

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Юлія ЯМНЕНКО  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2020р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальністю \_\_\_\_\_ 171 Електроніка  
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) \_\_\_\_\_ Електронні компоненти і системи

на тему: Зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім  
передаванням енергії

Виконав: студент II курсу, групи ДС-91мп  
(шифр групи)

Гарницький Андрій Вікторович  
(прізвище, ім'я, по батькові) \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник к.т.н, доц. Євген ВЕРБИЦЬКИЙ  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) \_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент к.т.н, доц. каф. АМЕС Олександр ДРОЗДЕНКО  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант  
по нормоконтролю к.т.н, доц. Лариса БАТРАК  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки  
( повна назва )

Кафедра Електронних пристроїв та систем  
( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка  
(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти і системи

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)                      Юлія ЯМНЕНКО  
( прізвище ініціали )

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Гарницький Андрій Вікторович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії

науковий керівник дисертації Вербицький Є.В. к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 05 » листопада 2020 року № 3241-с

2. Термін подання студентом дисертації 8 грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження Зарядний пристрій для акумуляторів електромобілів з можливістю двонаправленої передачі енергії

4. Вихідні дані Максимальна вхідна напруга  $U_{\text{вх, макс}} = 350 \text{ В}$ , потужність комірки перетворювача  $P = 500 \text{ Вт}$ , діюче значення вихідної напруги  $U_{\text{вих}} = 220 \text{ В}$ , Частота перетворювача  $f_s = 60 \text{ кГц}$ , частота мережі  $f_i = 50 \text{ Гц}$ .

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Огляд методів інтеграції електромобіля в глобальну мережу. 2. Огляд роботи перетворювача. 3. Аналіз модульних перетворювачів. 4. Моделювання перетворювачів в середовищі Matlab Simulink. 5. Розроблення стартап-проекту

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій 1. Вербицький Є.В. Гарницький А.В. Зарядний пристрій акумулятора з двостороннім передаванням енергії // Мікросистеми, Електроніка та Акустика – 2020. (прийнято до друку) 2. Вербицький Є. В., Гарницький А. В. Модульний зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. (прийнято до друку)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 28 жовтня 2020 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд літературних джерел за темою дисертації	01.02.2020-01.04.2020	
2.	Огляд методів інтеграції електромобілів в електромережу	01.04.2020-01.05.2020	
3.	Визначення економічної доцільності	01.05.2019-21.05.2020	
4.	Аналіз роботи двонаправлених перетворювачів	21.05.2020-01.07.2020	
5.	Огляд топологій модульних перетворювачів	01.07.2020-01.09.2020	
6.	Моделювання перетворювачів в Matlab Simulink	01.09.2020-01.11.2020	
7.	Розробка стартап-проекту	01.11.2020-01.12.2020	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

А.В. Гарницький  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Є.В. Вербицький  
(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація має загальний обсяг 85 сторінок містить 31 ілюстрацію, 21 таблицю, 1 додаток, 61 джерело.

Метою роботи є розробка універсального зарядного пристрою електромобіля з можливістю двонаправленого передавання енергії, використання якого дозволить ефективно використовувати акумулятори електромобілів, зокрема в рамках концепції V2G (Vehicle to Grid) як накопичувача для організації автономних систем електроживлення.

При розв'язанні поставлених у роботі завдань був проведений аналітичний розрахунків складових частин принципової схеми та моделювання схем перетворювачів в програмному пакеті Matlab Simulink.

У роботі описані перспективи використання акумуляторних батарей електромобілів, зокрема в рамках концепції Vehicle to Grid в якості регуляторів мережі або резервних джерел живлення. Зроблено огляд можливих топологій для зарядного пристрою з двонаправленим передаванням енергії та обрано мостовий перетворювач з м'якою комутацією транзисторів при нульовій напрузі, що має високий ККД, гальванічну розв'язку та можливість корекції форми струму. Проаналізовані режими роботи перетворювача та порівняно його коефіцієнт корисної дії з аналогічним перетворювачем з жорсткою комутацією транзисторів. Обрана модульна топологія перетворювача для підвищення ефективності та надійності перетворювача та проведено дослідження його роботи шляхом моделювання.

Масове використання таких перетворювачів з концепцією Vehicle To Grid дозволить стабілізувати навантаження енергомережі, ліквідувати дефіцит електроенергії в пікові години.

**Ключові слова:** зарядний пристрій електромобіля, двонаправлене передавання енергії, концепція Vehicle to Grid, мостовий перетворювач з м'якою комутацією транзисторів, модульний перетворювач.

## ANNOTATION

The master's thesis was carried out on 85 pages, contains 31 illustrations, 21 tables, 1 appendix, 61 sources.

The aim of the work is to develop a universal charger for electric vehicles with the possibility of bidirectional energy transfer, which lets to use electric car batteries, provided under the concepts of V2G (Vehicle to Grid) as a drive for autonomous power supply systems.

Analytical calculation of the components of the schematic diagram and modeling of the transformation scheme in the Matlab Simulink software package was performed during solving the tasks.

The paper describes promising options for the use of rechargeable battery electric vehicles, within the concept of Vehicle to Grid as regulators of the network or backup power supply. A review of possible topologies for a charger with bidirectional energy transfer was conducted and chosen bridge converter with soft switching of transistors at zero voltage, which has high efficiency, galvanic isolation, and the ability to adjust the shape of the current. The modes of operation of the converters are analyzed and its efficiency is compared with a similar conversion with the rigid commutation of transistors. The modular topology of the converter for an increase of efficiency and reliability of conversion is chosen and research of its work by means of modeling is carried out.

Using such converters with the concept of Vehicle To Grid, it is possible to stabilize a load of power grids and eliminate electricity shortages during peak hours.

**Keywords:** electric car charger, bidirectional power transmission, concept Vehicle to Grid, bridge converter with transistor soft commutation, modular converter

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В ГЛОБАЛЬНУ МЕРЕЖУ .....	8
1.1. Огляд концепцій двостороннього використання електромобілів.....	8
1.2. Взаємодія електромобілів з відновлюваними джерелами енергії .....	12
1.3. Взаємодія електромобіля з електричною мережею.....	14
1.4. Методи реалізації концепції V2G в системах електропостачання .....	15
1.5. Економічна доцільність використання технології V2G.....	18
1.6. Стандартні рівні потужності зарядних пристроїв .....	21
Висновки до першого розділу.....	26
2. ОГЛЯД РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	27
2.1. Вибір топології двонаправленого перетворювача.....	27
2.2. Аналіз режимів роботи перетворювача .....	34
2.3. Розрахунок елементів перетворювача .....	38
Висновки до другого розділу .....	41
3. АНАЛІЗ МОДУЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	42
3.1. Огляд топологій модульних перетворювачів.....	42
3.2. Огляд роботи модульного двонаправленого перетворювача з подвійним активним мостом .....	44
Висновки до третього розділу .....	48
4. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK .....	49
4.1. Моделювання перетворювача постійного струму.....	49
4.2. Моделювання перетворювача змінного струму .....	56
Висновки до четвертого розділу.....	58
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	59
5.1. Опис ідеї проекту .....	61
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	62
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску проекту .....	62
5.4. Розробка маркетингової програми проекту .....	65

Висновки до п'ятого розділу .....	67
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТОК А. Лістинг програмного забезпечення.....	77
ABSTRACT .....	80

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В наші дні існує проблема балансування виробництва та споживання електроенергії, через неможливість виробників миттєво задовольнити потребу споживачів в пікові години навантаження. Існуючі на сьогодні системи акумулювання енергії мають низьку щільність зберігання енергії і їх обслуговування потребує значних затрат. Поступове здешевлення електричних акумуляторів посприяло збільшенню частки електромобілів в транспортному секторі. З розповсюдженням електромобілів велика частина електроенергії буде зберігатися в акумуляторах електромобілів. Оскільки згідно досліджень більшу частину часу приватні транспортні засоби не використовуються, накопичену в їх акумуляторах електроенергію доцільно застосувати для регулювання кривої попиту мережі, до того ж це може принести додатковий дохід власнику електромобіля. Для збільшення ефективності використання акумуляторів необхідно розробити зарядно-розрядний пристрій на основі мостової топології.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація була підготовлена відповідно до науково-дослідного плану кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.

**Мета і завдання досліджень.** Розробка універсального двонаправленого зарядного пристрою, використання якого дозволить ефективно використовувати акумулятори електромобілів, зокрема в рамках концепції V2G (Vehicle to Grid) як накопичувача для організації автономних систем електроживлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести огляд методів реалізації концепції V2G для вибору найкращого методу для інтеграції акумуляторних батарей в системах електропостачання;



- обрати топологію перетворювача для ефективного передавання електричної енергії в обох напрямках;
- розробити закон керування для корекції коефіцієнту потужності;
- обрати кількість комірок для досягнення необхідних параметрів потужності;
- провести моделювання для оцінки технічних показників перетворювача, зокрема коефіцієнту корисної дії та значення коефіцієнту пульсацій.

*Об'єктом дослідження* є зарядний пристрій для акумуляторів електромобілів з можливістю двонаправленої передачі енергії.

*Предметом дослідження* є процес перетворення параметрів електроенергії на основі двонаправленого перетворювача та оцінка ефективності його використання.

**Методи дослідження:** при розв'язанні поставлених у роботі завдань використовувалася теорія електричних кіл, теорія електромагнітної техніки, теорія перетворювальної техніки, був проведений аналітичний розрахунок складових частин принципової схеми та проведено моделювання схем перетворювачів в програмному пакеті Matlab Simulink.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Запропоновано використання модульного перетворювача для зарядного пристрою на основі двонаправленого перетворювача з двома активними мостами та м'якою комутацією;
2. Розроблено закон керування перетворювачем, що дозволяє формувати струм мережі з корекцією коефіцієнту потужності і  $\text{THD} < 5 \%$ .

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблена методика розрахунку коефіцієнта пульсацій як функція від кількості комірок.
2. Розроблено Simulink-моделі модульних перетворювачів на основі реальних моделей транзисторів та діодів та оцінено ККД модульного перетворювача що знаходиться в межах 85-95 %.

**Особистий внесок здобувача** полягає в самостійному огляді відповідної науково-технічної літератури, аналізі обраних топологій перетворювачів, проведенню розрахунків силових частини, моделюванню схем.

**Публікації.** Основні положення та результати магістерського дослідження висвітлено у наступних публікаціях:

1. Вербицький Є.В. Гарницький А.В. Зарядний пристрій акумулятора з двостороннім передаванням енергії. Мікросистеми, Електроніка та Акустика – 2020. (прийнято до друку)
2. Вербицький Є. В., Гарницький А. В. Модульний зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. (прийнято до друку)

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 61 найменування та 1 додатка. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 85 сторінок у тому числі 76 сторінок основного тексту, 31 рисунок та 21 таблиця.

# 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В ГЛОБАЛЬНУ МЕРЕЖУ

## 1.1. Огляд концепцій двостороннього використання електромобілів

Протягом кількох останніх років в транспортному секторі суттєво збільшилася частка електромобілів [1]. Вартість відновлюваних джерел енергії поступово зменшується. Разом з тим існує проблема нерівномірного навантаження енергомережі і дефіцит електроенергії в пікові години.

Вирішити цю проблему можна завдяки концепції, що передбачає підключення автомобіля до енергосистеми для його заряджання (Grid to vehicle concept – G2V) і для віддачі електроенергії назад в мережу (Vehicle to grid concept – V2G) [2, 3]. На рис. 1.1 зображена блок-схема концепції V2G.

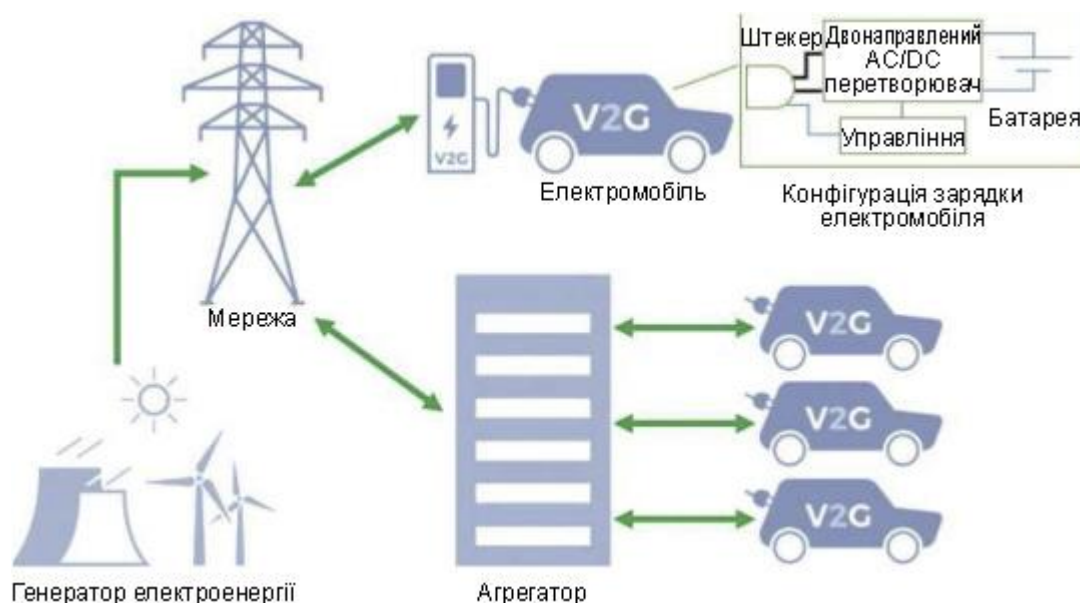


Рис.1.1. Блок-схема концепції V2G

У власників автомобілів з технологією V2G є можливість продавати електроенергію в години коли машина не використовується і заряджати її в години коли вартість електроенергії найменша [4]. Дослідження показали, що транспортні засоби не використовуються більше 90 % часу. Тому в цей час

батареї електромобілів можуть використовуватися для обслуговування ринків електроенергії без шкоди для їхньої основної транспортної функції.

V2G є корисною як для споживача, так і для постачальника енергії. Ця концепція може забезпечити резервне енергопостачання, згладжування кривої попиту, балансування навантаження, зменшення негативного впливу вищих гармонік мережі, а також підвищити надійність прогнозів навантажень. Вона також дозволяє обмеження максимумів навантаження (обмеження навантаження в піковий час), ефективне використання поточної виробничої потужності, зменшення витрат на енергосистему, покращення характеристик навантаження, покращення частотного контролю енергосистеми, швидке відновлення електроживлення у випадку знеструмлення основної мережі. У концепції smart grid електромобіль може стати важливою частиною мережі і діяти як розподілене джерело електроенергії, забезпечити зберігання та підтримку стабільності мережі і сприяти скороченню викидів CO<sub>2</sub> [5, 6].

