

Дмитро ЗАХАРЧЕНКО^{1, 2}, Сергій СТЕПЕНКО²

Україна, Чернігів, ¹Центр протимінної діяльності Міністерства оборони України,

²Національний університет «Чернігівська політехніка»

E-mail: dimazakhar@gmail.com, serhii.stepenko@stu.cn.ua

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ КВАЗІІМПЕДАНСНОГО ІНВЕРТОРА В АВТОНОМНІЙ СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Комплексно розглянуто сучасну автономну систему енергоживлення з накопичувачами електроенергії, приділено увагу всім значним її компонентам. Описано сучасні системи керування квазіімпедансним інвертором у складі такої системи, представлено переваги та недоліки кожної з них, методи розрахунку головних параметрів, запропоновано побудову систем керування за допомогою програмного забезпечення MATLAB/Simulink. Проведене моделювання дозволило вибрати оптимальний метод керування для дворівневого квазіімпедансного інвертора у складі зазначеної системи живлення.

Ключові слова: накопичувач електроенергії, автономна система живлення, метод модуляції, квазіімпедансний інвертор.

У процесі розвитку електроенергетики все досконалішими стають електроенергетичні об'єкти, а саме більш безпечними, екологічними, ефективними та економічно вигідними. З розвитком та розповсюдженням альтернативних джерел енергії підвищується потреба в автономних системах живлення для використання та передачі отриманої «зеленої» шляхом електроенергії. Із впровадженням автономних систем живлення та вдосконаленням їхніх параметрів почали формуватися мікромережі. Мікромережею вважається локальна енергетична мережа, що може містити засоби розподілу, передачі, генерації, перетворення та споживання електроенергії [1, 2] і яку можна від'єднати від загальної мережі та отримати автономну.

Зберіганням енергії можна назвати формування масиву енергії, яка використовується для подачі споживачам у необхідний час. У мікромережах приватних домогосподарств, підприємств тощо, живлення яких відбувається з відновлювальних джерел, питання зберігання енергії при її генерації у надмірній кількості або забезпечення споживання у разі недостатньої генерації виникає через нерівномірність можливостей генерації, її залежності від зовнішніх умов та нерівномірності споживання енергії. Саме такі коливання показників мікромережі спричиняють необхідність зберігання електроенергії, і вибір оптимального способу зберігання має велике значення для ефективності системи в цілому. Пошук нових матеріалів, розробка новітніх технологій є ключем до прогресу у питанні накопичення енергії.

Сучасні домогосподарства зазвичай мають незалежні джерела енергії, такі як вітрові генератори,

фотоелектричні панелі та подібне обладнання для виробництва зеленої енергії. Прогнозується, що незабаром зростатиме кількість господарств, що споживають енергію, яку самі й виробляють. Цей процес полегшує та зменшує навантаження на великі національні електричні мережі, а також сприяє загальній енергетичній безпеці країни.

Аналіз публікацій та постановка проблеми

Опубліковані на цей час матеріали описують схеми, методи керування та типи взаємодії елементів мікромереж для різних застосувань. Широкий огляд існуючих джерел дає можливість провести комплексний аналіз та подальше моделювання роботи інвертора для визначення найбільш раціонального поєднання елементів системи мікромережі з метою використання у заданих умовах. А в умовах вже наявних та потенційних пошкоджень енергосистеми країни в результаті російської агресії набувають значної актуальності питання дослідження, модернізації та впровадження мікромереж для живлення приватних домогосподарств або підключення таких систем до загальної мережі по «зеленому тарифу».

У роботі [3] проведено моделювання системи керування потужністю багаторівневого інвертора Quasi Z-Source (qZSI) з H-мостом для фотоелектричних систем, під'єднаних до мережі. Ця топологія має численні переваги, що робить її надійною та придатною для фотоелектричних застосувань. Завдяки імпедансній мережі та каскадній структурі H-моста забезпечується високий коефіцієнт підсилення, зменшення загального гармонійного спотворення (THD) та висока надійність у фотоелектричних системах. Автори розглядають п'ятирівневий каскадний qZSI з H-мостом, для якого була розроблена імпедансна

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (проект № 0123U100975)

мережа. Також у цій роботі був спроектований фотоелектричний інвертор потужністю 2 кВт·А за допомогою MATLAB/Simulink. У статті ґрунтовно описано роботу інвертора в зазначених умовах, однак нічого не сказано про можливість використання накопичувача електроенергії як джерела живлення, а також розглянуто використання багаторівневої структури інвертора, але нічого не сказано про класичну однорівневу побудову.

У статті [4] пропонується розширений варіант інвертора з комутованою індуктивністю SL-qZSI. Новий інвертор — ESL-qZSI — містить додаткову індуктивність та три діоди. Він має точку заземлення джерела постійного струму, безперервний вхідний струм та відсутність пускового струму. Порівняно з SL-qZSI цей інвертор має меншу перенапругу на конденсаторі при однаковому значенні коефіцієнта перетворення напруги, що призводить до нижчої напруги ланки постійного струму, а також вищий коефіцієнт посилення напруги при тому ж вхідному джерелі та індексі модуляції. Варіантом подальшого розвитку топологій qZSI, проаналізованих у статті, є використання різних наявних методів керування роботою інвертора, а також застосування накопичувачів електроенергії як джерела живлення.

У статті [5] представлено концептуальне дослідження функціонування qZSI з частковим навантаженням, яке демонструє два важливі аспекти для підтримки максимально можливої продуктивності в бажаному робочому діапазоні. Розглянуто проектування, що стосується правильного визначення індуктивності імпедансної мережі з використанням лінійних та нелінійних дроселів, та керування, засноване на використанні вищої ефективної частоти комутації шляхом перемикання між різними схемами модуляції. Описаний підхід до керування режимами роботи інвертора є перспективним та відкриває додаткові можливості. Для подальших досліджень цього підходу доцільним є розширення переліку методів керування інвертором, комбінацій їх застосування, а також використання різних джерел струму для вхідного живлення.

