розряджатися з максимальною швидкістю для підтримки системи електроживлення, або розряджатися з низькою швидкістю протягом ночі для підтримки побутового обладнання малої потужності. При купівлі та продажу енергії з енергосистеми, і заряд і розряд відбуватимуться з максимальною швидкістю. Для кожної вказаної робочої точки у програмному забезпеченні «PSIM Simulation Software»

розраховувалися нормовані величини параметрів напруги та струму всіх перетворювачів. Результати представлені у вигляді кругових діаграм для режимів розрядки (прямий) та зарядки акумулятору (зворотний), які показують поведінку схеми у всьому діапазоні робочих умов, топологія, з меншою площею фігури, буде кращою за даним критерієм.

Порівняння сумарних умов навантаження порту ЖС транзисторів показано на рис. 15. Топології з допоміжним активним силовим ключем (AUX-SMC) та асиметрична повномостова топологія (A-SMC) мають перевагу над іншими топологіями в усьому діапазоні, за винятком режиму малої потужності, що пояснюється меншим числом силових ключів.

Аналогічним чином було проаналізовано умови навантаження транзисторів порту ЖН. Повномостова топологія (FB-SMC), топології з допоміжним активним силовим ключем та асиметрична топології мають приблизно однакові значення. З іншого боку, двотактні топології з одним (SiPP-SMC) та двома індукторами (DiPP-SMC) мають вищі умови навантаження транзисторів порту ЖН з-за використання реактивної енергії, що помітно для малої потужності.

Аналіз умов навантаження трансформатора говорить про те, що асиметрична повномостова топологія має вищі умови навантаження трансформатора, ніж у базової топології, і різниця збільшується по мірі наближення до режиму низької потужності. Топологія з допоміжним активним силовим ключем має те ж значення, що і повномостова в прямому режимі роботи, але гірша у зворотному режимі роботи. Найкращою топологією за умовою навантаження трансформатора є двотактна топологія з двома індукторами. Зворотноходова двонаправлена топологія (FBK-SMC) не має переваг у порівнянні з іншими топологіями за результатами використання запропонованого методу. Аналогічні кругові діаграми були побудовані також і для ККД розглянутих топологій в прямому та зворотному режимі, вони корелюють з умовами навантаження транзисторів порту ЖН (рис. 15): чим нижче умови завантаження, тим вище ККД топології.

Для оцінки ефективності всієї запропонованої системи електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторних батареях у випадку використання ФЕП з підключенням до централізованої енергетичної системи, було проведено аналіз трьох систем електроживлення:

1. Централізована мережа (ЦМ) – живлення від централізованої енергетичної системи без локальних джерел та зберігання енергії, як класичний варіант.

2. Комбінована система (КС) – живлення від централізованої енергетичної системи та від ФЕП: локальні споживачі живляться від фотоелектричних перетворювачів у випадку, якщо їх споживання менше локальної генерації, в інших випадках – живлення йде від централізованої системи.

3. Запропонована акумуляторна система (АС) електроживлення з ФЕП, підключенням до централізованої мережі та зберіганням енергії в АКБ.