Стратегія енергопостачання V2G може мінімізувати приріст виробництва електроенергії та скоротити інвестиції в інфраструктуру. Але для цього потрібно вирішити проблему регулювання та планування накопиченої енергії в електромобілях та інших джерелах енергії.

Існує два способи вирішення цієї проблеми: перший полягає в тому, що енергосистема безпосередньо регулює кожен підключений до мережі електромобіль та інші енергоблоки, однак цей метод ускладнить ситуацію і рішення розглядається з точки зору мережі, але без врахування користувача.

Другий метод полягає у побудові проміжної системи, тобто агрегатора між електромережею та групами електромобілів. Система агрегаторів може організувати електромобілі підключені до мережі в певному регіоні, в цілу службу, яка підпорядковується єдиній диспетчерській електромережі. Мережі не потрібно знати деталі кожного електромобіля, а диспетчерські сигнали надсилаються кожному агрегатору [7].

Перед власниками електромобілів постають ризики, пов'язані з використанням акумуляторів. Третину загальної вартості електромобіля

складає вартість акумулятора. Акумулятори електромобілів мають термін служби 1000 циклів і в процесі використання, через незворотну хімічну реакцію їх ємність зменшується. Отже, постійне заряджання і розряджання акумуляторів скорочує термін їх служби. Тому власники мають продавати накопичену енергію коли попит на неї достатньо високий, щоб повернути собі витрати. Окрім цього рекомендується уникати глибокого циклу розряду, оскільки він є згубним для акумулятора. Рівень погіршення стану батареї також залежить від типу батареї, яка використовується в електромобілях, швидкості зарядки та розрядки, температури та напруги [8].

Високі інвестиційні витрати також є однією з основних проблем, що виникають на шляху впровадження V2G. Технологія потребує оновленої системи живлення, для її реалізації слід вдосконалити апаратну та програмну інфраструктуру. Кожен електромобіль, який бере участь у системі V2G потребуватиме двонаправлений зарядний пристрій, який має складний контролер та кабель високої напруги, що також створює додаткові вимоги по безпеці.

Також електромобілям не можна давати доступ до мережі вільно і некеровано. Це може завдати серйозної шкоди енергомережі, у випадку якщо велика кількість електромобілів потребує зарядки в періоди пікового навантаження. Оскільки V2G потребує розумної мережі для контролю та обслуговування, існує підвищений ризик кібератак. Необхідно дослідити технологію V2G, для координації зарядки і розрядки між транспортними засобами та мережею, щоб вона не впливала на роботу енергомережі та не обмежувала нормальне використання електромобілів [9, 10].

Технологія V2G включає в себе концепції vehicle-to-home (коли електромобіль знаходиться біля будинку) або vehicle-to-building (коли електромобіль знаходиться біля офісного або промислового приміщення). В цих випадках батарея може використовуватися для живлення навантаження. Заряд акумулятора використовується для забезпечення потреб будинку без передачі енергії в електричну мережу, але з використанням її для резервних

систем електроживлення, які можуть застосовуватися під час відключення електроенергії. Наприклад, якщо електромобіль може виробляти декілька кіловат безперервної потужності, його власник може запускати свої електричні прилади такої потужності під час відключення електроенергії.

У табл. 1.1 наведено порівняння між V2G, V2H за різними параметрами, включаючи ключові моменти, основні фактори та функції [11].

Таблиця 1.1

Порівняння концепцій V2G та V2B

	Ключові моменти	Основні фактори	Функції
V2G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Велика кількість електромобілів</li> <li>• Більша гнучкість</li> <li>• Комплексний контроль</li> <li>• Експлуатація у великих масштабах</li> <li>• Значні втрати при передачі</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Контроль та координація від оператора мережі</li> <li>• Кількість агрегаторів</li> <li>• Ємність акумулятора</li> <li>• Час прибуття та виїзду</li> <li>• Вартість електроенергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Підтримка реактивної потужності</li> <li>• Робота з відновлюваними джерелами</li> <li>• Повернення накопиченої енергії назад до мережі в пікові години</li> <li>• Допоміжні послуги мережі</li> </ul>
V2B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Проста інфраструктура</li> <li>• Незначні втрати при передачі</li> <li>• Більша простота</li> <li>• Один електромобіль</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Тип акумулятора</li> <li>• Характеристики ємності акумулятора</li> <li>• Стан заряду</li> <li>• Вартість електроенергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Діє як домашній резервний генератор з контрольованим навантаженням</li> </ul>

Основними компонентами системи V2G є: система управління батареями, панель контролю заряду акумулятора, система фонових керування V2G і центр керування V2G. До їх функцій відносяться:

1) Центр управління V2G на основі частоти енергосистеми і потужності виробництва нової енергії в режимі реального часу формує дані про стан мережі і відправляє їх на кожен фонову систему управління V2G.

2) Система управління акумулятором надає дані про максимальний струм зарядки і розрядки, поточну потужність і напругу батареї, дозвіл на зарядку і розрядку, а також іншу інформацію до системи фонових керування V2G.

3) Власник транспортного засобу на панелі контролю акумулятора електромобіля вводить інформацію про нижню межу стану заряду акумулятора і доступний час, ця інформація також відправляється до системи фоновому управління V2G.

4) Після отримання інформації система фоновому управління V2G обирає транспортні засоби і потужності згідно зі стратегією зарядки і розрядки, контролює інформацію про роботу всіх зарядних пристроїв і повертає її назад в центр управління V2G [12].

## **1.2. Взаємодія електромобілів з відновлюваними джерела енергії**

Відновлювані джерела, робота яких залежить від умов навколишнього середовища (сонячна, або вітрова енергетика), не є постійними джерелами, тому виробництво ними енергії може не збігатися зі щоденним піковим використанням.

Цей переривчастий характер може дестабілізувати електричну мережу та призвести до низьких оптових цін на відновлювані джерела енергії. Рентабельність таких джерел є невисокою і потребує значних інвестицій, аби зробити їх прибутковими.

Допомогти оптимізувати систему, підвищити її ефективність та відстрочити продаж електроенергії можуть системи акумулювання енергії. Вони накопичуватимуть енергію в години, коли попит на неї низький і віддаватимуть її тоді, коли попит зросте. Наразі в електроенергетиці використовують акумулюючі системи, які запасують механічну і теплову енергію. Для зберігання механічної енергії застосовують резервуари зі стиснутим повітрям, а для теплової – резервуари з перегрітою водяною парою [13]. Широкого застосування подібні системи не отримали через високу вартість будівництва та обслуговування. Найпоширенішими серед систем зберігання енергії є гідроакumuлюючі станції (ГАЕС). Вони здатні акумулювати у верхньому напірному гідробасейні енергію води, котра тривалий час може

зберігати Гігаватт-години електроенергії, що перевищує в сотні разів будь-які інші відомі на сьогодні системи акумулювання енергії. Недоліком таких систем є надзвичайно низька щільність зберігання енергії, станції мають великі розміри і потребують значних капіталовкладень [14].

В якості альтернативи системам, що акумулюють механічну і теплову енергію, пропонується використання технології V2G, в якій об'єднані в глобальну мережу акумуляторні батареї електромобілів використовувалися б у якості носія для зберігання енергії. Потрібно лише, щоб достатня кількість електромобілів, що підтримують технологію V2G одночасно були підключено до мережі в потрібний час. В деяких регіонах (наприклад у Данії, де 20 % потреб у електроенергії можна задовольнити енергією вітру), є випадки, коли мережа не може акумулювати всю енергію вітроелектростанцій при сильних поривах вітру. Так само, непередбачувана відсутність вітру може спричинити дефіцит доступної енергії. Підключений до електромережі транспортний засіб може працювати, як розподілений накопичувач для надлишку і дефіциту відновлювальної енергії. Якщо електромобіль з надлишковою енергетичною потужністю залишається підключеним до електромережі протягом пікового періоду енергоспоживання, його накопичена відновлювальна енергія може подаватися до мережі швидко, потенційно зменшуючи потребу в додаткових пікових електростанціях. Заряджати електромобіль доцільніше в періоди низького попиту на електроенергію, наприклад вночі, тим самим згладжуючи криву навантаження системи. Технологія V2G потенційно може дозволити синергетичну роботу як електромобілів, так і відновлювальних джерел енергії, тим самим посприяти збільшенню їхньої частки на ринку. Перевагою такої системи накопичення енергії є нижча собівартість, оскільки використовуються акумулятори, обслуговуванням яких займаються безпосередньо їхні власники.

Для цього потрібно використовувати спеціальні двонаправлені зарядні пристрої, які повинні мати широкий параметр вхідної напруги, корекцію коефіцієнта потужності вхідного струму, відбирання максимальної потужності від відновлюваних джерел енергії та високу енергетичну ефективність. Однак є



обмеження, які перешкоджають роботі транспортних засобів з відновлюваними джерелами енергії. Хоча наразі серед усіх відновлюваних енергій сонячна є найпоширенішою, досі не вдалося досягти ефективності фотоелементів більше 20 %, до того ж ємності сучасних акумуляторів електромобілів не вистачає для зберігання вихідної потужності зарядної станції навіть у зимовий день [15].

### **1.3. Взаємодія електромобіля з електричною мережею**

Існує три основні категорії підтримки мережі, для яких V2G може бути корисним. Перша – забезпечення пікової потужності. В даний час генерування додаткової енергії в години пікового навантаження є обов'язком комунальних підприємств. Вони повинні швидко реагувати на попит, за рахунок електростанцій, які можна швидко увімкнути, або вимкнути. Таку функцію можуть виконувати газотурбінні, або гідроелектростанції. Оскільки пікова потужність, як правило, потрібна лише кілька сотень годин на рік, а обслуговування електростанцій потребує значних затрат, вироблена ними електроенергія є найдорожчою серед усіх [16]. Якщо ж для забезпечення пікової потужності використовувати акумулятори транспортних засобів, заряджати їх в непікові періоди, а потім розряджати вибірково, щоб «згладити пік», комунальне підприємство могло б потенційно відмовитись від необхідності запускати пікове обладнання, що дозволить заощадити на експлуатації та технічному обслуговуванні і принести значні екологічні вигоди. Пікові електростанції іноді використовують лише кілька годин на рік. Комунальні підприємства мають можливість прогнозування для планування пікових навантажень (переважно влітку через навантаження на кондиціонери). Можливість активувати розподілене сховище, порівняно із традиційними активами реагування на попит, забезпечує економічно вигідну та чисту альтернативу дорогим та капіталомістким піковим генераторам.

Друга категорія – система V2G, що забезпечує робочий резерв. Робочий резерв – це генеруюча потужність, яка доступна для роботи в короткочасному

режимі у випадках виходу з ладу генератора або інших порушень в електропостачанні. Працюючі резервні установки повинні мати швидкий час спрацьовування, надійне електропостачання і зазвичай використовуються на короткий термін; ці критерії точно відповідають можливостям акумуляторів транспортних засобів [17].

Третя категорія – автоматичне управління генерацією, або просто – регулювання. Використовується для точної настройки частоти та напруги мережі шляхом узгодження генерації з попитом навантаження. Регулювання повинно здійснюватися під безпосереднім контролем оператора мережі в режимі реального часу, при цьому генеруючий блок може приймати сигнали від комп'ютера оператора мережі і має реагувати протягом хвилини або менше, збільшуючи або зменшуючи потужність генератора. Деякі ринки розподіляють регулювання на два елементи: один для здатності збільшити вироблення електроенергії з базового рівня, а інший - для зменшення від базового рівня. Вони зазвичай називаються відповідно "регулювання вгору" та "регулювання вниз". При роботі на такі ринки в конкретні моменти часу акумулятори електромобіля будуть заряджатися, або розряджатися і зазвичай передбачити ці моменти складно. Порівняно із системами що забезпечують робочий резерв, регулювання використовує ресурси учасників ринку набагато частіше (скажімо 400 разів на день), вимагає швидшої реакції і працює коротший час (як правило кілька хвилин). Акумулятори електромобілів ідеально підходять для роботи в такому режимі [18].

#### **1.4. Методи реалізації концепції V2G в системах електропостачання**

Через різне використання та різні режими живлення існують різні методи реалізації V2G. Два основні методи зарядки: централізований та децентралізований. На рис. 1.2 показана типова схема централізованого та децентралізованого управління.

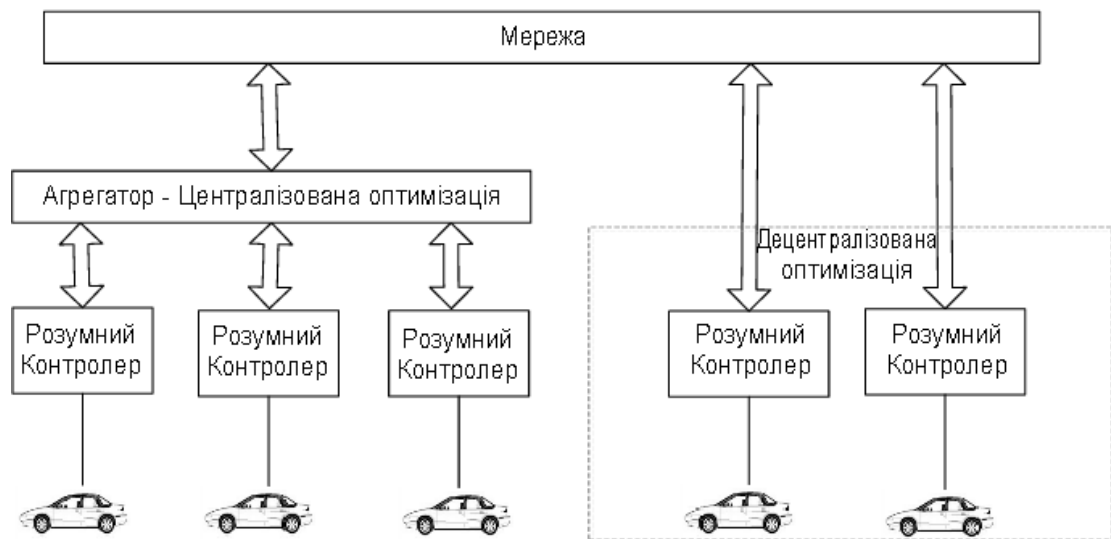


Рис.1.2. Централізована та децентралізована архітектура управління

Так званий централізований метод передбачає керування зарядкою електромобілів агрегаторами. Регулювання пікового навантаження для зарядки електромобілів здійснюється за допомогою координації мереж та зарядних станцій. Коли електромобіль підключений до зарядного пристрою, смарт-блок завантажує поточний стан заряду (SOC), тип акумулятора та загальну ємність акумулятора в агрегатор. Тим часом користувач електромобіля повинен встановити час підключення та очікуваний стан заряду. Відповідно до потреб мережі, агрегатор визначає оптимальний графік заряджання/розряджання кожного електромобіля за допомогою конкретних стратегій управління, цим можна досягти загальної оптимізації, гарантувати низькі втрати та оптимальне використання енергії в певному регіоні [19].