У статті [6] запропоновано схему qZSI, описано переваги та її недоліки порівняно з інвертором Z-Source (ZSI), проведено моделювання його роботи та проаналізовано два методи керування — *maximum boost control* та *maximum constant boost control*, але немає їх порівняння з іншими розповсюдженими методами керування роботою qZSI.

У статті [7] пропонується нова топологія, заснована на повторюваних H-мостах qZSI, що призначається для однофазних фотоелектричних систем. Потенційними її перевагами є зменшення кількості пасивних компонентів та покращення якості генерації енергії. Для керування новою топологією було розроблено відповідний метод модуляції з

необхідними сигналами зі зсувом фаз та наскрізними станами. Ця топологія є перспективною для подальшого вивчення та впровадження, при цьому недослідженим є впровадження накопичувачів електроенергії як джерела живлення.

Крім сказаного, слід зауважити, що серед наявних публікацій практично немає робіт, присвячених порівнянню широкого спектра наявних методів керування інвертором, а також питанням використання накопичувачів енергії та визначення оптимальної методики керування саме за умови живлення за від цього джерела.

Метою цієї роботи є аналіз наявних методів керування роботою інвертора у складі автономної системи живлення, моделювання та визначення показників роботи системи за допомогою засобів MATLAB/Simulink. На основі отриманих показників за результатами моделювання може бути визначено найбільш раціональні методи керування роботою системи.

Автономна система енергоживлення з накопичувачами електроенергії

Основними елементами мікромережі, представленої на **рис. 1**, є фотоелектричні панелі (ФП), акумуляторна батарея (АКБ), система управління батареєю (англ. *battery management system*, BMS) інвертор DC/AC, навантаження на змінному струмі та система розподілу електроенергії. Для можливості зняття максимальної потужності з фотопанелей у різних умовах навколишнього середовища їх під'єднують до системи відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Система контролю роботи накопичувача електроенергії відстежує його найважливіші параметри, такі як напруга, струм, рівень заряду, температура тощо. Таким чином забезпечується оптимальна робота накопичувача та уникнення його непередбаченого старіння або виходу з ладу, перезарядження чи глибокого розрядження, вихід за межі робочої температури тощо. Інвертор DC/AC перетворює постійний струм з накопичувача та фотопанелей у змінний, який передається до навантажень чи мережі загального користування.

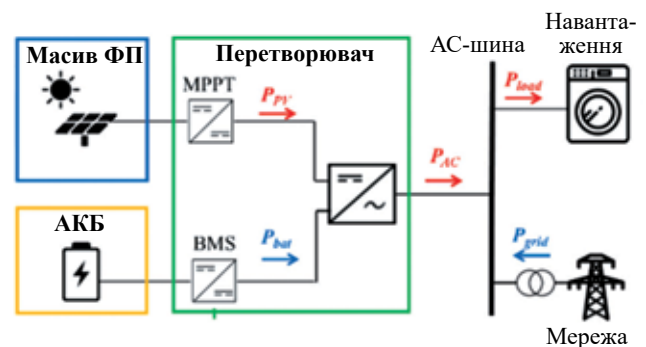


Рис. 1. Мікромережа з фотоелектричними панелями та накопичувачем електроенергії [1]

Аналіз компонентів системи енергоживлення

Накопичувачі електроенергії. Науково-технічний прогрес у створенні нових типів та вдосконаленні існуючих акумуляторних батарей істотно впливає на електроенергетичні об'єкти в цілому. Існування давно розроблених та доведених до логічного кінця моделей АКБ робить їх конкурентоспроможними завдяки поширеності та вузькоспеціалізованим особливостям. При цьому морально застарілі типи АКБ здебільшого мають винятково низьку вартість, що робить неконкурентоспроможними, а значить, і малопоширеними сучасні й екологічні моделі АКБ. На сьогодні проводити глибоке дослідження таких АКБ немає сенсу, але очевидно, що за ними майбутнє.

Сучасні АКБ виконують як один або декілька об'єднаних у спільному корпусі елементів. Вони характеризуються такими основними параметрами: ємність акумулятора, зовнішні розміри, термін експлуатації, кількість циклів перезарядки, діапазон робочої температури, параметри саморозряду, швидкість зарядки, напруга однієї секції, екологічність [8]. Режим обслуговування, заряджання та встановлення акумулятора залежить від типу електроліту — рідина чи гель.

Найбільш поширеними типами АКБ є свинцево-кислотні, нікель-метал-гідридні, нікель-кадмієві, літій-іонні, літій-залізо-фосфатні, літій-полімерні, і від типу залежить їхня вартість, ємність, температурний режим роботи, розміри, кількість циклів перезарядки тощо. АКБ виконуються як один елемент або кілька елементів, з'єднаних паралельно чи послідовно. Деякі види АКБ мають елементи управління для забезпечення контролю режиму заряду/розряду і захисту при експлуатації.

Якщо брати до уваги баланс переваг і недоліків кожного з типів АКБ і умови їх використання, то найбільш перспективними вбачаються Li-іон-акумулятори [9]. Вони зберігають працездатність протягом 10–15 років, мають збалансовану вартість одиниці ємності, вираженої у Вт·год, велику напругу однієї комірки, оптимальне відношення об'єму до маси, низький саморозряд, стабільний потік енергії до навантаження, мобільність, широкий спектр умов експлуатації. З кожним роком поширення АКБ цього типу зростає, вартість знижується, параметри та характеристики вдосконалюються, і схоже на те, що у майбутньому оптимальність такого вибору буде лише зростати. Перспективним напрямком можна вважати також і розвиток літєвих АКБ інших типів, але на сьогодні їхніми головними недоліками є чутливість до надмірного розряджання та перезаряджання, перегрів та швидке старіння, необхідність використання внутрішніх систем захисту і при всьому цьому — висока вартість.