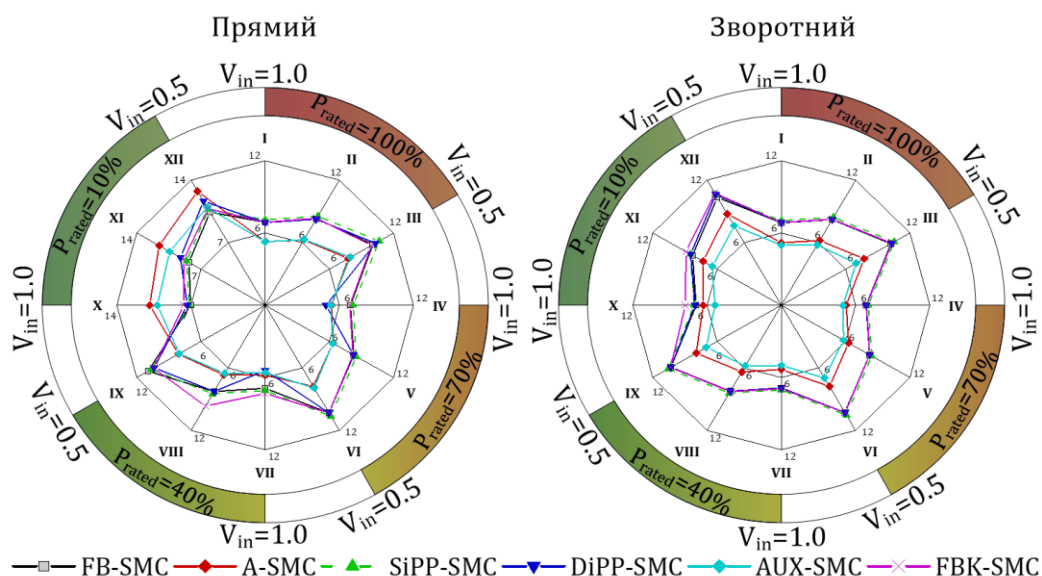


Рис. 15 Умови навантаження ключів ЖС в прямому та зворотному режимах

Для комбінованої та запропонованої систем електроживлення ККД перетворювачів були обрані у відповідності до визначених у попередніх розділах розрахованих значень. Для оцінки ефективності трьох розглянутих вище систем електроживлення в реальних умовах використано архівні дані профілів споживання та генерації локальних об'єктів для Австралії, які містять 30 хвилинне усереднення протягом року генерації та споживання 300 домогосподарств, обладнаних ФЕП, підключених до централізованої електричної системи. Для аналізу було використано дані від користувача під номером 169, в якого встановлені ФЕП потужністю 2 кВт. Для аналізу будемо вважати, що ємність АКБ складатиме 4 кВт·год. На мові Python було розроблено скрипт, який розраховує рівень заряду АКБ, кількості спожитої та згенерованої енергії, вартість спожитої з мережі та відданої в мережу енергії (базова вартість 1 кВт·год: 0.1 AUD для відданої та 0.14 AUD для спожитої з мережі).