Часто електромобілі територіально розташовані так, що неможливо керувати їх зарядкою централізованим методом. Тоді застосовується розумне зарядне обладнання, яке в залежності від вартості, попиту на реактивну потужність, електричних характеристик, включаючи коливання напруги і власний стан заряду акумулятора може виконувати оптимальне локальне планування та автоматично реалізовувати V2G [20]. Характеристики енергетичного навантаження і кількість електромобілів в кожному регіоні різні, тому єдиного планування тут не може бути. Коли електромобіль підключений

до зарядного пристрою, розумний контролер збирає інформацію про батарею. В той самий час, користувач електромобіля повинен встановити час підключення та мінімальний очікуваний стан заряду акумулятора. Для користувача є важливим дотримання встановлених параметрів, оскільки у випадку використання автомобіля до обраного моменту часу заряд акумуляторної батареї може виявитися недостатнім для здійснення поїздки. Незважаючи на те, що централізованим підходом можна легше досягти оптимальних показників як для постачальника електроенергії, так і для власника електромобіля, його застосування може бути непрактичним, оскільки електромобілі не можуть самостійно контролювати процеси зарядки/розрядки. Тому в реальних системах децентралізоване рішення є кращим [21]. Порівняння переваг та недоліків в централізованому та децентралізованому методі наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Переваги та недоліки централізованого та децентралізованого методу управління V2G

	Переваги	Недоліки
Централізований	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Максимізуйте дохід для постачальника та електромобіля</li> <li>• Ефективно контролюйте енергію та допоміжні послуги</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Складна і дорога комунікаційна інфраструктура</li> <li>• Потрібен потужний центральний контролер та резервне сховище даних</li> <li>• вимагає повної інформації від електромобіля</li> <li>• Рішення контролюється постачальником</li> <li>• Повинен мати можливість обробляти велику кількість даних одночасно</li> <li>• Конфіденційність електромобіля може бути вразливою</li> <li>• Може затримуватися, або перериватися через перевантаження системи або кібератаки</li> </ul>
Децентралізований	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Здатний адаптуватися до великої кількості електромобілів</li> <li>• Потрібно менше комунікацій та інфраструктури</li> <li>• Заряд/розряд контролюється електромобілем</li> <li>• Покращена стійкість до несправностей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Потребує ефективних децентралізованих рішень управління для електромобілів</li> <li>• Електромобілі повинні знаходити підходи для захисту електромобілів від кібератак</li> </ul>

Ще один метод передбачає заміну батареї, він подібний до принципу централізованого V2G, але з іншою стратегією управління. Зарядні станції мають велику кількість акумуляторів, частина із яких має бути заряджена повністю, електромобілі можуть за лічені хвилини замінити батарею замість її зарядки. Цей метод V2G може значною мірою задовольнити план попиту на планування мережі, одна потребує розробки єдиних стандартів для акумуляторів та інтерфейсів зарядки, що в умовах конкуренції на ринку досягти досить непросто [22, 23].

### 1.5. Економічна доцільність використання технології V2G

Проаналізуємо доцільність використання концепції V2G на прикладі найбільш розповсюдженого електромобіля Nissan Leaf.

Експлуатаційний пробіг електромобіля на одній акумуляторній батареї складає 160000 км і забезпечується певною кількістю циклів заряду/розряду акумулятора. В процесі свого використання батарея деградує і, відповідно, зменшується запас ходу, а також здатність бути потенційним регулятором мережі [24]. Графік зниження ємності батареї електромобіля протягом періоду використання зображений на рис. 1.3, а в табл. 1.3 – представлена динаміка регулювальної здатності батареї при середньому пробігу 40 км/доба.

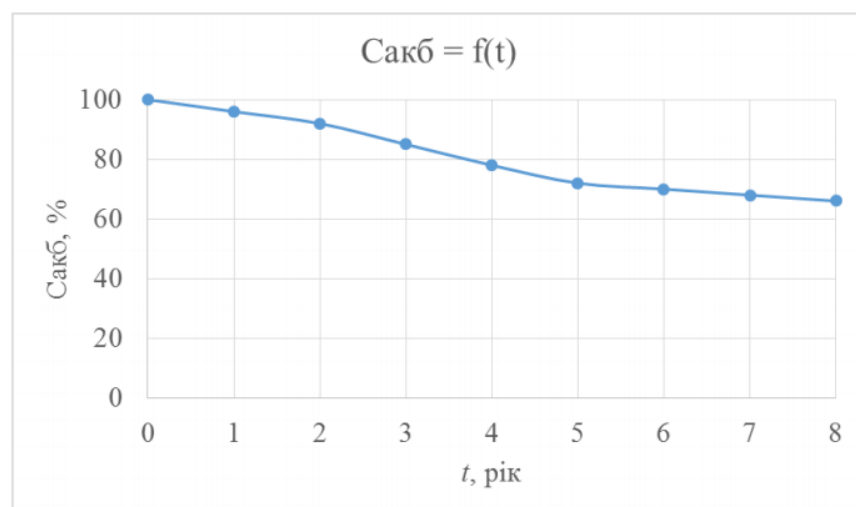


Рис.1.3. Динаміка зниження ємності батареї електромобіля

Динаміка регулювальної здатності батареї електромобіля Nissan Leaf 2013/2017 при середньому пробігу 40 км/доба

Рік	0	2	4	6	8
Ємність, %	100	92	78	70	66
Запас ходу, км	160/ 250	147/ 230	125/ 195	112/ 175	106/ 165
Ємність, кВт·год	24/ 30	22,1/ 27,6	18,7/ 23,4	16,8/ 21	15,8/ 19,8
Залишкова регулювальна здатність, кВт·год	15,6/ 22,2	1,39/ 20	10,8/ 16,3	9,1/ 14,1	8,3/ 13

Регулювальна здатність батареї автомобіля залежить від терміну експлуатації та щоденного пробігу. Максимальною вона є в перші роки, а потім поступово зменшується [25].

Для власників електромобілів, що заряджають акумулятори переважно вночі, доцільним є використання багатозонного лічильника електроенергії. Це дає змогу здійснювати розрахунок спожитої електроенергії за диференційованим тарифом. Залежно від того, власним зарядним пристроєм чи публічною станцією буде користуватися водій, тарифікація може відрізнятися, оскільки тарифи на електроенергію для фізичних і юридичних осіб є різними. Для електромобілів Nissan Leaf вартість акумуляторних батарей складає приблизно 200 \$/кВт·год. Ресурс батареї становить 160000 км, протягом якого витрачається 24000 кВт·год електроенергії. При цьому середня вартість складає:

- для фізичних осіб

$$C_{\text{сер.нас}} = 24000 \cdot 1,68 = 40320 \text{ грн,}$$

- для юридичних осіб

$$C_{\text{сер.юо}} = 24000 \cdot 1,97 = 47280 \text{ грн.}$$

Розрахуємо прибуток, який можна отримати застосовуючи технологію V2G щоденно при середньодобовому пробігу 40 кілометрів. Візьмемо середньозважене значення ємності батареї 85 %

$$24 \cdot 0,85 = 20,4 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Питома витрата енергії при їзді складає 0,15 кВт·год/км. Відповідно за день витрататиметься

$$40 \cdot 0,15 = 6 \text{ кВт.}$$

Енергію, що залишається, можна віддати назад в мережу.

$$20,4 - 6 = 14,4 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

При використанні ресурсу батареї по максимуму (в такому випадку термін експлуатації акумулятора становитиме приблизно 1200 діб), заряджаючи її лише в години, коли діє нічний тариф і розряджаючи в пікові години, прибуток складе:

- при заряджанні і розряджанні електромобіля за тарифом фізичних осіб:

$$\Delta \text{ПЗ.1} = (C_{\text{нас}} \cdot K_{\text{пik3}} - C_{\text{нас}} \cdot K_{\text{нiч3}}) W_{\text{доб,рег}} \cdot N_{\text{дiб}} = (1,68 \cdot (1,5 - 0,4)) \cdot 14,4 \cdot 1200 = 31935 \text{ грн.}$$

- при заряджанні за тарифом для фізичних осіб і розряджанні за тарифом юридичних осіб:

$$\Delta \text{ПЗ.2} = (C_{\text{юо}} \cdot K_{\text{пik3}} - C_{\text{нас}} \cdot K_{\text{нiч3}}) W_{\text{доб,рег}} \cdot N_{\text{дiб}} = (1,97 \cdot 1,8 - 1,68 \cdot 0,4) \cdot 14,4 \cdot 1200 = 49607 \text{ грн}$$

- при заряджанні і розряджанні за тарифом юридичних осіб

$$\Delta \text{ПЗ.3} = (C_{\text{юо}} \cdot K_{\text{пik3}} - C_{\text{юо}} \cdot K_{\text{нiч3}}) W_{\text{доб,рег}} \cdot N_{\text{дiб}} = (1,97 \cdot (1,8 - 0,25)) \cdot 14,4 \cdot 1200 = 52705,8 \text{ грн.}$$

Батарея електромобіля вважається відпрацьованою коли її ємність складає 60-70 % (14,4 – 16,8 кВт·год), але при цьому її ще протягом трьох років використовувати в якості децентралізованого джерела активної потужності для обмеження навантаження енергосистеми в піковий час.

Це може принести власнику додатковий прибуток, а саме:

- при роботі за тарифом для фізичних осіб

$$\text{П}_{\text{нас.АКБ}} = ((14,4 \dots 16,8) \cdot (1,5 - 0,4)) \cdot 1,68 \cdot 365 \cdot 3 = 29139 \dots 34000 \text{ грн.}$$

- при роботі за тарифом для юридичних осіб

$$\text{П}_{\text{юо.АКБ}} = ((14,4 \dots 16,8) \cdot (1,8 - 0,25)) \cdot 1,97 \cdot 365 \cdot 3 = 48148 \dots 56172 \text{ грн.}$$

Зважаючи на отримані цифри, можна дійти висновку, що за 3-3,5 роки використання батареї за технологією V2G, витративши її ресурс, можна покрити 30-40 % її вартості, яка складає 4800 \$. А при додатковому використанні ще протягом трьох років, вигода буде співрозмірною, або навіть більшою ніж при використанні батареї за її основним призначенням. Отже комбіноване використання батареї, хоч і не покриє повної вартості батареї, але може принести власникам додаткові кошти на придбання нової. Зважаючи на поступове здешевлення батарей електромобілів та підвищення тарифів на електроенергію, з часом термін окупності батареї може скоротитися і в майбутньому вартість згенерованої електроенергії зможе повністю компенсувати витрати на придбання батарей [26, 27]. Виходячи з цього можна дійти висновку, що використання технології V2G є доцільним з економічної точки зору.

### **1.6. Стандартні рівні потужності зарядних пристроїв**

Для зарядки чи розрядки енергії задіяні три системні компоненти: місце, де електромобіль приєднується до електричної мережі, обладнання живлення електромобіля, до якого підключається транспортний засіб, акумулятор для електромобіля з системою контролю заряду.

Місце, де електромобіль приєднується до електричної мережі, може бути будинком власника, парковкою або громадською зарядною станцією. Електромобілі можуть живитися від джерел постійного і змінного струму на різних рівнях потужності. Кожен електромобіль може мати кілька компонентів для керування і регулювання швидкості зарядки акумулятора. Всі ці компоненти грають певну роль в визначенні режимів роботи і функціональності. Товариство автомобільних інженерів встановило рівні зарядки змінного і постійного струму, як показано в табл. 1.4. і на рис. 1.4 [28].



Рівні потужності зарядних пристроїв

Зарядний пристрій змінного струму	Зарядний пристрій постійного струму
Mode 1: 120 В, однофазний, максимум 16 А, максимум 1.9 кВт	Mode 1: 200-450 В, максимум 80 А, максимум 19.2 кВт
Mode 2: 240 В, однофазний, максимум 80 А, максимум 19.2 кВт	Mode 2: 200-450 В, максимум 200 А, максимум 90 кВт
Mode 3: підлягає визначенню, може бути трифазним	Mode 3: підлягає визначенню, може охоплювати 200-600 В, максимум 400 А, максимум 240 кВт

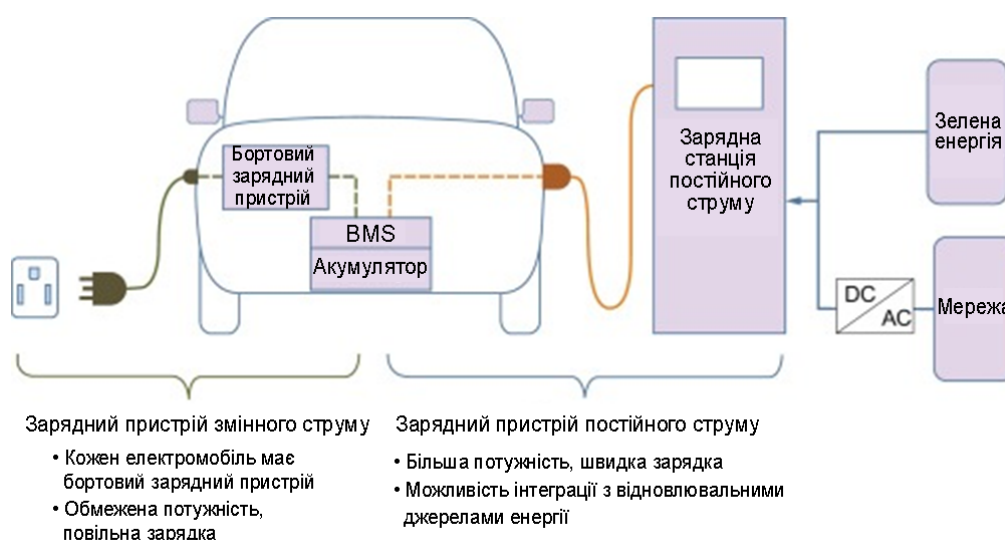


Рис.1.4. Базова структура зарядних пристроїв

Для зарядки змінним струмом потрібен вбудований інвертор живлення та система управління акумулятором. Однак при зарядці постійним струмом перетворення змінного струму виконується зовнішнім пристроєм. Зарядка змінного струму має менші можливості передавання енергії порівняно із зарядкою постійного струму.

Рівень 1 зарядки змінного струму є найосновнішим режимом зарядки електромобілів в Північній Америці, оскільки типові номінали напруги в мережі становлять 110 – 120 В, при максимальному струмі 16 А. Рівень зарядки змінним струмом 1 є значно довшим, порівняно з іншими режимами. Таким чином, очікується що більшість власників електромобілів використовуватимуть зарядку рівня 2. Через дуже низький рівень передачі потужності, що здатний

підтримувати рівень 1 змінного струму, та повну відсутність можливостей контролю та моніторингу, додаток V2G не є доступним на таких пристроях.