Заряд/розряд літій-іонних накопичувачів електроенергії. Для підтримки необхідних умов експлуатації літєвих накопичувачів необхідно застосовувати систему, призначену для відстеження та контролю рівня заряду накопичувача. Основними її завданнями є моніторинг, захист, обчислення та обмін інформацією. Головна та найважливіша функція — моніторинг стану накопичувача, а саме оцінювання рівня заряду через відношення доступної ємності до його повної ємності. Від достовірності такої оцінки в результаті залежить ступінь зниження ємності АКБ у довгостроковій перспективі, старіння, збільшення відмов та аварійних ситуацій, збільшення витрат на її обслуговування.

Для впровадження систем керування літєвими накопичувачами використовуються інтелектуальні обчислювальні методи, наприклад фільтр Калмана та штучна нейронна мережа [10]. Такі системи необхідні для контролю струму, напруги, температури, старіння та прогнозу старіння накопичувача і вимагають не лише контролю цих параметрів, а й достатньої точності їх зчитування та оброблення. Процес обробки складається з таких етапів, як вимірювання власного опору, вимірювання напруги ланцюга, випробування на розряд, кулонівський підрахунок та інші інтелектуальні методи.

Згадані обчислювальні методи мають такі переваги, як висока точність, простота процесу вимірювання необхідних параметрів, можливість обчислення у реальному часі та здатність до самонавчання, що є необхідним в умовах динамічної моделі поведінки АКБ у процесі експлуатації. Похибки у роботі цих систем складають 2,8% для фільтра Калмана та 2,6% для технології штучної нейронної мережі. Ці технології у системі керування вимагають точного моделювання батареї та визначення впливу факторів, таких як температура та ступінь заряду. Їх використання потребує об'єднання великої кількості даних, що своєю чергою призводить до складних обчислень і наявності значного масиву даних. Для оптимізації вимог до системи контролю, а також покращення точності її функціонування, оптимальним є поєднання фільтра Калмана та штучної нейронної мережі, що дозволяє компенсувати недоліки двох окремих методів та підвищити точність оцінки рівня заряду літєвого накопичувача до 1%.

Інвертор DC/AC для перетворення постійного струму у змінний з можливістю підвищення або зниження в одноступеневому виконанні є гарною альтернативою традиційним інверторам напруги (VSI) або струму (CSI). Після розроблення першого інвертора ZSI у 2003 році ці пристрої постійно розвиваються і на сьогодні мають значну кількість структур та типів. Принцип роботи цього типу інверторів передбачає використання стану, який полягає у замкненні однієї або двох пар послідовних транзисторів для створення короткочасного короткого

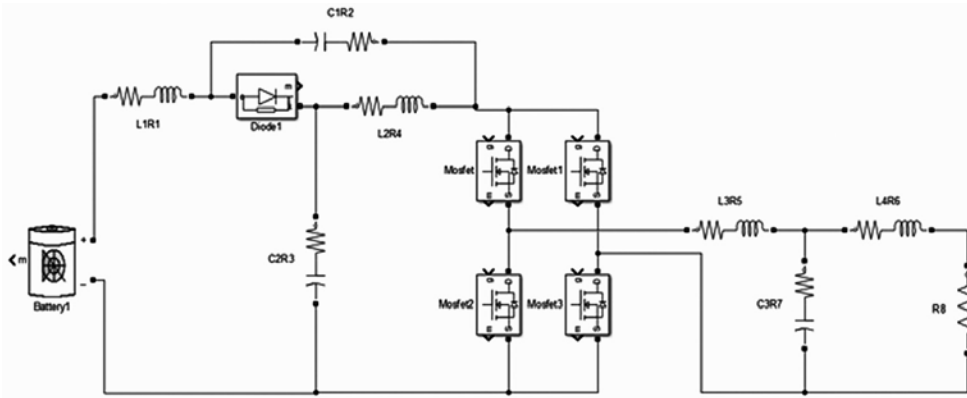


Рис. 2. Схема інвертора типу qZSI

замикання інвертора. Застосування цього режиму стало можливим завдяки наявності імпедансу у ланці постійного струму.

Серед популярних типів структур ZSI можна виділити qZSI [11], яка отримала розповсюдження через свою простоту та безперервність вхідного струму (рис. 2). Застосовується qZSI для фотоелектричних систем живлення, електромобілів та накопичувачів електроенергії і стає все більш потужним та оптимальним рішенням для перетворення електроенергії у системах живлення. Такий тип інвертора вважається стабільним перетворювачем постійного струму у змінний з подальшою подачею перетвореного струму до мережі загального користування. Вибір типу системи керування інвертором та її реалізація має суттєвий вплив на його експлуатаційні показники.

Аналіз методів керування системою енергоживлення

Традиційним методом керування є широтно-імпульсна модуляція (англ. *pulse width modulation*, PWM), що використовується для інверторів VSI та CSI. У системі керування інвертора qZSI він може мати режим підвищення напруги (англ. *boost*) [13, 14] — короткочасне коротке замикання плечей інвертора, що дозволяє підвищити вихідну змінну напругу порівняно з традиційним PWM.

Метод PWM для однофазного дворівневого qZSI формує два модулюючих сигнали: синусоїдальний та трикутний. За допомогою логічних операторів отримується бінарний сигнал для безпосереднього керування роботою транзисторів. За наявності регулятора синусоїдальний сигнал замінюється сигналом з регулятора [14].

На рис. 3 показана схема генерації імпульсів PWM та її осцилограма, отримані у MATLAB/Simulink. Опорним тут є трикутний сигнал, що формується блоком «Repeating sequence», задавальний синусоїдальний сигнал — блоком «Sine wave». Коли модуль амплітуди опорного сигналу більший, ніж задавального, за допомогою операторів порівняння формуються логічні сигнали S1 та S2 для керування роботою транзисторів (рис. 4).