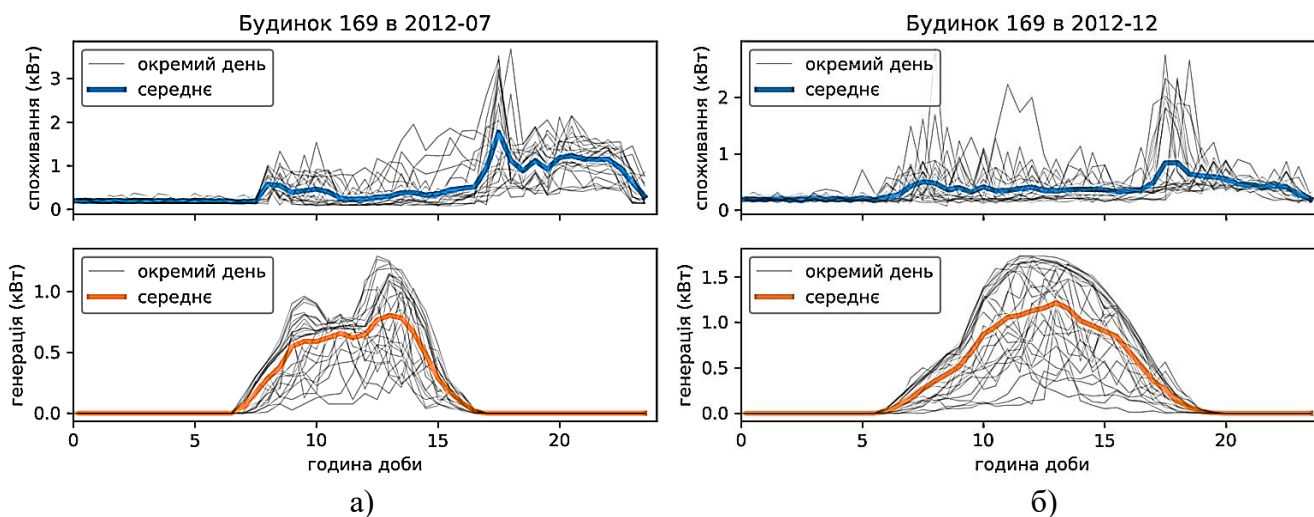


Рис. 16 Споживання та генерація будинку для липня (а) та грудня (б)

Результати аналізу генерації та споживання домогосподарства для липня та грудня показані на рис 16, з якого видно локальні піки споживання вранці та увечері взимку та влітку, а споживання взимку увечері максимальне. Тонкими лініями показані дані за окремі дні, жирними – усереднені за місяць значення для кожної години дня. У випадку використання запропонованої системи енергія з ФЕП

накопичується в АКБ. Аналіз стану АКБ для липня та грудня (рис. 17) показує, що взимку енергії, отриманої від ФЕП для споживання будинку та зарядки АКБ вистачає лише до вечора, а починаючи з 23 години АКБ буде повністю розрядженою. На даних рисунках графік заряд-розряд АКБ показує лише заряд від ФЕП, заряд АКБ від централізованої мережі не показано. В той же час, для літніх місяців енергії від 2 кВт ФЕП вистачатиме для заряду АКБ та споживання будинку весь той час, коли Сонце буде за горизонтом.

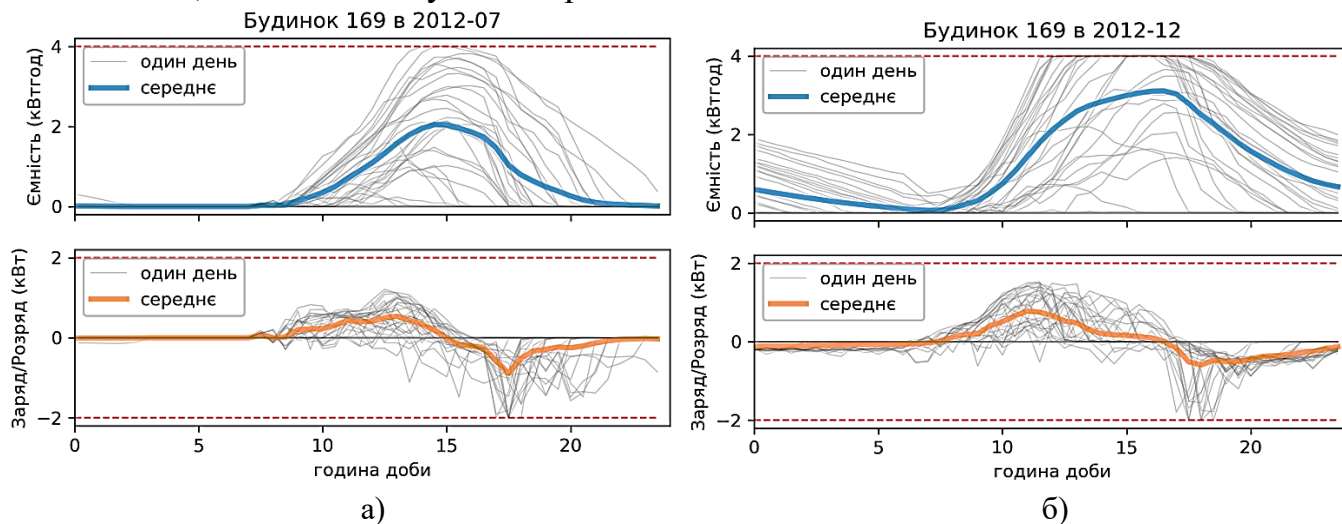


Рис. 17 Стан АКБ будинку для липня (а) та грудня (б)