Рівень 2 зарядки змінним струмом є основним та найкращим методом для приватних і державних установ. Він визначає однофазний струм з напругою від 220 до 240 В з максимальною потужністю 19,2 кВт. Більші напруги дозволяють швидше заряджати електромобіль.

Роз'єм SAE (J1772) дозволяє подавати струм до 80 А. Коли електромобіль підключений, його система управління акумулятором визначає необхідний заряд і, відповідно, постачає струм від обладнання електромобіля. Очікується, що більша частина зарядки буде здійснюватися через зарядку рівня 2, оскільки завдяки загальнодоступній вхідній потужності та сумісності із програмами, що дозволяють користувачам контролювати зарядку, стає можливим застосування концепції V2G. Система керування батареєю відіграє головну роль при розряді батареї, вона відповідає за відстеження стану заряду батареї, загальний стан батареї та елементів і контролює максимальний рівень потужності інвертора [29]. Схема конфігурації зарядки змінним струмом рівня 2 показана на рис. 1.5.



Рис.1.5. Схема зарядки змінного струму рівня 2

Зарядка рівня 2 постійного струму може використовуватися в комерційних та громадських установах, оскільки вона призначена для роботи аналогічно комерційним автозаправним станціям. Швидка зарядка постійним

струмом може забезпечити приблизно 80 % заряду за 30 хвилин. Швидка зарядка постійним струмом використовує зовнішній зарядний пристрій для перетворення змінного та постійного струму. Вбудована система управління батареєю автомобіля контролює зовнішній зарядний пристрій, подаючи струм на акумулятор, а при розряді контролює вихід акумулятора [30].

Схема конфігурації зарядки змінним струмом рівня 2 показана на рис. 1.6.

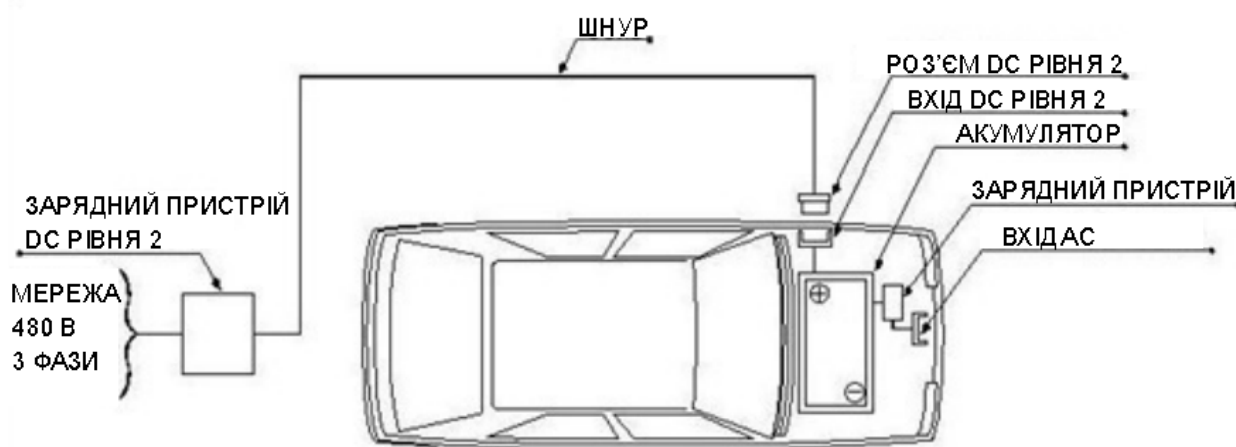


Рис.1.6. Схема зарядки постійного струму рівня 2

Зовнішній зарядний пристрій обслуговується трифазною мережею змінного струму на 208, 240, 380, 480, або 575 В. Зі збільшенням ємності акумулятора очікується, що потужність зарядного пристрою постійного струму також збільшиться, а час перезарядки зменшиться.

Використання накопиченої енергії в електромобілях вимагає обладнання та сервісу, які мають бути комплексно об'єднаними.

Акумулятор електромобіля, з'єднаний з обладнанням електромобіля, діє як змінне навантаження. Обладнання для зарядки електромобілів відіграє роль аналогічну фотоелектричній системі. Істотною відмінністю обладнання V2G є здатність забезпечувати двонаправлений потік енергії, щоб електромобілі могли заряджатися і розряджатися. Обладнання для електромобіля представляє інтерфейс між електричною мережею та електромобілем. Регулятори напруги та частоти електромобіля визначають напрям струму. Якщо в електромобілі

немає бортового лічильника для вимірювання спожитої та виробленої електроенергії за допомогою електромобіля, для проведення необхідних вимірювань може бути використаний побутовий лічильник електроенергії [31].

Концепція V2H або V2B простіша в реалізації, оскільки інтерфейс зворотного живлення з локальною електричною мережею не потрібен. Обладнання електромобіля може забезпечувати живлення від електромобіля місцевого навантаження. Акумулятор електромобіля може бути використаний в якості резервного джерела в разі раптового відключення електроенергії в мережі [32]. Ситуація, коли будинок відключається від глобальної електромережі, але його внутрішня система продовжує забезпечувати електропостачання називається острівкування. Вона може бути небезпечною для працівників комунальних служб, які можуть не знати що певний острів залишається під напругою, і це може призвести до автоматичного повторного з'єднання пристроїв. Тому при проектуванні такої системи слід передбачити обладнання та процедури, необхідні для повернення живлення від електромережі після її відновлення [33].

Для реалізації цієї концепції потрібно розробити універсальний зарядний пристрій. Двонаправлений зарядний пристрій повинен мати функцію заряджання акумулятора електромобіля з мінімальним виробленням гармонічного струму, а також має бути здатним передавати енергію назад до мережі [34]. Як правило двонаправлений зарядний пристрій складається з фільтра, двонаправленого перетворювача постійного струму та змінного струму. Коли зарядний пристрій перебуває в режимі зарядки акумулятора змінний струм має спочатку бути відфільтрованим, для видалення частотної складової, потім перетворений зі змінного в постійний, а після цього перетворений до відповідної зарядної напруги, оскільки вихідна напруга перетворювача може не збігатися з напругою акумулятора. Коли перетворювач працює в режимі розрядки, процес відбувається навпаки [35].

## **Висновки до першого розділу**

Поступове здешевлення вартості акумуляторних батарей та збільшення частки електромобілів в транспортному секторі відкрило можливості для регулювання кривої навантаження електромережі за допомогою енергії накопиченої в батареях електромобілів. Рядом компаній були розроблені принципи інтеграції електромобілів в централізовану мережу згідно концепції V2G, або автономну згідно концепції V2B. Завдяки використанню акумуляторів електромобілів можна буде балансувати навантаження, згладжувати криву попиту, забезпечувати резервне енергопостачання, а власник електромобіля зможе також заробити на використанні свого акумулятора. Проведений огляд існуючих методів двостороннього використання електромобіля та оцінена економічна доцільність такого використання.

## 2. ОГЛЯД РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

### 2.1. Вибір топології двонаправленого перетворювача

Як інтерфейс між електромобілем та мережею, двонаправлений перетворювач повинен відповідати певним основним вимогам, як транспортного засобу так і електромережі. Структурна схема універсального двонаправленого перетворювача зображена на рис. 2.1.

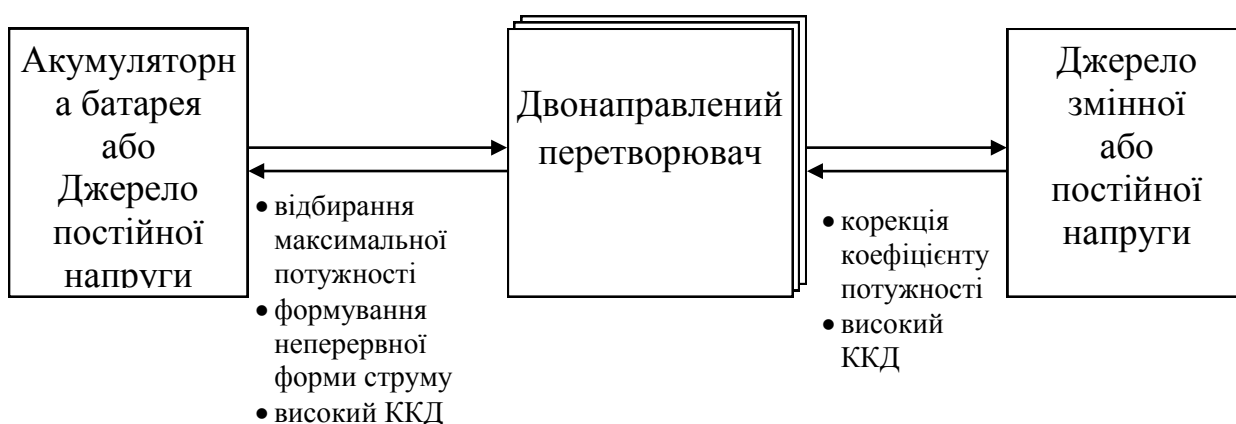


Рис.2.1. Структурна схема двонаправленого перетворювача

Метою вибору топології є прагнення отримати ефективний перетворювач з якомога меншими габаритними розмірами та вартістю.

Всі топології двонаправлених перетворювачів можна розділити на дві категорії: неізолювані та ізолювані [36].

Неізолювані перетворювачі підходять для застосування там, де не потрібні високі коефіцієнти передачі напруги між входом і виходом. Перетворювачі цієї групи мають просту структуру та просту в реалізації систему управління.

Першою топологією є інвертуючий (неізолюваний зворотноходовий) перетворювач (рис. 2.2).

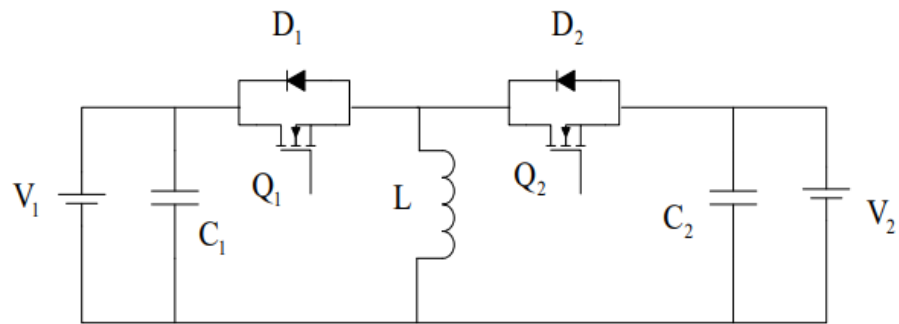


Рис. 2.2. Інвертуючий перетворювач

В режимі прямої роботи ключ VT2 закритий, а керування відбувається ключем VT1, в режимі зворотної роботи, ключ VT1 закритий, а ключем VT2 керують. Задля уникнення перехресної провідності через перемикачі та вихідну ємність при переходах режиму забезпечується невелика пауза. Варто зазначити, що вихідна напруга має протилежну полярність відносно вхідної, що не завжди допустимо, вирішити цю проблему можна включивши додаткові транзистори, як на рис. 2.3 [37].

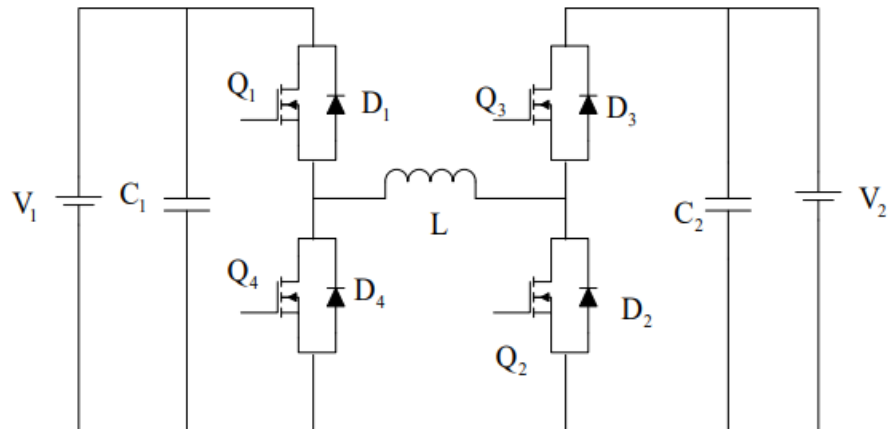


Рис. 2.3. Каскадний перетворювач

Схема перетворювача на рис. 2.3 отримана шляхом каскадного включення понижуючого перетворювача з підвищуючим, така топологія є найбільш гнучкою, оскільки може підвищувати і понижувати напругу в обох напрямках, але більша кількість транзисторів призводить до більших втрат при перемиканні і складнішим алгоритмом керування.

Двонаправлений перетворювач Чука (Рис. 2.4) по суті є послідовним з'єднанням підвищуючого і понижуючого перетворювачів з накопичувальним конденсатором, тому він може підвищувати, або понижувати напругу в обох напрямках. Має низький рівень пульсацій вхідного і вихідного струмів [38].

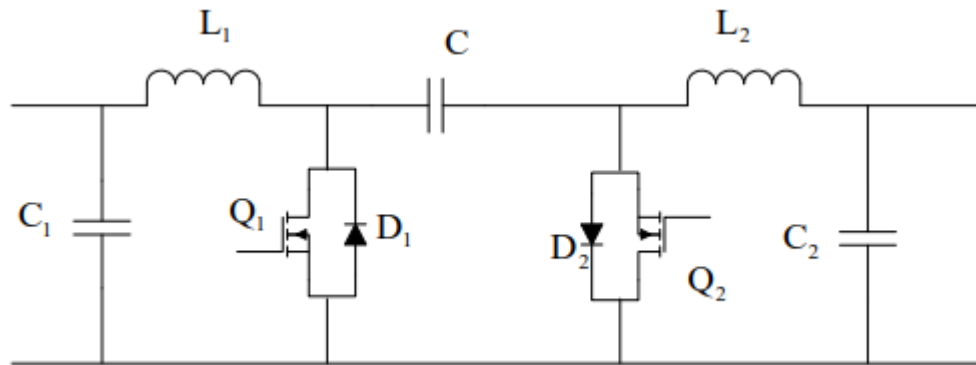


Рис. 2.4. Двонаправлений перетворювач Чука

Однією з найбільш поширених топологій є неізолюваний напівмостовий перетворювач (рис. 2.5).