Метод *simple boost control* (SBC) полягає в тому, що до синусоїдального сигналу, який формується методом PWM, додаються сигнали, що обмежують його на додатному та від'ємному півперіодах [15]. На проміжках, де трикутний сигнал за модулем перевищує обмежувальний, формується стан наскрізної провідності (англ. *shoot-through*). Якщо тривалість цього стану T_0 , а період опорного сигналу T , тоді коефіцієнт заповнення розраховується як

$$D = T_0 / T. \quad (1)$$

Перевагою методу SBC є простота його реалізації, недоліком — відсутність нульового стану перемикання, що збільшує навантаження на пасивні елементи. При формуванні режиму shoot-through вмикаються усі транзистори, і втрати на перемикання зростають.

На рис. 5 показано задавальний трикутний та опорний синусоїдальний сигнали, а також обмежувальний сигнал. На проміжках, де обмежувальний сигнал за модулем більший, ніж задавальний, формується стан shoot-through, що відповідає коротким імпульсам на осцилограмах S1, S2 на рис. 6.

Параметри, що визначають роботу методу SBC:

– індекс модуляції

$$M = 1 - D; \quad (2)$$

– boost-фактор

$$B = 1 / (2M - 1); \quad (3)$$

– коефіцієнт посилення напруги

$$G = MB = M / (2M - 1). \quad (4)$$

Метод *constant boost control* (CBC) відрізняється від SBC тим, що до синусоїдального сигналу додається сигнал третьої гармоніки. Задавальний трикутний та обмежувальні сигнали залишаються незмінними. Коли модуль трикутного сигналу перевищує обмежувальний, формується стан shoot-through. Цей метод контролю дозволяє зменшити розмір системи і вартість компонентів, забезпечує високий коефіцієнт посилення напруги, одночасно підтримуючи необхідну скважність та зменшуючи навантаження на транзисторах [16].

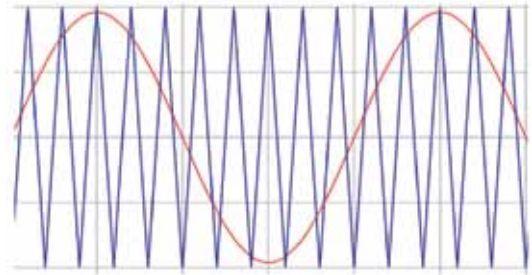


Рис. 3. Логічна схема генерації імпульсів PWM та її осцилограма

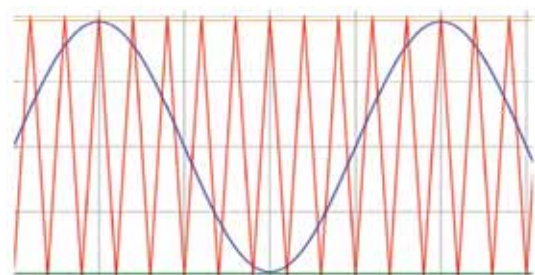
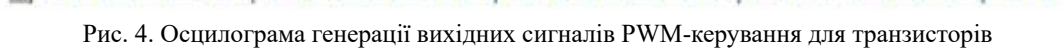
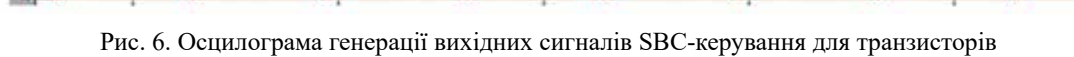


Рис. 5. Логічна схема генерації імпульсів SBC та її осцилограма



На **рис. 7** показано задавальний трикутний, опорний синусоїдальний з додаванням третьої гармоніки, а також обмежувальні сигнали. На проміжках, де обмежувальний сигнал за модулем більше задавального, формується стан shoot-through (**рис. 8**).

У методі *maximum boost control* (МВС) використовуються лише синусоїдальний та трикутний сигнали [17]. Кожен нульовий стан стає станом наскрізної провідності для досягнення максимального значення підсилення. Кожен транзистор має окремий логічний сигнал керування. Цей метод дозволяє усунути деякі обмеження методу SBC завдяки максимальному підсиленню. При використанні МВС нульовий стан повністю замінюється станом наскрізної провідності, що призводить до зменшення напруги на комутаторі порівняно з SBC. Цей стан генерується порівнянням логічним оператором мінімального та максимального значень модулюючих сигналів. Тому в момент, коли опорний сигнал перевищить максимальне або стане меншим за мінімальне значення модулюючого сигналу, почне генеруватись сигнал shoot-through. Отже метод МВС подібен до SBC, однак не використовує обмежувальні сигнали [18]. У разі необхідності розширити діапазон модуляції може бути застосована третя гармоніка — такий метод керування має назву *maximum constant boost control* (MCBC) [17]. Обидва

ці методи, і МВС, і MCBC, вносять низькочастотні пульсації у вихідний струм інвертора, що призводить до підвищення вимог до характеристик пасивних компонентів на низькій вихідній частоті. Перевагами цих методів є отримання максимальної вихідної напруги, тобто максимального коефіцієнта посилення, недоліком — збільшення втрат на перемикання транзисторів.