За результатами розрахунку річного профілю роботи запропонованої системи електроживлення (табл. 4) встановлено, що пікове споживання домогосподарства складає 4.524 кВт, що вище, ніж максимальна потужність 3.5 кВт (220 В, 16 А) при живленні лише від централізованої мережі. В той же час, максимальне пікове споживання енергії з мережі у випадку запропонованої системи зі збереженням енергії в АКБ складає лише 3.436 кВт, що нижче ніж 3.5 кВт. Результати розрахунку роботи різних систем електроживлення зведені в таблицю.

Таблиця 4. Порівняння систем живлення

Параметр	ЦМ	КС	АС
Річне споживання, кВт·год	3231.08	3231.08	3231.08
Річна генерація з ФЕП, кВт·год	-	3016.34	3016.34
Пікове споживання з мережі, кВт	4.524	4.524	3.436
Імпорт енергії з мережі, кВт·год	3231.08	2248.52	1009.16
Експорт енергії в мережу, кВт·год	-	1882.86	606.36
Річний баланс енергії, кВт·год	-3231.08	-365.56	-402.8
Вартість придбаної енергії, Євро	633.36	314.793	141.28
Вартість проданої енергії, Євро	-	188.296	60.64
Баланс вартості енергії, Євро	-633.36	-124.5	-80.65

складає 310, тобто, 55 днів АКБ не використовується, так як розряджена, або ж, повністю заряджена.

З розрахунків трьох варіантів системи електроживлення локального об'єкту можна зробити висновок, що використання запропонованої системи з ФЕП та АКБ дозволяє суттєво зменшити витрати на електроенергію навіть для системи малої потужності. В той же час, використання АКБ дозволяє не збільшувати потужність підключення до мережі та у випадку пікових споживань обходитись лише за рахунок ресурсів АКБ.

В додатках представлені розроблене програмне забезпечення на мові Python для розрахунку економічного та енергетичного ефекту від впровадження АКБ в

систему електроживлення, рівня заряду АКБ системи, балансу та вартості енергії, моделі двонаправленого перетворювача з м'якою комутацією, фото та описи експериментальних макетів системи та перетворювача, принципова схема експериментальної системи та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності та техніко-економічних показників систем електроживлення локальних об'єктів з двонаправленим потоком енергії за рахунок розробки нових топологій силових перетворювачів зі зменшеною кількістю силових ключів.

Основні наукові результати і висновки, отримані в роботі:

1. Досліджено способи обмеження напруги на індукторах у складі двонаправлених перетворювачів напруги, що живляться струмом, та встановлено, що перетворювачі з ФІМ на стороні навантаження є найкращою групою перетворювачів у складі розподілених систем живлення, так як їх використання забезпечує не лише обмеження напруги на індукторі, а і м'яку комутацію силових транзисторів у вхідній та вихідній частинах в широкому робочому діапазоні з простим керуванням на основі зміни фази модульованого сигналу.

2. Розроблені аналітичні моделі для оцінки коефіцієнтів передачі по напрузі гальванічно ізольованих двонаправлених перетворювачів напруги в режимах підвищення та зниження напруги, що дозволило встановити зони, в яких забезпечується м'яка комутація всіх силових ключів перетворювача.

3. Розроблені нові топології гальванічно ізольованих двонаправлених перетворювачів постійної напруги у складі розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з функцією зберігання енергії в акумуляторних батареях, які на відміну від існуючих, мають зменшену кількість силових напівпровідникових ключів та вищий ККД.

4. Запропоновано новий метод оцінки двонаправлених перетворювачів напруги у складі розподілених систем електроживлення локальних об'єктів з акумуляторними системами зберігання енергії, який дозволяє провести оцінку перетворювача у всьому діапазоні його робочих режимів на основі трьох нормованих величин, які представляють параметри навантаження первинного інвертора, високочастотного трансформатора, та вторинного випрямляча. На відміну від існуючих, запропонований метод враховує напруження на всіх силових ключах перетворювача, що дозволяє використовувати її для оцінки будь-яких топологій перетворювачів у складі розподіленої системи електроживлення.