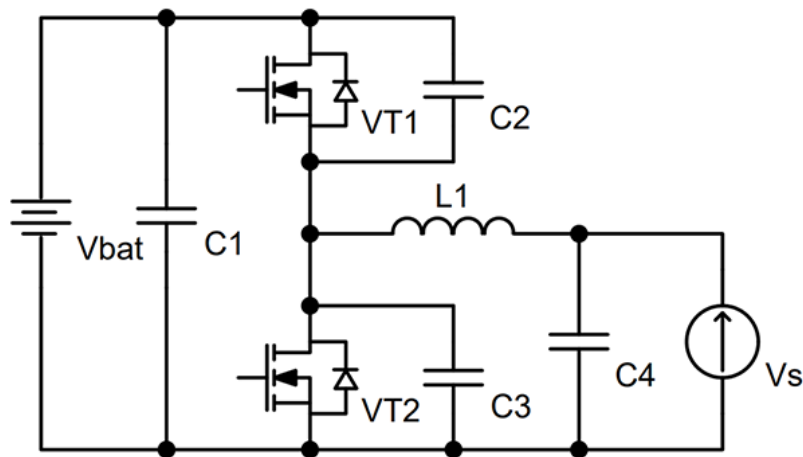


Рис. 2.5. Неізолюваний напівмостовий перетворювач

Такий перетворювач є поєднанням підвищуючого і понижуючого перетворювача з'єднаних антипаралельно.

Перевагою його є м'яка комутація, що дозволяє мінімізувати динамічні втрати, вона досягається завдяки резонансному контуру, який утворюється



конденсаторами  $C2$  і  $C3$  переходу стік-витік транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  та дроселем  $L1$  [39].

В системах де необхідний високий коефіцієнт трансформації, застосовуються ізолювані двонаправлені перетворювачі, вони мають високочастотний трансформатор, який забезпечує створення гальванічної розв'язки та узгодження напруги. Перетворювачі такого типу можуть регулювати потужність від декількох ват до сотень кіловат.

Однофазний перетворювач з двома активними мостами є найбільш застосовуваною топологією серед двопортових одноступеневих ізолюваних двонаправлених перетворювачів. Існує напівмостова (рис. 2.6 а) та повномостова (рис. 2.6 б) схема такого перетворювача.

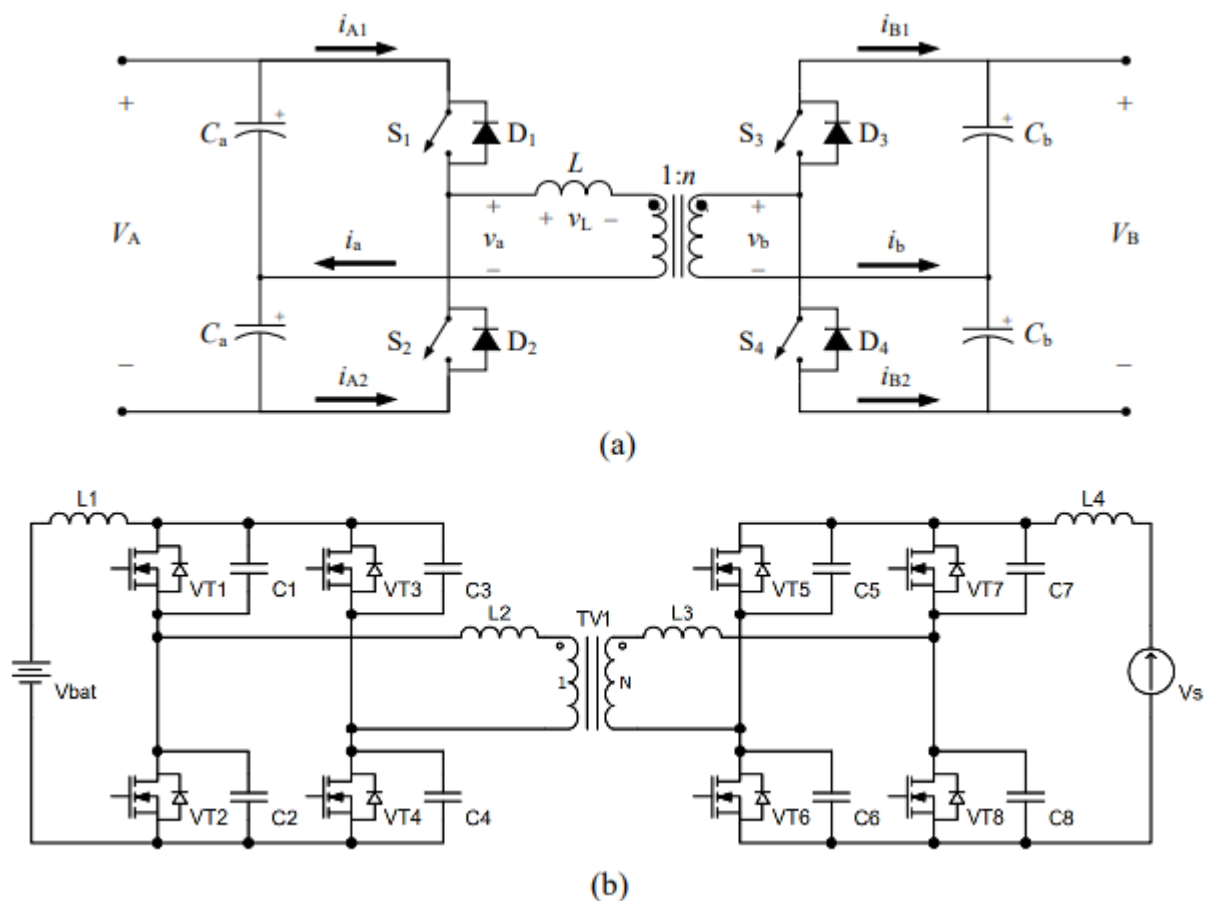


Рис.2.6. Однофазні мостові двонаправлені перетворювачі – подвійні активні мости: а) напівмостовий перетворювач, б) повномостовий перетворювач

Напівмостова схема перетворювача має вдвічі менше транзисторів, ніж повномостова, але кожен ключ повинен мати в два рази вищий рівень потужності. При однаковій площі поперечного перерізу трансформатора напівмостова схема має вдвічі менше колювання потоку трансформатора порівняно з повномостовою схемою, через що втрати в осерді менші. Однак середньоквадратичний струм трансформатора в напівмостовому перетворювачі в два рази більший, що значно збільшує втрати провідності [40].

Повномостовий перетворювач має два мости, один міст перетворює вхідну напругу на проміжну високочастотну змінну напругу, а інший високочастотну змінну напругу на вихідну [41]. Окрім гальванічної розв'язки високочастотний трансформатор також має деяку індуктивність розсіювання  $L_2$  і  $L_3$  у своїй первинній і вторинній обмотках, які разом діють як компонент накопичення енергії. Індуктивність розсіювання допомагає досягти м'якої комутації. Конденсатори  $C_1 - C_8$ , приєднані паралельно до ключів, призначені для захисту транзисторів від паразитних індуктивних викидів, які стаються під час перехідних процесів. М'яка комутація допомагає зменшити втрати при перемиканні та досягти вищої енергоефективності. Передавання енергії від батареї  $V_{bat}$  до джерела  $V_s$  здійснюється шляхом комутації транзисторів  $VT_1 - VT_4$ , а при необхідності передачі енергії в зворотному напрямку – комутацією транзисторів  $VT_5 - VT_8$ . Акумулятор та джерело під'єднуються до зарядного пристрою через індуктивності  $L_1$  і  $L_4$ , це дозволяє задавати їх форму струму, а отже забезпечувати необхідний зарядно-розрядний струм батареї та коригувати коефіцієнт потужності джерела [42, 43, 44].

Для забезпечення передачі енергії в джерело змінного струму до ізолизованого перетворювача необхідно приєднати двонаправлений перетворювач змінного струму в постійний.

Традиційним рішенням для двонаправленої передачі енергії між мережею і електромобілем є використання двоступеневої архітектури перетворювача (рис. 2.7) [45].

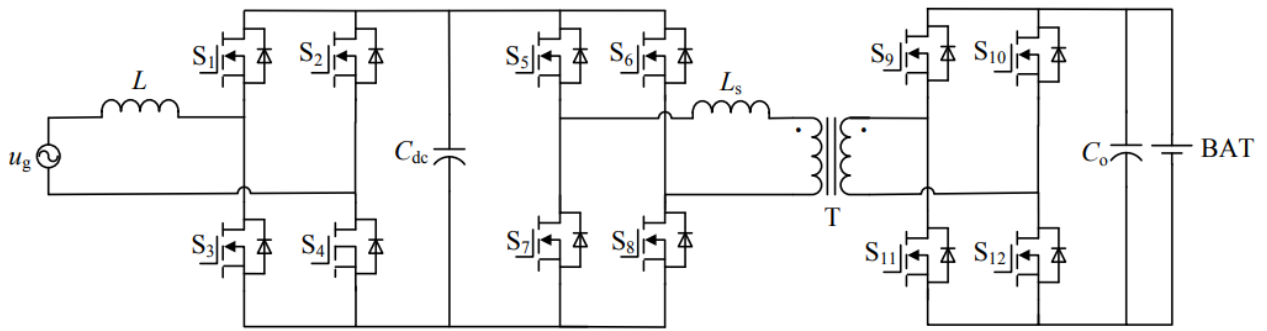


Рис. 2.7. Двоступенева топологія, що складається з ШІМ-перетворювача та подвійного активного моста

Першим ступенем, як правило, є двонаправлений перетворювач змінного струму в постійний, це звичайний повний міст, що виконаний на чотирьох транзисторах  $S1 - S4$ , він випрямляє змінну напругу мережі до постійної напруги з одиничним коефіцієнтом потужності.

Другим ступенем є ізолюваний двонаправлений перетворювач постійного струму. Елементи керування перетворювачем синхронізуються за допомогою загального контролера [46]. Однак конденсатор, між каскадами змінного та постійного струму що використовується для згладження пульсацій, які вдвічі перевищують частоту мережі є основним бар'єром для збільшення щільності потужності. Більше того, використання електролітичного конденсатора може стати причиною короткого терміну служби зарядного пристрою. Якщо акумулятор здатний приймати пульсації струму низької частоти, високовольтний конденсатор постійного струму може бути значно зменшеним, або усунутим взагалі.

Альтернативою для двоступеневої архітектури є використання матричного перетворювача, що дає можливість виконувати пряме перетворення змінного струму в постійний [47, 48]. Матричний перетворювач розташовується між трансформатором та джерелом змінної напруги і перетворює напругу з частотою мережі в напругу з частотою трансформатора. Перетворювача з матричним мостом зображена на рис. 2.8.

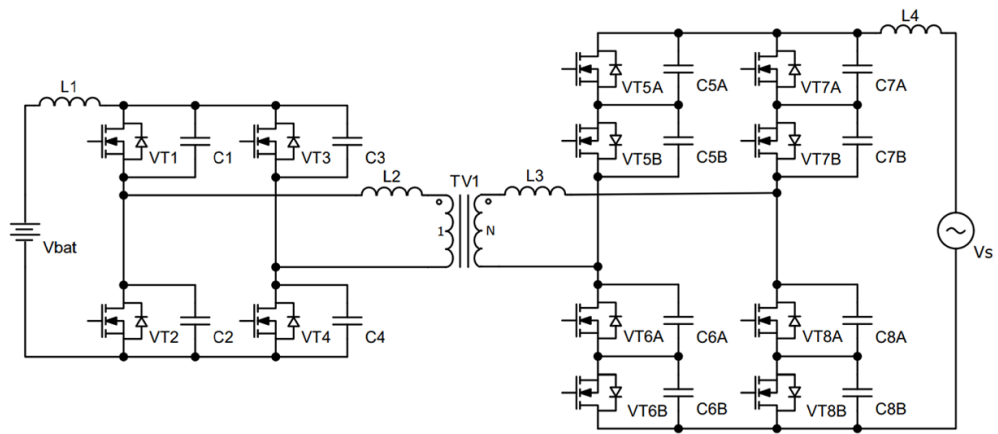


Рис. 2.8. Подвійний активний міст з матричним перетворювачем

В матричному перетворювачі кожен ключ має складатися з двох зустрічно-послідовно ввімкнених транзисторів (рис. 2.9). Транзистори з'єднуються за схемою зі спільним витоком. Керування ключами здійснюється шляхом подачі на затвор відповідного ключа імпульсу керування. Наявність двох транзисторів дає можливість проводити струм в обох напрямках (рис. 2.9). В момент коли відкритий перший транзистор, другий транзистор перебуває в закритому стані (рис. 2.9 а), та коли перший закритий, другий відкритий (рис. 2.9 б) [49].

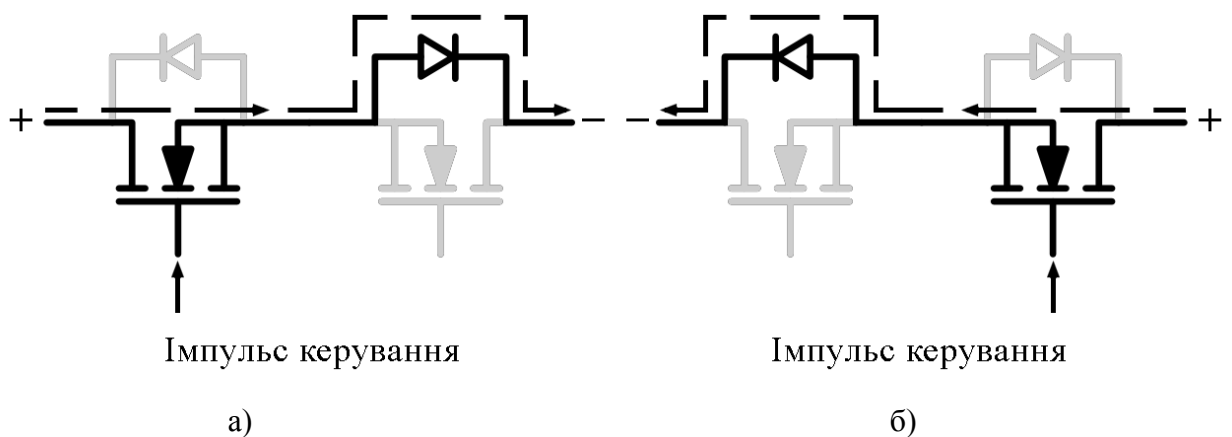


Рис. 2.9. Протікання струму в двонаправленому ключі

Використання такого ключа збільшує втрати провідності та вимагає складної системи комутації, однак використання матричних перетворювачів спрощує та робить більш компактними силові ланцюги, що сприяє вищій

щільності потужності та тривалому терміну служби [50]. Такий перетворювач є універсальним та може працювати з джерелом постійної і змінної напруги, коригувати форму струму і відбирати максимальну потужність. Зважаючи на особливості такого перетворювача його використання є найефективнішим для поставленої задачі, тому двонаправлений ізольований перетворювач з двома активними мостами був обраний для дослідження.