Параметри, що визначають роботу методу МВС [19]:

– коефіцієнт заповнення

$$D = \frac{T_0}{T} = \frac{2\pi - 3\sqrt{3}M}{2\pi}; \quad (5)$$

– boost-фактор

$$B = \frac{1}{1 - 2D} = \frac{2\pi^2 - 2\sqrt{3}\pi M}{-2\pi^2 + 6\sqrt{3}M - 9M^2}; \quad (6)$$

– коефіцієнт посилення напруги

$$G = MB = \frac{2\pi^2 M - 2\sqrt{3}\pi M^2}{-2\pi^2 + 6\sqrt{3}M - 9M^2}. \quad (7)$$

На **рис. 9** показано задавальний трикутний сигнал та опорні синусоїдальні сигнали. Стан shoot-through формується у результаті порівняння логічним опе-

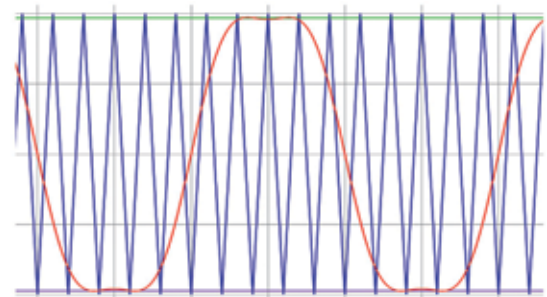
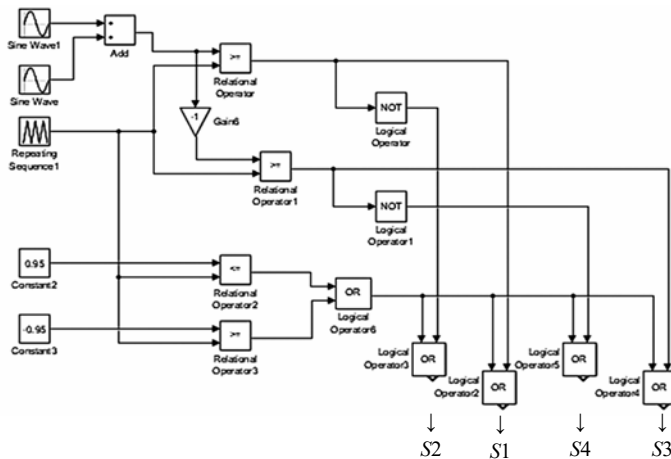


Рис. 7. Логічна схема генерації імпульсів CBC та її осцилограма

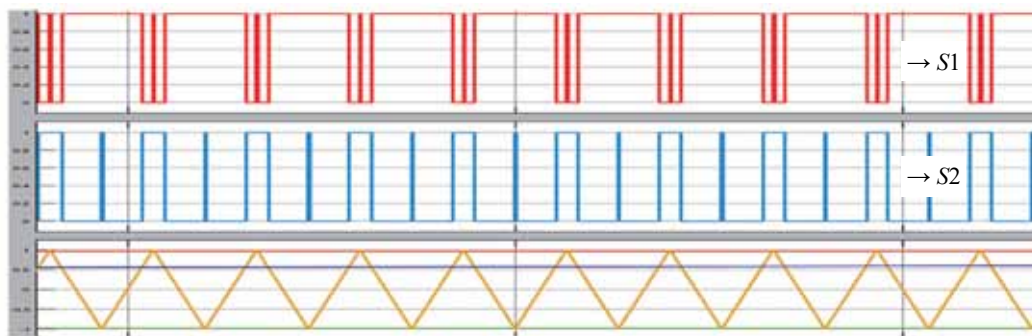


Рис. 8. Осцилограма генерації вихідних сигналів CBC-керування для транзисторів

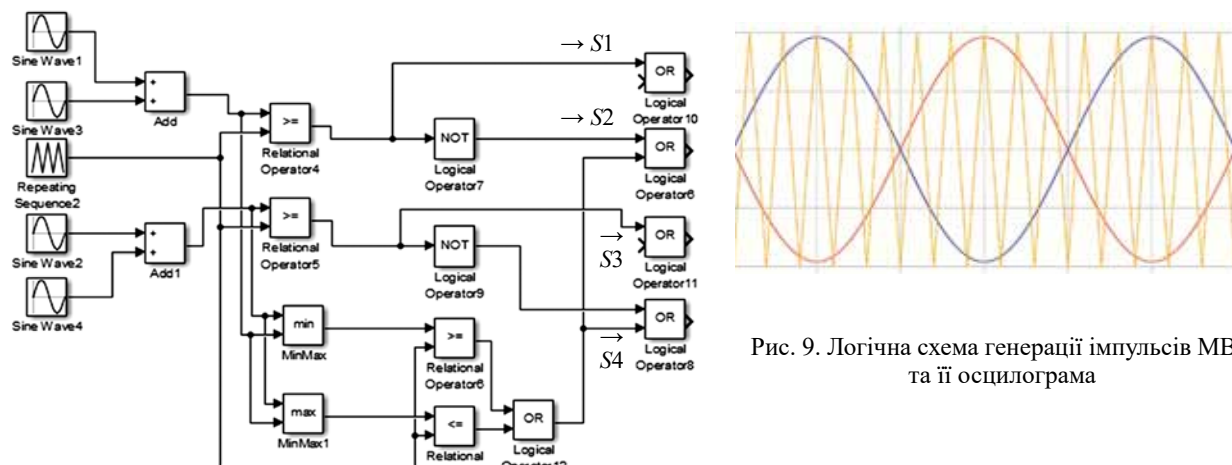


Рис. 9. Логічна схема генерації імпульсів MBC та її осцилограма

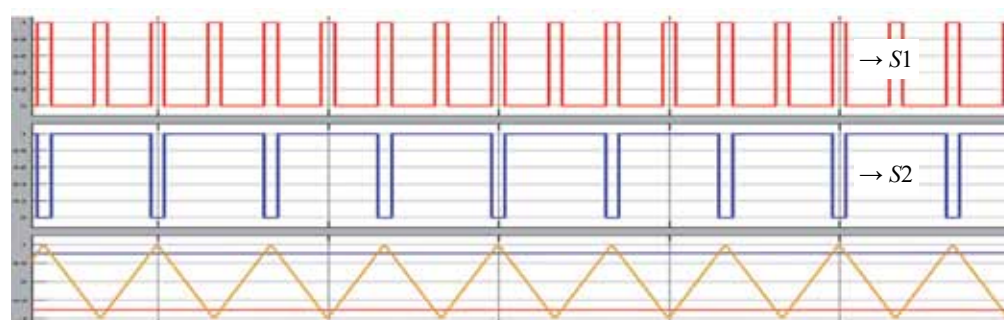


Рис. 10. Осцилограма генерації вихідних сигналів MBC-керування для транзисторів

ратором мінімального та максимального значення моделюючих сигналів в момент, коли опорний сигнал перевищуватиме максимальне значення моделюючого сигналу (рис. 10).