5. За результатами аналітичних розрахунків та використання запропонованого метода встановлено, що система електроживлення на базі двотактної топології з двома індукторами та зменшеною кількістю силових ключів має вищі значення ККД у порівнянні з базовою системою на базі повномостового перетворювача для режимів розряду та заряду акумулятора в діапазоні потужностей, близьких до номінального рівня, і менші, в режимі малих потужностей.

6. Розроблено прототип розподіленої системи електроживлення локальних об'єктів зі збереженням енергії в акумуляторних батареях з вихідною потужністю до 1 кВт, яка рекомендована до впровадження.

7. На основі експериментальної перевірки розподіленої системи електроживлення з акумуляторною системою зберігання енергії показано, що запропоновані двонаправлені перетворювачі мають ККД вище 95% в середині робочого діапазону акумуляторної батареї та потужності вище 25% від номінального рівня (>125 Вт).

8. Запропоновані нові топології перетворювачів постійної напруги дозволяють збільшити ККД системи електроживлення локальних об'єктів з вихідною потужністю до 1 кВт загалом до 96.43% в режимі розряду та 94.58% в режимі заряду АКБ.

9. Використання запропонованої системи з ФЕП та АКБ дозволяє суттєво зменшити витрати на електроенергію в системах електроживлення локальних об'єктів малої потужності (до 2 кВт).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію

1. Bidirectional Soft Switching DC-DC converter for Battery Energy Storage Systems / Blinov A., Kosenko R., Chub A., Vinnikov D. IET Power Electronics. 2018. Vol. 11, Is. 12. Pp. 2000-2009.
2. Asymmetric Snubberless Current-Fed Full-Bridge Isolated DC-DC Converters / Kosenko R., Blinov A., Chub A., Vinnikov D. Electrical, Control and Communication Engineering. 2018. Vol. 14, Is. 1, pp. 5-11.
3. Snubberless Boost Full-Bridge Converters: Analysis of Soft Switching Performance and Limitations / Blinov A., Kosenko R., Chub A., Vinnikov D. Int. Journal of Circuit Theory and Applications, 2019. Pp. 1-25.
4. Wide input voltage range photovoltaic microconverter with reconfigurable buck–boost switching stage / Chub A., Vinnikov D., Kosenko R., Liivik E. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, Is. 7, pp. 5974-5983.
5. Comparison of Performance of Phase-Shift and Asymmetrical Pulsewidth Modulation Techniques for the Novel Galvanically Isolated Buck–Boost DC–DC Converter for Photovoltaic Applications / Vinnikov D., Chub A., Kosenko R., Zakis J., Liivik E. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2017. Vol. 5, Is. 2, pp. 624-637.
6. Comparative Analysis of Semiconductor Power Losses of Galvanically Isolated Quasi-Z-Source and Full-Bridge Boost DC-DC Converters / Kosenko R., Liivik L., Chub A., Velihorskyi O. Electrical, Control and Communication Engineering. 2015. Vol. 8, Is. 1, pp. 5-12.

Матеріали конференцій, що індексовані в базах Scopus або Web of Science

7. Full Soft-Switching Bidirectional Current-Fed DC-DC Converter / Chub A., Kosenko R., Blinov A., Ivakhno V., Zamaruiev V., Styslo B. 2015 56th IEEE Int. Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 14 October 2015. Pp. 189-194.
8. Kosenko R., Husev O., Chub A. Full Soft-Switching High Step-Up Current-Fed DC-DC Converters with Reduced Conduction Losses / IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, 11-13 May 2015. Pp. 1-6.
9. Bidirectional Isolated ZVS DC-DC Converter with Auxiliary Active Switch for High-Power Energy Storage Applications / Ivakhno V., Zamaruiev V., Styslo, B.;