## **2.2. Аналіз режимів роботи перетворювача**

Режим передавання енергії від акумуляторної батареї до джерела постійної струму представлений на рис. 2.10. Його можна умовно розділити на 6 інтервалів.

### **Інтервал 1 $t_0 < t < t_1$ .**

Протягом першого інтервалу часу на первинній стороні струм проходить через зворотні діоди транзисторів VT2 і VT3 та конденсатори C1 і C4, на вторинній стороні струм проходить через двосторонні ключі на транзисторах VT6 і VT7 і формується передній фронт сигналів керування транзисторами VT2 і VT3. Струм через індуктивність L2 має додатній напрям.

### **Інтервал 2 $t_1 < t < t_2$ .**

На початку інтервалу змінюється полярність струму через транзистори VT2 і VT3.

### **Інтервал 3 $t_2 < t < t_3$ .**

На початку інтервалу струму через трансформатор TV1 змінює полярність. Транзистори VT6 і VT7 закриваються, а VT5 і VT8 відкриваються. Протягом інтервалу струм через індуктивність IL2 досягає свого амплітудного значення, в кінці інтервалу транзистори VT2 і VT3 вимикаються при нульовій напрузі.

### **Інтервал 4 $t_3 < t < t_4$ .**

Струм проходить через конденсатори C2 і C3, зворотні діоди транзисторів VT1 і VT4.

### Інтервал 5 $t_4 < t < t_5$ .

Змінюється полярність струму через трансформатор TV1 та ключі VT1 і VT4. На вторинній стороні двосторонні ключі на транзисторах VT5 і VT8 вимикаються, а VT6 і VT7 вмикаються.

### Інтервал 6 $t_5 < t < t_6$ .

Змінюється полярність струму через конденсатори C2 і C3. Струм через індуктивність досягає амплітудного значення. У кінці інтервалу транзистори VT1 і VT4 закриваються при нульовій напрузі. Далі процеси в перетворювачі повторюються циклічно.

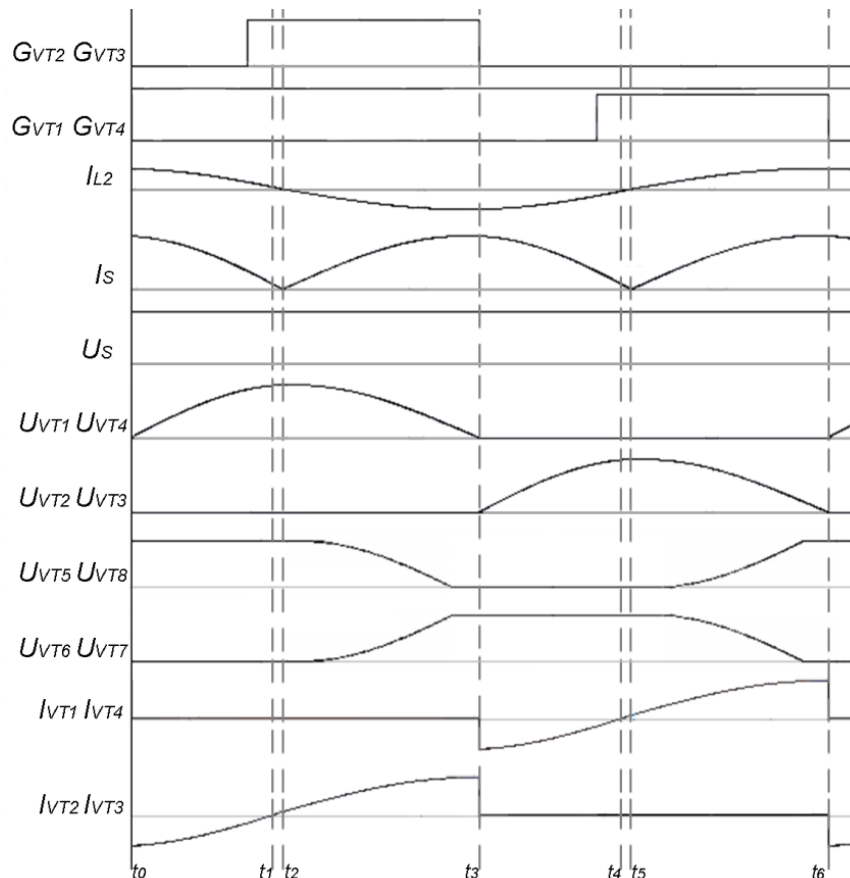


Рис. 2.10. Часові діаграми струмів і напруг на інтервалах роботи перетворювача

Еквівалентна схема перетворювача на кожному інтервалі показана на рис. 2.11.

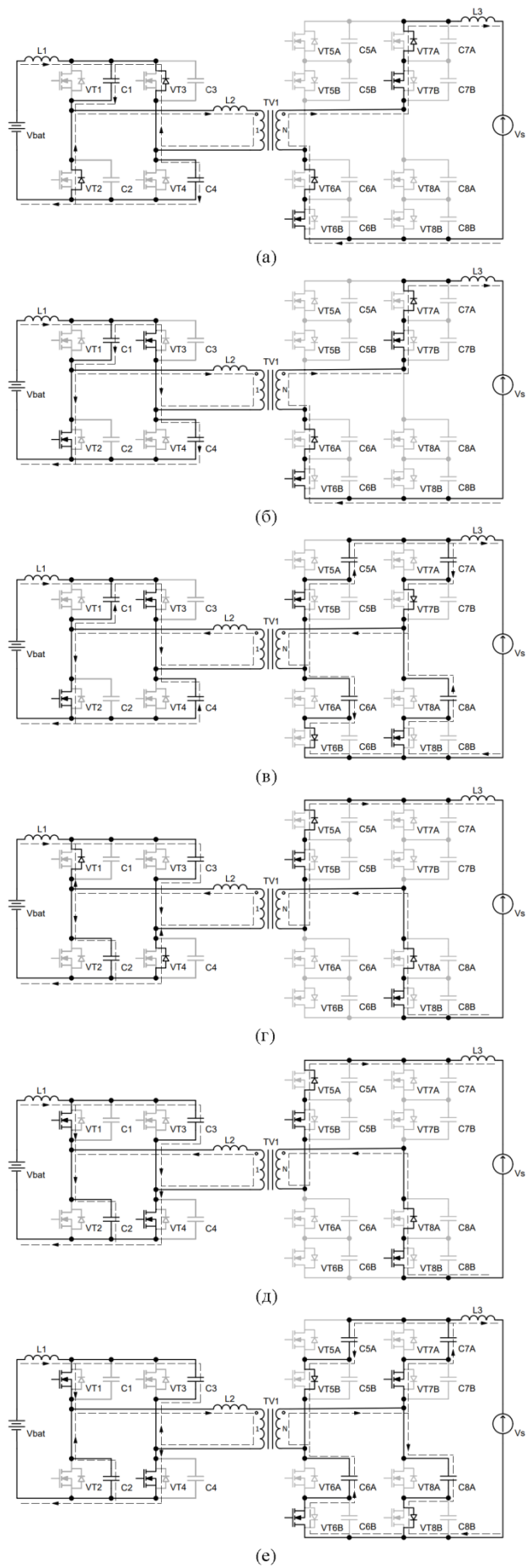


Рис. 2.11. Часові діаграми струмів і напруг на інтервалах роботи перетворювача

Робоча частота перетворювача  $f$  визначається частотою резонансних коливань  $f_{res}$ :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.1)$$

де  $L$  – еквівалентне значення індуктивності розсіювання трансформатора, перераховане до первинної обмотки,  $C$  – ємність переходу стік витік транзистора.

Оскільки перезарядження реактивних елементів відбувається на інтервалах, коли транзистори перетворювача закриті, то частота роботи перетворювача  $f$  завжди менше резонансної  $f_{res}$ ,  $f < f_{res}$  і наближається до неї, коли коефіцієнт заповнення імпульсів перетворювача  $\gamma$  прямує до нуля,  $\gamma \rightarrow 0$ .

М'яка комутація транзисторів забезпечується лише за умови, що енергії, накопиченої в індуктивності резонансного контуру вистачає, щоб перезарядити конденсатор резонансного контуру:

$$\frac{Li_{Lmax}^2}{2} \geq \frac{CV_{bat}^2}{2}, \quad (2.2)$$

де  $i_{Lmax}$  – амплітудне значення струму дроселя,  $V_{bat}$  – вихідна напруга батареї.

Зважаючи на формулу (2), існує мінімальне середнє значення струму навантаження  $I_{dmin}$ , за якого забезпечується м'яка комутація транзисторів:

$$I_{dmin} = \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{V_{bat}}{n}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Слід зазначити, що статичні втрати енергії на внутрішньому опорі транзисторів у режимі з м'якою комутацією транзисторів  $W_{cm\_м}$  дещо більші, ніж при жорсткій комутації транзисторів  $W_{cm\_ж}$  та прямокутній формі струму через елементи [51]:

$$W_{cm\_ж} = 4 \frac{nI_d^2}{\gamma} R_{on}, \quad (2.4)$$

$$W_{cm\_мVT} = \frac{\pi^2}{8} \frac{nI_d^2}{\gamma} R_{on}, \quad (2.5)$$



де  $\gamma$  – коефіцієнт заповнення роботи транзисторів,  $R_{on}$  – опір каналу транзистора у відкритому стані.

Динамічні втрати  $W_{дин}$  у режимі з жорсткою комутацією залежать від ємності переходу стік витік транзистора  $C$  і визначаються за формулою:

$$W_{дин} = W_{дин\_on} + W_{дин\_off} = 4 \left( \int_0^{T_{kon}} i_{VT}(t) u_{VT}(t) dt + \int_0^{T_{koff}} i_{VT}(t) u_{VT}(t) dt \right), \quad (2.6)$$

де  $W_{дин\_on}$ ,  $W_{дин\_off}$  – динамічні втрати при вмиканні і вимиканні транзистора відповідно,  $i_{VT}$ ,  $u_{VT}$  – струм і напруга транзистора протягом перехідного процесу, викликаного комутацією,  $T_{kon}$ ,  $T_{koff}$  – тривалість перехідного процесу під час вмикання і вимикання транзистора відповідно.

З аналізу формул (4)-(5) можна зробити висновок, що запропонований перетворювач доцільно використовувати, якщо збільшення статичних втрат компенсується відсутністю динамічних:

$$W_{ст\_м} - W_{ст\_ж} < W_{дин}. \quad (2.7)$$

Регулювання вихідної напруги перетворювача з м'якою комутацією здійснюється за законом частотно-імпульсної модуляції (ЧІМ) [52] з постійною тривалістю паузи  $t_{II} = \text{const}$ , де тривалість паузи визначають періодом резонансних процесів перетворювача:

$$t_{II} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.8)$$

Зважаючи на це, процес регулювання вихідної напруги пов'язаний з одночасною зміною коефіцієнта заповнення імпульсів  $\gamma$  і періоду роботи перетворювача  $T$ . При цьому регульовальна характеристика перетворювача визначається за формулою:

$$U_{вих} = n\gamma U_{ex} \frac{t_{II}}{T}. \quad (2.9)$$

### 2.3. Розрахунок елементів перетворювача

Розрахуємо схему, задавши параметрами:

Вхідна напруга 100 ... 350 В

діюче значення вихідної напруги 220 В;

вихідна потужність  $P = 500$  В;

частота перемикання ключів на первинній стороні  $f_s = 60$  кГц;

частота перемикання ключів на вторинній стороні  $f_i = 50$ ;

для заданих параметрів максимальний вихідний струм  $I_{\text{вихmax}} = 3,215$  А.

Розрахуємо габаритну потужність трансформатора, враховуючи ККД трансформатор  $\eta_{TV} = 0,9$ . Габаритна потужність:

$$P_z = \frac{U_{\text{вих}} I_{\text{вихmax}}}{\eta_{TV}} = \frac{(220) \cdot 3,215}{0,9} = 785,9 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт трансформації  $n$  трансформатора складає:

$$n = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вхmin}} \cdot \gamma_{\text{max}}} = \frac{220}{100 \cdot 0,95} = 2,316.$$

Розрахуємо добуток площ фериту  $S_{\text{фер}}$  та вікна  $S_{\text{в}} \text{ трансформатора:}$

$$S_{\text{фер}} S_{\text{в}} = \frac{10^2 P_z}{2k_{\phi} f j B k_{\epsilon}} = \frac{100 \cdot 785,9 \sqrt{0,2}}{2 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 0,3} = 1,302 \text{ см}^4.$$

Згідно отриманого добутку обираємо осердя К32х16х8. Площа вікна такого осердя складає  $S_{\text{вч}} = 0,64 \text{ см}^2$ .

Кількість витків первинної обмотки  $W_1$ :

$$W_1 = \frac{U_{\text{ВХmax}} 10^4}{4k_{\phi} B_m f S_{\phi}} = \frac{350 \cdot 10^4 \sqrt{0,2}}{4 \cdot 0,25 \cdot 60000 \cdot 2 \cdot 0,64} = 20,381 \text{ вит.}$$

Округлимо отримане значення до 20 витків  $W_1 = 20$  витків.

Кількість витків вторинної обмотки:

$$W_2 = n W_1 = 2,316 \cdot 20 \approx 47 \text{ вит.}$$

Діаметри дротів первинної  $d_1$  і вторинної  $d_2$  обмоток:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{P}{\eta U_{\text{max}} \sqrt{\gamma_{\text{min}}} j}} = 1,13 \sqrt{\frac{500}{0,9 \cdot 350 \cdot \sqrt{0,2} \cdot 3}} = 1,2 \text{ мм,}$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \frac{1}{n} \sqrt{\frac{P}{U_{\text{max}} \sqrt{\gamma_{\text{min}}} j}} = 0,488 \sqrt{\frac{500}{350 \cdot \sqrt{0,2} \cdot 3}} = 0,504 \text{ мм.}$$

Розрахуємо індуктивність розсіювання

$$L = \frac{n^2 \cdot U_s^2 \cdot \delta}{8 \cdot P \cdot f_s} = \frac{2,316^2 \cdot 311 \cdot 0,5}{8 \cdot 500 \cdot 60 \cdot 10^3} = 1,082 \text{ мГн.}$$

Піковий струм перемикання транзисторів на вторинній стороні дорівнює:

$$I_{pswitch} = \frac{n^2 \cdot U_s}{2 \cdot L_k \cdot f_s} \cdot \delta = \frac{2,3^2 \cdot 311}{2 \cdot 1,082 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^3} \cdot 0,5 = 6,428.$$

Піковий струм перемикання транзисторів на первинній стороні дорівнює:

$$I_{dswitch} = \frac{n^3 \cdot U_s^2 \cdot \delta}{2 \cdot L \cdot f_s \cdot U_{ex \max}} = 13,234.$$

Розрахуємо згладжуючий фільтр:

Поточний коефіцієнт пульсації на виході перетворювача складає 100%, після фільтра необхідно отримати 5 %.

$$K_c = \frac{K_{nвих \max}}{K_{nвих}} = \frac{1}{0,05} = 20,$$

де параметр  $K_c$  – коефіцієнт стабілізації

$$R_{нав} = \frac{U_{вих}^2}{P} = \frac{220^2}{500} = 96,8.$$

Коефіцієнт згладжування

$$K_c = \omega^2 \cdot L \cdot C - 1.$$

Величина індуктивності фільтру визначається з умови забезпечення безперервності струму в дроселі.

$$L \geq \frac{K_{nвих \max} \cdot R_d}{\omega} = \frac{1 \cdot 96,8}{3,77 \cdot 10^5} = 2,57 \cdot 10^{-4}.$$

Оберемо індуктивність RCH875NP-391K

$$L = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,}$$

$$C = \frac{(K_c + 1)}{\omega^2 \cdot L} = 3,79 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.}$$

Оберемо ємність UVR2ER47MED1TD

$$C = 0,47 \cdot 10^{-6}.$$

Реактивні опори елементів фільтра:

$$x_L = m \cdot \omega \cdot L = 147,$$

$$x_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = 5,64.$$

Резонансна частота

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = 11760 \text{ Гц}.$$

Хвильовий опір індуктивності є більшим, хвильовий опір ємності меншим ніж опір навантаження  $R_{нав} = 96,8 \text{ Ом}$ , а резонансна частота менше ніж робоча частота  $f = 60000 \text{ Гц}$  отже номінали компонентів фільтра обрані правильно.