Результати моделювання та їх обговорення

Результати моделювання роботи інвертора типу qZSI у складі автономної системи енергоживлення навантаження потужністю 2 кВт змінним струмом напругою 220 В та частотою 50 Гц із розглянутими вище методами керування наведено на **рис. 11** (метод MBC не розглядався через зазначені вище недоліки).

Джерело живлення являло собою шість послідовно встановлених літій-іонних акумуляторів номінальною напругою 48 В (56 В у повністю зарядженому стані) та ємністю 12 А·год кожен.

Як видно з рис. 11, для методів керування PWM та SBC форма вихідного сигналу напруги та струму візуально наближається до синусоїдальної, для СВС має місце незначне спотворення форми — “зрізані вершини” через додавання моделюючого сигналу третьої гармоніки до синусоїдального. Розрахований за допомогою FFT-аналізу у середовищі MATLAB/Simulink кількісний показник загальних гармонійних

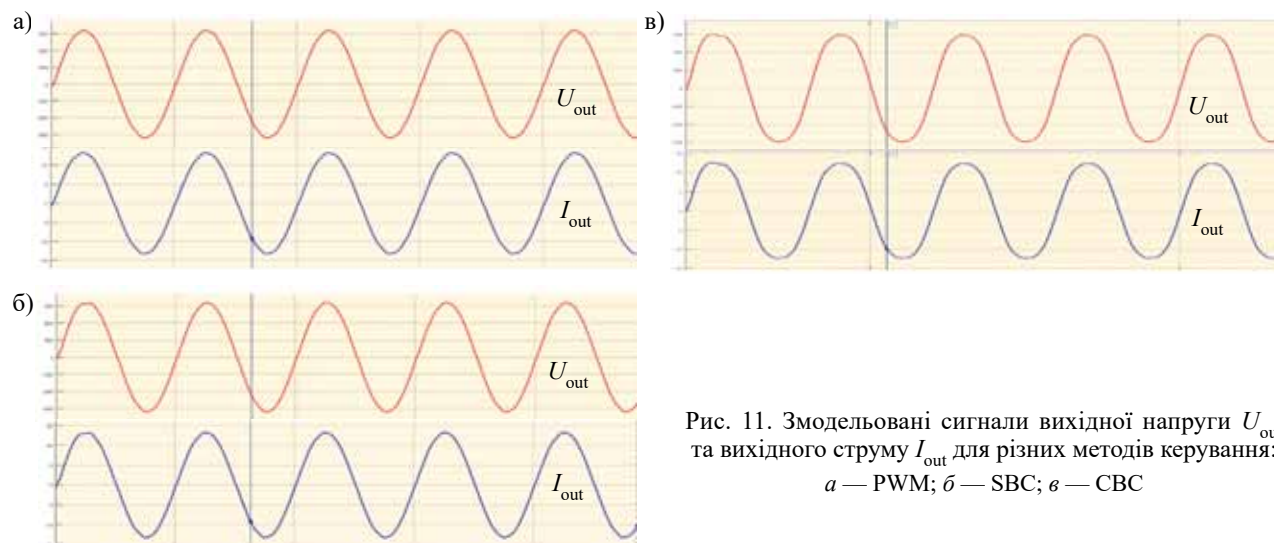


Рис. 11. Змодельовані сигнали вихідної напруги U_{out} та вихідного струму I_{out} для різних методів керування: а — PWM; б — SBC; в — CBC

Характеристики методів модуляції

Метод	Загальне гармонійне спотворення вихідного струму, %	Напруга на ланці постійного струму, В	Індекс модуляції для номінальної вихідної напруги	Реалізаційна складність
PWM	0,88	335	0,96	низька
SBC	0,77	349	0,90	низька
CBC	6,80	348	0,84	середня

спотворень, наведений серед інших характеристик методів модуляції у **таблиці**, підтверджує це. До реалізаційної складності відноситься ступінь навантаження на компоненти системи керування та перетворення, складність підбору компонентів та налаштування системи керування. Цей параметр є оціночним та може змінюватись залежно від характеристик електроенергетичної системи та вимог до приладів споживання.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що серед розглянутих методів керування оптимальним можна вважати метод керування SBC — він забезпечує найвищу вихідну напругу і при цьому має середній показник загальних гармонійних спотворень та низький рівень реалізаційної складності.

Висновки

За результатами моделювання роботи інвертора у складі системи живлення навантаження потужністю 2 кВт змінною напругою (220 В, частотою 50 Гц) із різними методами керування і живленням від літій-іонних накопичувачів електроенергії можна зробити такі висновки.

В умовах поставлених до модельованої системи вимог оптимальним методом керування є SBC, який при найкращій ефективності серед розглянутих методів керування має достатньо низький показник загальних гармонійних спотворень і низький рівень реалізаційної складності.

При цьому слід зазначити, що в реальних умовах експлуатації автономних систем електроживлення вибір методів модуляції для квазіімпульсного інвертора обумовлюється не лише ефективністю перетворення, а й рядом практичних обмежень. Так, широтно-імпульсна модуляція (PWM), що є найпростішою у реалізації, має обмежену здатність до підсилення напруги, оскільки не використовує режим shoot-through. Це зменшує її ефективність у системах з низькою вхідною напругою, а якість вихідної напруги та/або струму може знижуватися при зростанні навантаження. А для методу simple boost control (SBC) обмеження пов'язані з відсутністю нульового стану перемикачів, що збільшує навантаження на пасивні елементи інвертора. Крім того, всі транзистори одночасно активуються в режимі наскрізної провідності, що призводить до зростання теплових втрат і підвищення вимог до системи охолодження.