- Kosenko, R.; Blinov, A. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, May 29 – June 2 2017. Pp. 589–592.
10. Kosenko R., Chub A., Blinov A., Full-soft-switching high step-up bidirectional isolated current-fed push-pull DC-DC converter for battery energy storage applications / Proceedings of the IECON2016 42nd Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Florence, 24-27 October 2016. Pp. 1-6.
 11. Kosenko R., Blinov A., Korkh O. Experimental Verification of Two-Stage Power Converter With Current-Fed Soft-Switching Front-End for Battery Storage Applications / 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Riga, 17-21 September 2018. Pp. 1-9.
 12. Bidirectional Soft Switching Current Source DC-DC Converter for Residential DC Microgrids / Blinov A., Kosenko R., Chub A., Vinnikov D. 44th Annual Conference of the IEEE Ind. Electr. Society, Washington, 21-23 October 2018. Pp. 6059-6064.
 13. Kosenko R., Vinnikov D. Soft-Switching Current-FED Flyback Converter with Natural Clamping for Low Voltage Battery Energy Storage Applications / Technological Innovation for Smart Systems, 1: Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, Lisbon, 03-05 May 2017. Pp. 429-436.
 14. Full soft-switching bidirectional isolated current-fed dual inductor push-pull DC-DC converter for battery energy storage applications / Kosenko R., Zakis J., Blinov A., Chub A., Veligorskyi O. 2016 57th Int. Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Tech.University (RTU CON). 2016, pp. 1-8.

Патенти на винахід

15. Патент № 96177 України на винахід (корисну модель) МПК H02J 15/00. Пристрій для відбору електричної енергії від сонячної батареї / Косенко Р.А., Велігорський О.А., Гусев О.О.; заявник та патентовласник Косенко Роман Анатолійович. – №201405442; заявл. 21.05.2014; опубл. 26.01.2015. Бюл. №2.

АНОТАЦІЯ

Косенко Р.А. Системи електроживлення локальних об'єктів з двонаправленими перетворювачами з м'якою комутацією. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, 2019.

Дисертація присвячена підвищенню енергоефективності систем електроживлення локальних об'єктів з накопичувачами енергії на базі акумуляторних батарей, до складу яких входять двонаправлені перетворювачі з живленням струмом.

Проведено огляд особливостей та обрано складові системи електроживлення локальних об'єктів, синтезовано нову ієрархічну класифікацію перетворювачів постійної напруги, що живляться струмом, та мають режим м'якої комутації. Проаналізовано роботу базової повномостової та синтезовано низку нових топологій перетворювачів напруги, які мають меншу кількість силових ключів. На основі аналітичних розрахунків електромагнітних процесів у системах електроживлення з базовою та запропонованими топологіями визначено коефіцієнти передачі по напрузі та діапазони роботи, в яких забезпечується м'яка комутація силових ключів.

Запропоновано новий метод оцінки перетворювачів постійного струму з м'якою комутацією для систем живлення локальних об'єктів зі зберіганням енергії в акумуляторах, який дозволяє провести оцінку у всьому діапазоні робочих режимів

на основі трьох нормованих величин: параметрів навантаження первинного інвертора, високочастотного трансформатора та вторинного випрямляча. Оцінено ефективність запропонованої системи електроживлення локальних об'єктів у порівнянні з централізованою та комбінованою системами електроживлення.

Розроблено розподілені системи електроживлення локальних об'єктів зі збереженням енергії в акумуляторних батареях з вихідною потужністю до 1 кВт на базі повномостового та запропонованих двонаправлених перетворювачів напруги зі зменшеною кількістю силових ключів, які рекомендовані до впровадження.

Ключові слова: система електричного живлення, система зберігання енергії, акумуляторні батареї, двонаправлені перетворювачі, перетворювачі, що живляться струмом.