### **Висновки до другого розділу**

Для двонаправленої передачі енергії використовують ізольовані (напівмостовий, повномостовий) та не ізольовані перетворювачі (інвертуючий, каскадний, мостовий, перетворювач Чука).

Перетворювач, що є інтерфейсом між електромобілем і мережею повинен мати високий коефіцієнт корисної дії, корекцію коефіцієнта потужності, відбирати максимальну потужність, формувати неперевну форму струму. Таким критеріям відповідає двонаправлений повно мостовий ізольований перетворювач з м'якою комутацією транзисторів при нульовій напрузі. Для роботи на змінному струмі у нього інтегрований матричний перетворювач.

Проаналізована робота перетворювача на шести інтервалах періоду. Обрані параметри перетворювача та розраховані компоненти схеми, зокрема транзистори, трансформатор, згладжувальний фільтр.

### **3. АНАЛІЗ МОДУЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Модульний підхід до побудови перетворювачі, з кожним роком знаходить все більше застосування в джерелах живлення різного призначення та їхніх складових, зокрема багаторівневих інверторах, випрямлячах, імпульсних перетворювачах постійної напруги, багатофазних коректорах коефіцієнту потужності, тощо. На відміну від централізованої топології, при якій основні блоки перетворювачів складаються з потужних силових напівпровідникових елементів і мають великі розміри, модульна архітектура передбачає розподіл структури перетворювача у вигляді кількох однотипних модулів відносно невеликої потужності [53].

Такий підхід до проектування дає змогу забезпечити будь-які необхідні значення напруги або струму, знизити пульсації, використати елементи меншої потужності, підвищити ККД схеми, використати покращені алгоритми керування, виконати резервування блоків, знизити габарити реактивних елементів, зменшити розміри радіаторів, або взагалі виключити їх.

Управління в модульних перетворювачах грає ключову роль, оскільки для забезпечення безпечної та ефективної роботи необхідно забезпечити належний розподіл струму та напруги між модулями [54].

#### **3.1. Огляд топологій модульних перетворювачів**

Для використання двонаправленого перетворювача з подвійним активним мостом у системах високої потужності, можна застосувати модульний принцип з'єднавши вхідні і вихідні порти модулів різними способами в залежності від функціонального призначення. В поєднанні з спеціальними алгоритмами керування можна отримати різні форми струму і напруги на виході. Приклади основних структур з'єднання модулів представлені на рис. 3.1.

На рис. 3.1 а, зображена модульна структура при якій по входу модулі з'єднуються послідовно, а по виходу паралельно. При цьому між модулями по

входу розподіляється напруга, а по виходу струм. Така структура застосовується при живленні від джерела високої напруги і необхідності забезпечити певну форму кривої вихідного струму.

Модульна топологія зображена на рис. 3.1 б, передбачає паралельне з'єднання модулів по входу і послідовне по виходу, що дозволяє розподілити між модулями вхідний струм і вихідну напругу. Така структура застосовується при потребі живлення пристрою струмом з визначеними параметрами кривої та необхідності отримання на виході перетворювача значної напруги.

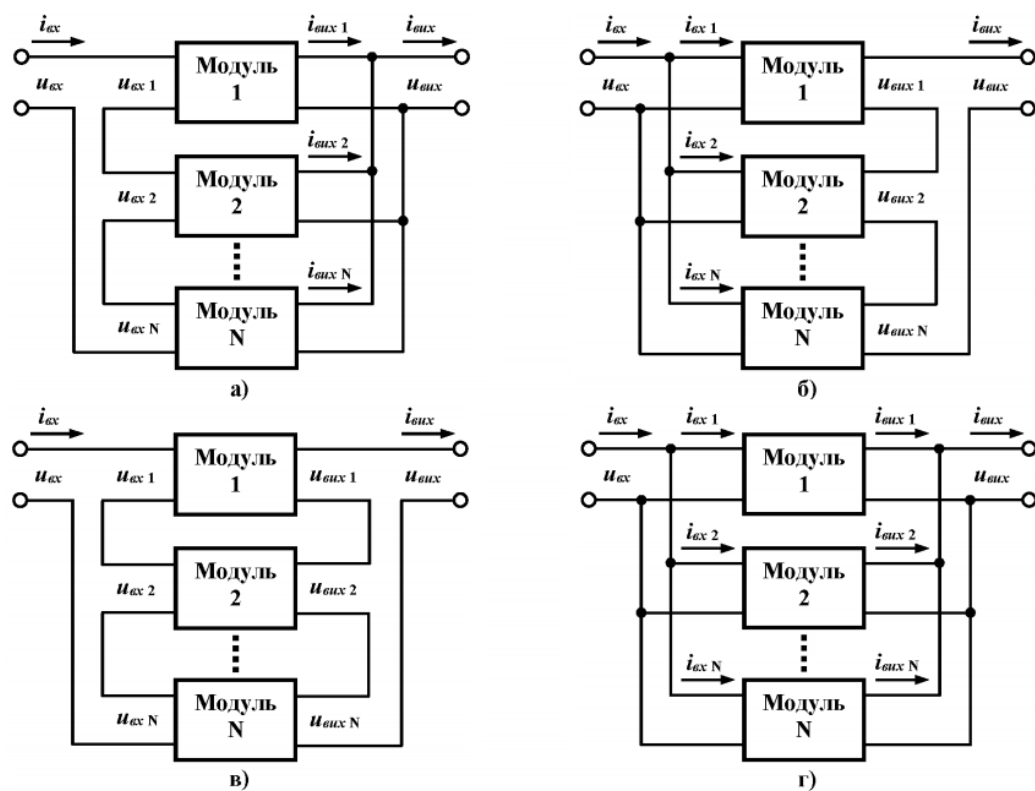


Рис. 3.1. Структурні схеми модульних топологій

Модульна топологія з послідовним з'єднанням модулів по входу і по виходу (рис. 3.1 в) передбачає арифметичне додавання вхідних і вихідних напруг між собою. Така топологія застосовується при роботі з джерелами високої напруги та необхідності забезпечення на виході високого рівня напруги.

На рис. 3.1 г наведена структура перетворювача в якій модулі з'єднанні паралельно по входу і по виходу. Такий тип з'єднання дає можливість розподілити вхідний і вихідний струм між модулями [55]. Такий спосіб з'єднання дозволяє перетворювати струми значних амплітуд і є найефективнішим для поставленої задачі.

### 3.2. Огляд роботи модульного двонапрального перетворювача з подвійним активним мостом

Принципова схема перетворювача показана на рис. 3.2.

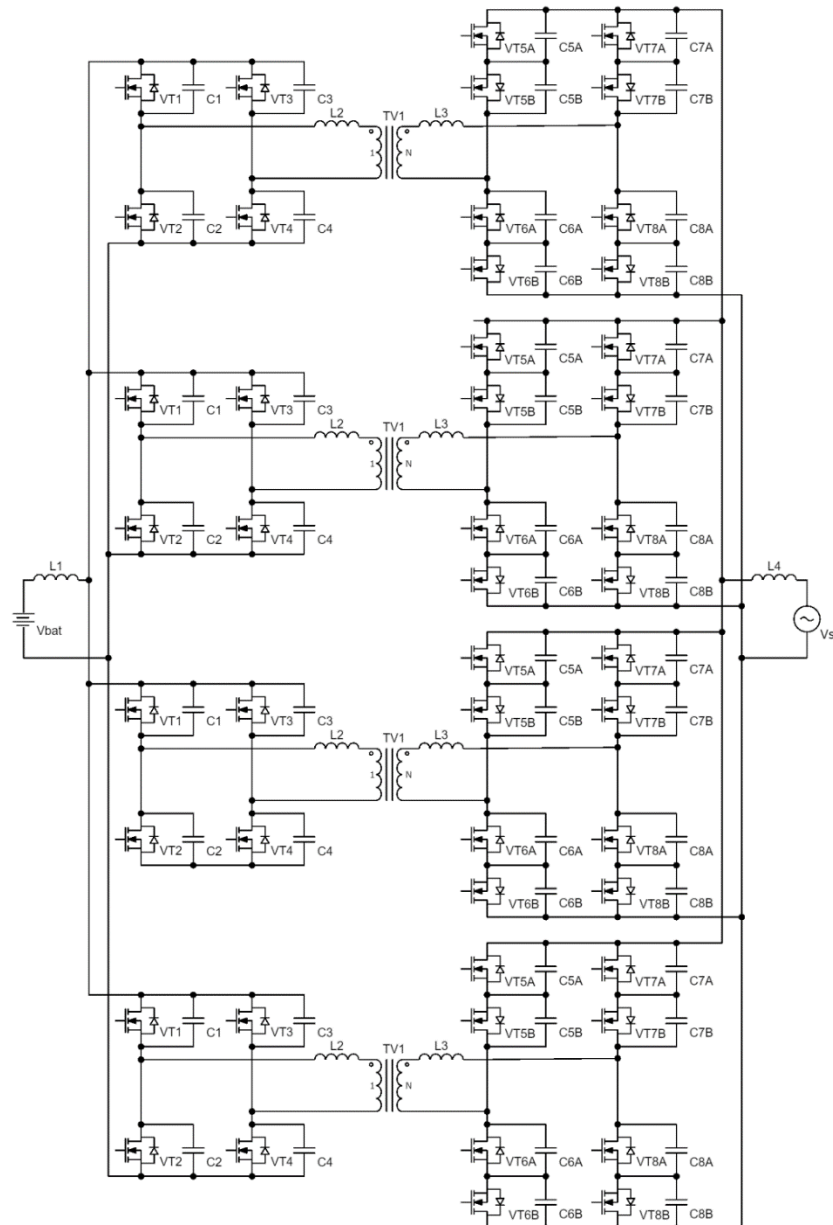


Рис. 3.2. Принципова схема перетворювача виконаного на чотирьох модулях

Принцип роботи такого перетворювача на прикладі чотирьох комірок зображений на рис. 3.2.

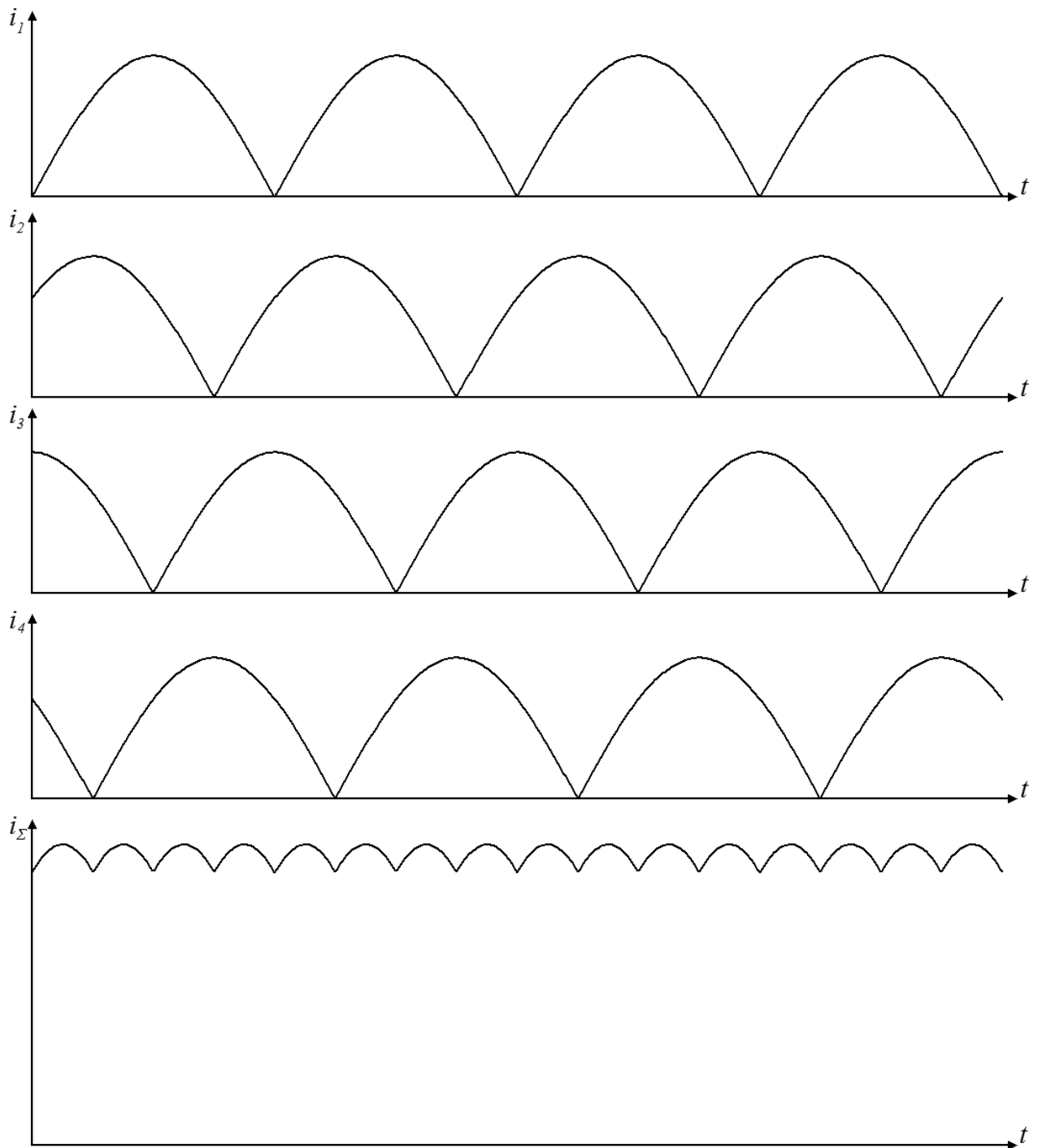


Рис. 3.3. Принцип роботи модульного перетворювача

Відповідно до рис. 3.3 в модульному перетворювачі з  $m$  комірок фазовий зсув між струмами комірок має складати  $T/m$ . При цьому сумарний струм має значно менший коефіцієнт пульсацій та в  $m$  разів більшу вихідну частоту. Тому вихідний струм перетворювача потребує мінімального згладження, завдяки



чому значно зменшуються габарити фільтру та покращується коефіцієнт нелінійних спотворень [56, 57].