Практичне використання методу constant boost control (CBC), який завдяки додаванню третьої гармоніки до модулюючого сигналу забезпечує розширений діапазон підсилення, ускладнюється через значно вищі гармонійні спотворення (до 6,8%) та необхідність використання додаткових фільтрів. Крім того, реалізація цього алгоритму складніша і потребує ретельного збалансування параметрів системи керування для забезпечення стабільної роботи.

Інші методи, зокрема maximum boost control (MBC) та maximum constant boost control (MCBC), хоча й забезпечують найвищий коефіцієнт підсилення, мають суттєві обмеження, пов'язані зі створенням низькочастотних пульсацій, що ускладнює проектування пасивних компонентів, а також зі значними втратами на перемикач через одночасне увімкнення всіх ключів. Такі методи доцільно застосовувати лише у стаціонарних системах із потужним охолодженням та якісними елементами фільтрації.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані для обґрунтованого вибору оптимального методу модуляції в автономних системах енергоживлення з накопичувачами електроенергії.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Georgious R., Refaat R., Garcia J., Daoud A. A. Review on energy storage systems in microgrids, *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 17, 2134. <https://doi.org/10.3390/electronics10172134>
- Annuk A., Yaïci W., Lehtonen M. ET AL. Simulation of energy exchange between single prosumer residential building and utility grid. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 6, 1553. <https://doi.org/10.3390/en14061553>
- Umarani D., Ramalingam Si. Modeling and control of quasi Z-source cascaded H-bridge multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 2016, vol. 90, pp. 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.192>
- Ghodsi M., Barakati M., Wu B. Extended switched-inductor quasi-Z-source inverter: Modeling and prototype realization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2018, vol. 29, e2744. <https://doi.org/10.1002/etep.2744>
- Abdelhakim A., Davari P., Blaabjerg F., Mattavelli P. Analysis and design of the quasi-Z-source inverter for wide range of operation. *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Padua, Italy, 2018, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2018.8458486>
- Gitizadeh M., Nayeripour M., Akrami A. Maximum constant boost control for QZSI in a fuel cell system. *2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, Tehran, Iran, 2012, pp. 7–11, <https://doi.org/10.1109/ICREDG.2012.6190473>

7. Barath N., Soundarrajan A., Stepenko S. et al. Interleaved Single-phase quasi-switched boost and active quasi-z-source inverter. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 874–878, <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088907>

8. Фесенко А. П., Єршов Р. Д., Степенко С. А. Огляд та обґрунтування вибору акумуляторних батарей для автономної системи електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів. *Технічні науки та технології*, 2017, № 1(7), с. 177–186. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/105255>

9. Захарченко Д. С., Степенко С. А. Огляд та обґрунтування вибору накопичувачів електроенергії для роботи електроенергетичних об'єктів", *Технічні науки та технології*, 2020, №4(22), с. 198–209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209)

10. Dao V.Q., Dinh M.C., Kim C.S. et al. Design of an effective state of charge estimation method for a lithium-ion battery pack using extended kalman filter and artificial neural network. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 9, 2634. <https://doi.org/10.3390/en14092634>

11. Захарченко Д.С. Огляд та дослідження методів керування роботою квазі-Z-інвертора підключеного до мережі. Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології сучасного суспільства (HTCC-2021)»: Ч. 1, Україна, Чернівці, 2021, с. 161–163. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/25793>

12. Zhu M., Yu K., Luo F. L. Switched inductor Z-source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, pp. 2150–2158. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2046676>

13. Sahan B., Vergara A. N., Henze N. et al. A single-stage PV module integrated converter based on a low-power current-source inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 2602–2609 <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924160>

14. Xu P., Zhang X., Zhang C. -w. et al. Study of Z-source inverter for grid-connected PV systems, *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, Korea (South), 2006, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/pesc.2006.1712266>

15. DebBarman S., Roy T. Different types of PWM techniques analysis for Z-source inverter, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 3, pp. 9–17. <https://doi.org/10.9790/1676-09340917>

16. Roncero-Clemente C., Husev O., Stepenko S. et al. Interleaved single-phase quasi-Z-source inverter with special modulation technique, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 593–598. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100310>

17. Lakhimsetty S. Simulation of Z-source inverter using maximum boost control PWM technique, *International Journal of Simulation Systems*, 2013, vol. 2, iss. 7, pp. 49–59. <https://doi.org/10.9790/1676-09340917>

18. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O. et al. Maximum boost control for interleaved single-phase Quasi-Z-Source inverter", *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 7698–7703. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217349>

19. Umarania D., Seyezhai Dr.R. Modeling and control of Quasi Z-Source Cascaded H-bridge multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems, *Energy Procedia*, 2016, vol. 90, pp. 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.192>

Дата надходження рукопису
до редакції 10.02 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.1-2.17

UDC 621.314.25:621.316.9:621.311.243

Dmytro ZAKHARCHENKO^{1,2}, Serhii STEPENKO²

Ukraine, Chernihiv, ¹Mine Action Center of the Ministry of Defense
of Ukraine, ²Chernihiv Polytechnic National University
E-mail: dimazakhar@gmail.com, serhii.stepenko@stu.cn.ua

COMPARISON OF MODULATION METHODS FOR QUASI-IMPEDANCE SOURCE INVERTER IN AN AUTONOMOUS POWER SYSTEM WITH ELECTRICAL ENERGY STORAGE

This paper presents a comprehensive study of a modern autonomous power supply system with energy storage devices, focusing on all significant components within the system. Modern inverter control systems are described, highlighting the advantages and disadvantages of each method, the calculation approaches for key parameters, and the proposed implementation of control systems using MATLAB/Simulink software. The modeling of control systems for a two-level quasi-impedance inverter within an autonomous power supply system with energy storage is conducted.