АННОТАЦІЯ

Косенко Р.А. Системы электропитания локальных объектов с двунаправленными преобразователями с мягкой коммутацией. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. Черниговский национальный технологический университет, Чернигов, 2019.

Диссертация посвящена повышению энергоэффективности систем электропитания локальных объектов с накопителями энергии на базе аккумуляторных батарей, в состав которых входят двунаправленные преобразователи, питающиеся током.

Проведен анализ особенностей и выбраны составляющие системы электропитания локальных объектов – аккумуляторные батареи, силовые ключи и двунаправленные гальванически изолированные преобразователи, которые питаются током. Синтезирована новая иерархическая классификация преобразователей постоянного напряжения, которые питаются током, и имеют режим мягкой коммутации. Проанализирована работа базовой полномостовой топологии, и синтезирован ряд новых четырехквadrантных полномостовых топологий преобразователей напряжения, которые имеют меньшее количество силовых ключей. На основе аналитических расчетов электромагнитных процессов в системах электропитания на основе базовой и предложенных топологий преобразователей определены коэффициенты передачи по напряжению и диапазоны работы, в которых обеспечивается мягкая коммутация всех силовых ключей.

Предложен новый метод оценки преобразователей постоянного тока с мягкой коммутацией для систем электропитания локальных объектов с хранением энергии в аккумуляторах, который позволяет провести оценку во всем диапазоне рабочих режимов на основе трех нормированных величин: параметров нагрузки первичного инвертора, высокочастотного трансформатора и вторичного выпрямителя. Оценена эффективность предложенной системы электропитания локальных объектов по сравнению с централизованной и комбинированной системами электропитания.

Разработаны распределенные системы электропитания локальных объектов с хранением энергии в аккумуляторных батареях с выходной мощностью до 1 кВт на базе полномостового и предложенных двунаправленных преобразователей напряжения с уменьшенным количеством силовых ключей, которые рекомендованы к внедрению.

Ключевые слова: система электропитания, система хранения энергии, аккумуляторные батареи, двунаправленные преобразователи, преобразователи, которые питаются током.

ANNOTATION

Kosenko R.A. Power supply systems for local power supply systems based on soft switching bidirectional converters. – As a manuscript.

Dissertation for the degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. Chernigiv national university of technologies, Chernigiv, 2019.

The dissertation is devoted to increase of energy efficiency of local power supply systems with battery energy storages that based on bidirectional current-fed converters.

A review of features was performed and components of local power supply systems were selected, including batteries, semiconductor switches and bidirectional galvanically isolated current-fed power converters. A new hierarchical classification of dc current-fed voltage converters with soft switching has synthesized on the classification basis of modulation methods. The work of the basic full-bridge topology has been analysed, and a set of new four-quadrant full-bridge topologies of current-fed voltage converters with reduced number of power switches has been synthesized. On the basis of analytical calculations of electromagnetic processes in local power supply systems with the basic and proposed converter topologies, the voltage gain and operating soft-switching ranges of power switches of the voltage and current ports, has been determined.

A new method for evaluating of DC converters with soft switching for local power supply systems with battery energy storage is proposed, which allows evaluating the whole range of operating modes on the basis of three normalized values: load parameters of the primary inverter, high frequency transformer and secondary rectifier. The efficiency of the proposed local power supply system in comparison with centralized and combined power supply systems has been evaluated.

Distributed 1 kV local power supply systems with battery energy storage on the basis of classical full-bridge and proposed bidirectional current-fed voltage converters with a reduced number of switches has been developed and recommended for implementation.

Keywords: power supply system, energy storage system, battery, bidirectional converters, current-feed converters.

Підписано до друку 26.04.2019 р. Формат 60x84/16.

Друк різнографія. Ум. друк. арк. 0,9.

Тираж 130 пр. Замов. № 459/19.

Редакційно-видавничий відділ
Чернігівського національного технологічного університету
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.