Based on the simulation results for powering a 2 kW AC load (220 V, 50 Hz) using lithium-ion energy storage and various control methods, a comparative table of the main performance indicators of modulation techniques is provided. Under the specified system requirements, the optimal control method is simple boost control (SBC), which offers the best efficiency among the considered techniques while maintaining low total harmonic distortion and a low implementation complexity.

It should be noted, however, that in real-world applications, the choice of modulation technique for a quasi-impedance inverter depends not only on conversion efficiency but also on practical constraints. For example, pulse-width modulation (PWM), the simplest to implement, lacks voltage-boosting capability due to the absence of shoot-through mode, reducing its effectiveness in low-input-voltage systems and potentially degrading output quality under high load. SBC, in turn, is limited by the absence of a zero switching state, increasing stress on passive inverter components. Additionally, the simultaneous activation of all transistors during shoot-through mode leads to higher thermal losses and increased cooling requirements.

The practical application of constant boost control (CBC), which extends the voltage gain range by adding a third harmonic to the modulation signal, is hindered by higher harmonic distortion (up to 6.8%) and the need for additional filtering. Moreover, its implementation is more complex and demands precise parameter tuning for stable operation.

Other techniques, such as maximum boost control (MBC) and maximum constant boost control (MCBC), although capable of achieving the highest voltage gain, introduce significant low-frequency ripples, complicating passive component design, and cause considerable switching losses due to simultaneous key activation. These methods are more suitable for stationary systems with robust cooling and high-quality filtering.

The results of this study can support the justified selection of optimal modulation techniques for autonomous power systems with energy storage devices.

Keywords: energy storage, autonomous power supply system, modulation method, quasi-impedance inverter.

REFERENCES

1. Georgious R., Refaat R., Garcia J., Daoud A. A. Review on energy storage systems in microgrids, *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 17, 2134. <https://doi.org/10.3390/electronics10172134>
2. Annuk A., Yaici W., Lehtonen M. ET AL. Simulation of energy exchange between single prosumer residential building and utility grid. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 6, 1553. <https://doi.org/10.3390/en14061553>
3. Umarani D., Ramalingam Si. Modeling and control of quasi Z-source cascaded H-bridge multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 2016, vol. 90, pp. 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.192>
4. Ghodsi M., Barakati M., Wu B. Extended switched-inductor quasi-Z-source inverter: Modeling and prototype realization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2018, vol. 29, e2744. <https://doi.org/10.1002/etep.2744>
5. Abdelhakim A., Davari P., Blaabjerg F., Mattavelli P. Analysis and design of the quasi-Z-source inverter for wide range of operation. *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Padua, Italy, 2018, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2018.8458486>
6. Gitizadeh M., Nayeripour M., Akrami A. Maximum constant boost control for QZSI in a fuel cell system. *2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, Tehran, Iran, 2012, pp. 7–11, <https://doi.org/10.1109/ICREDG.2012.6190473>
7. Barath N., Soundarajan A., Stepenko S. et al. Interleaved Single-phase quasi-switched boost and active quasi-z-source inverter. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 874–878, <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088907>
8. Fesenko A. P., Yershov R. D., Stepenko S. A. Review and justification of the choice of storage batteries for an autonomous power supply system based on photovoltaic converters. *Technical Sciences and Technologies*, 2017, no. 1(7), pp. 177–186. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/105255> (Ukr)
9. Zakharchenko D., Stepenko S. Review and justification of the energy storage devices selection for electric power facilities operation. *Technical Sciences and Technologies*, 2021, no. 4(22), pp. 198–209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209) (Ukr)
10. Dao V.Q., Dinh M.C., Kim C.S. et al. Design of an effective state of charge estimation method for a lithium-ion battery pack using extended kalman filter and artificial neural network. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 9, 2634. <https://doi.org/10.3390/en14092634>
11. Zakharchenko D. Review and research of methods for controlling the operation of a quasi-Z-inverter connected to the grid. Abstracts of the reports of the II International Scientific and Practical Conference “Novel Technologies of Smart Society (NTSS-2021)”: Part 1, Ukraine, Chernihiv, 2021, pp. 161–163. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/25793> (Ukr)
12. Zhu M., Yu K., Luo F. L. Switched inductor Z-source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, pp. 2150–2158. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2046676>
13. Sahan B., Vergara A. N., Henze N. et al. A single-stage PV module integrated converter based on a low-power current-source inverter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 2602–2609 <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924160>
14. Xu P., Zhang X., Zhang C. -w. et al. Study of Z-source inverter for grid-connected PV systems, *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, Korea (South), 2006, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/pesc.2006.1712266>
15. DebBarman S., Roy T. Different types of PWM techniques analysis for Z-source inverter, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 3, pp. 9–17. <https://doi.org/10.9790/1676-09340917>
16. Roncero-Clemente C., Husev O., Stepenko S. et al. Interleaved single-phase quasi-Z-source inverter with special modulation technique, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 593–598. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100310>
17. Lakhimsetty S. Simulation of Z-source inverter using maximum boost control PWM technique, *International Journal of Simulation Systems*, 2013, vol. 2, iss. 7, pp. 49–59. <https://doi.org/10.9790/1676-09340917>
18. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O. et al. Maximum boost control for interleaved single-phase Quasi-Z-Source inverter”, *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 7698–7703. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217349>
19. Umarania D., Seyezhai Dr.R. Modeling and control of Quasi Z-Source Cascaded H-bridge multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems, *Energy Procedia*, 2016, vol. 90, pp. 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.192>



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).