Коефіцієнт пульсації струму на виході перетворювача визначається відношенням різниці максимального і мінімального миттєвих значень струму до середнього значення

$$k_n(m) = \frac{\sum_{n=0}^{m-1} \sin\left(\pi - \frac{\pi}{2 \cdot m} - \frac{n \cdot \pi}{m}\right) - \sum_{n=0}^{m-1} \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{m}\right)}{m \cdot \frac{2}{\pi}} = \frac{\csc\left(\frac{\pi}{2m}\right) - \cot\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{m \cdot \frac{2}{\pi}}, \quad (3.1)$$

де  $m$  – кількість комірок. На рис. 3.4 зображена залежність коефіцієнта пульсації від кількості комірок 1 – 4.

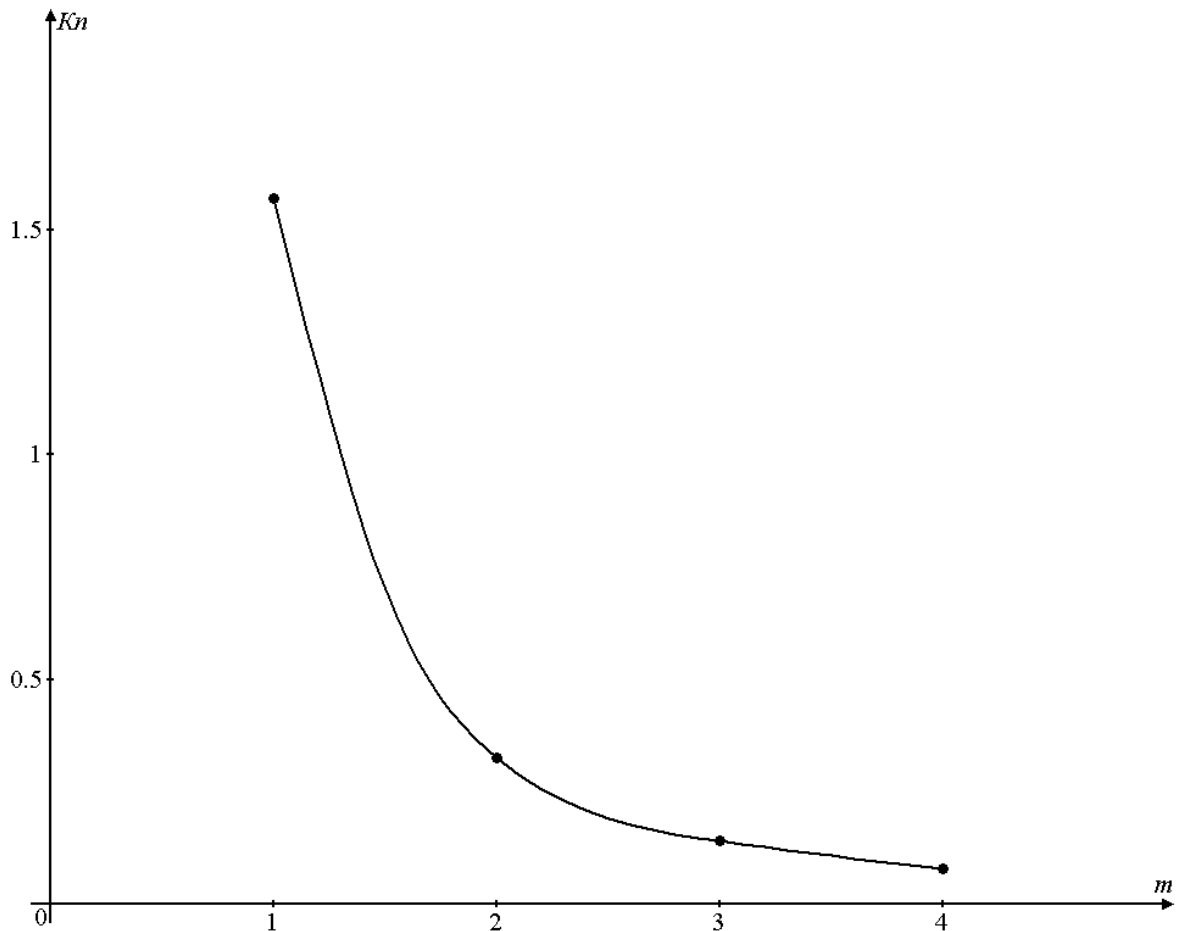


Рис. 3.4. Графік залежності коефіцієнта пульсації від кількості комірок

Основним джерелом статичних втрат в комірці є опір елементів. При паралельному з'єднанні комірок, еквівалентний опір дорівнює:

$$R_{екв} = \frac{R_{ком}}{m}. \quad (3.2)$$

Відповідно зі збільшенням кількості комірок еквівалентний опір зменшується, а ККД зростає. Графік залежності ККД від кількості комірок, при ККД одної комірки 95% зображений на рис. 3.5.

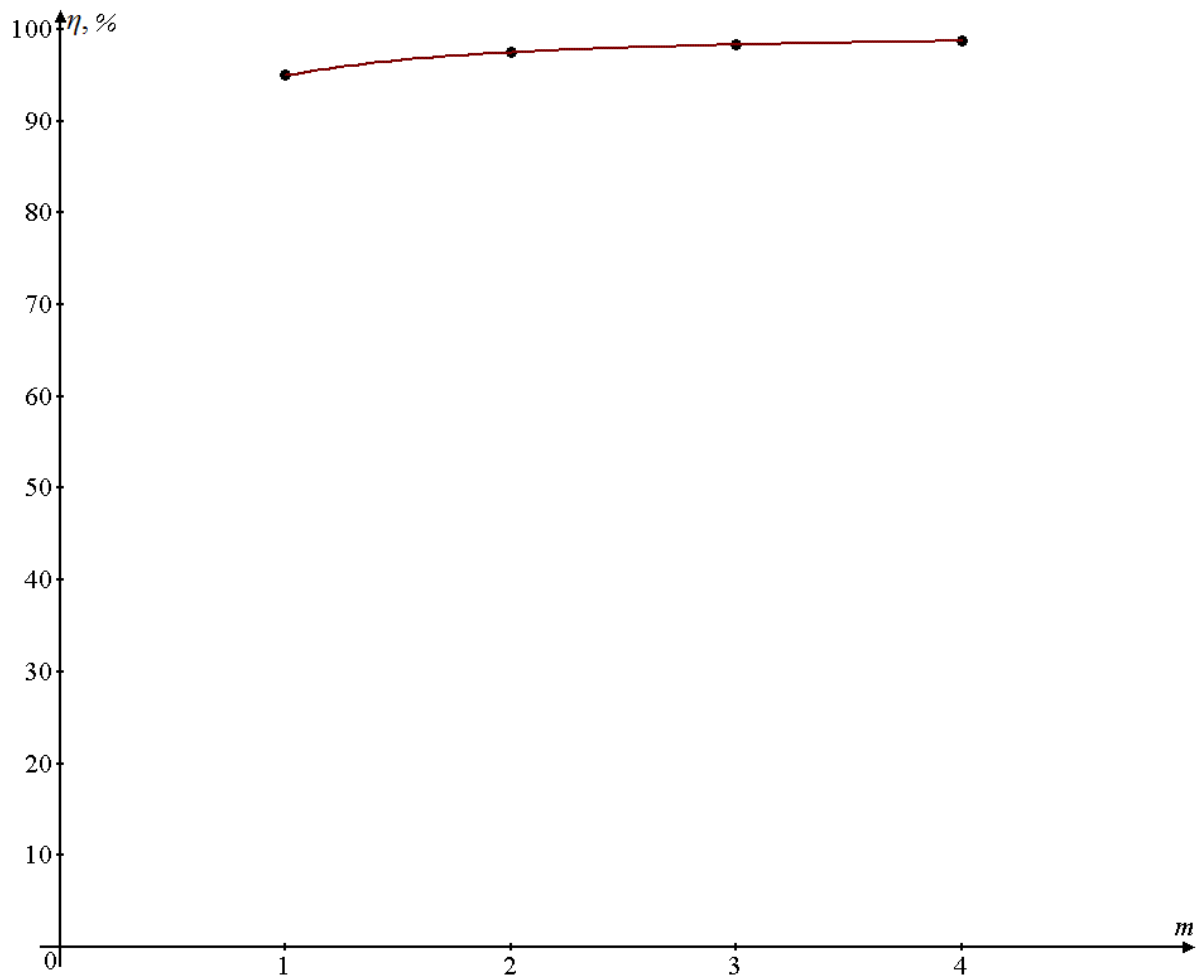


Рис. 3.5. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від кількості комірок

З аналізу залежностей коефіцієнта пульсацій та коефіцієнта корисної дії можна зробити висновок що збільшення кількості комірок сприяє зменшенню коефіцієнта пульсацій та підвищує ККД. Отже використання модульного перетворювача є ефективним.

### **Висновки до третього розділу**

Використання модульного підходу до проектування перетворювачів дає можливість забезпечити будь-які необхідні значення струмів і напруг, використати елементи меншої потужності, знизити пульсації, підвищити коефіцієнт корисної дії схеми, знизити габарити реактивних елементів, використати покращені алгоритми керування.

Найефективнішою для поставленої задачі є модульна топологія перетворювача з паралельним з'єднанням модулів по входу і по виходу, що дозволяє розподілити вхідний і вихідний струм між модулями. Виведена залежність коефіцієнту пульсацій від кількості комірок, та оцінений вплив кількості комірок на зміну коефіцієнту корисної дії перетворювача.

## 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK

### 4.1. Моделювання перетворювача постійного струму

Для оцінки технічних показників перетворювача, у середовищі Matlab Simulink створена модель перетворювача, представлена на рис. 4.1.

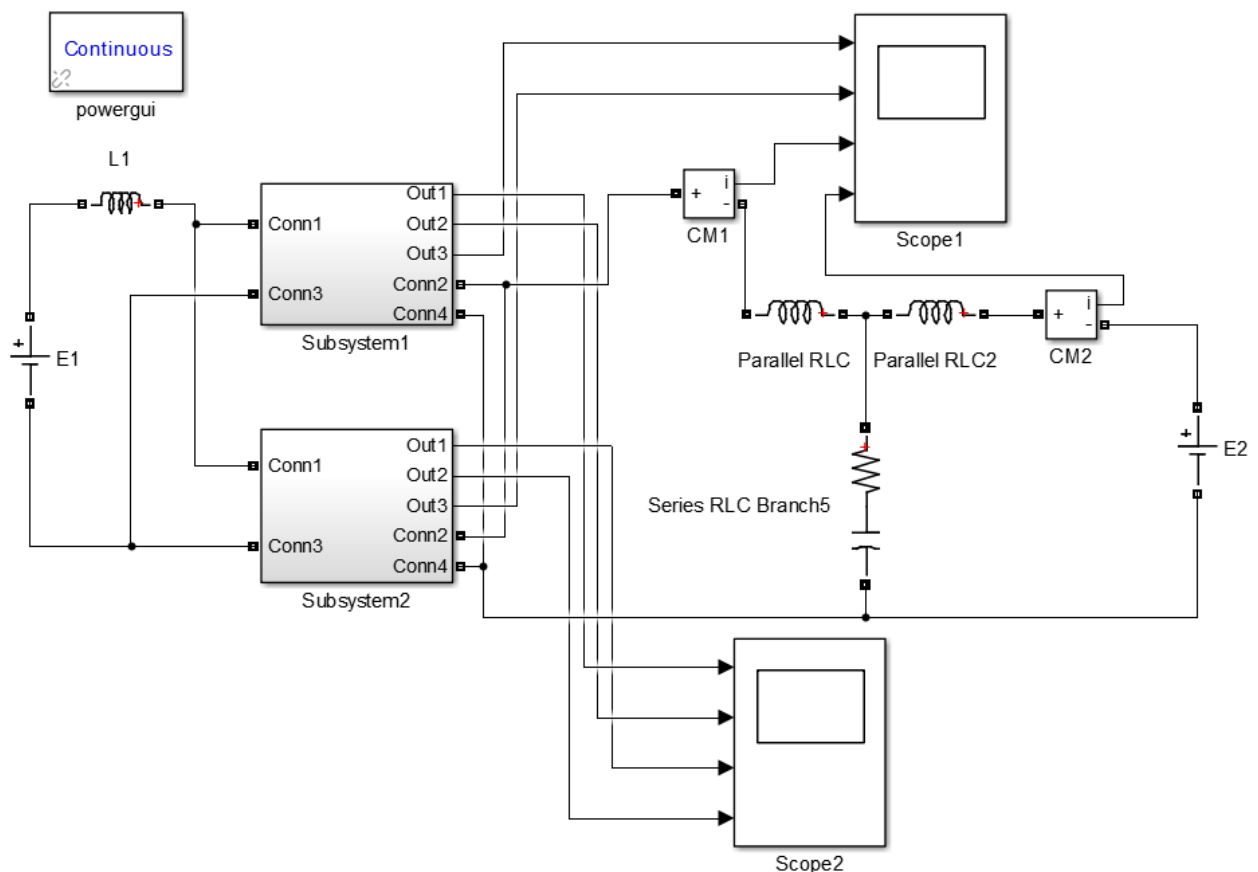


Рис. 4.1. Модель двонаправленого перетворювача з кількістю комірок  $m = 2$ .

Блоки Subsystem1 і Subsystem2 представляють собою модулі перетворювача. Порти Conn – призначення для з'єднання блоків між собою та іншою частиною схеми, порти Out – призначені для виведення вимірюваних сигналів з підсистем на дисплеї. Блок Scope1 – дисплей, на який виводяться часові діаграми струмів кожної комірки, сумарний струм та вихідний струм перетворювача. Scope2 призначений для виведення сигналів керування.

На рис. 4.2 показана модель базової комірки перетворювача

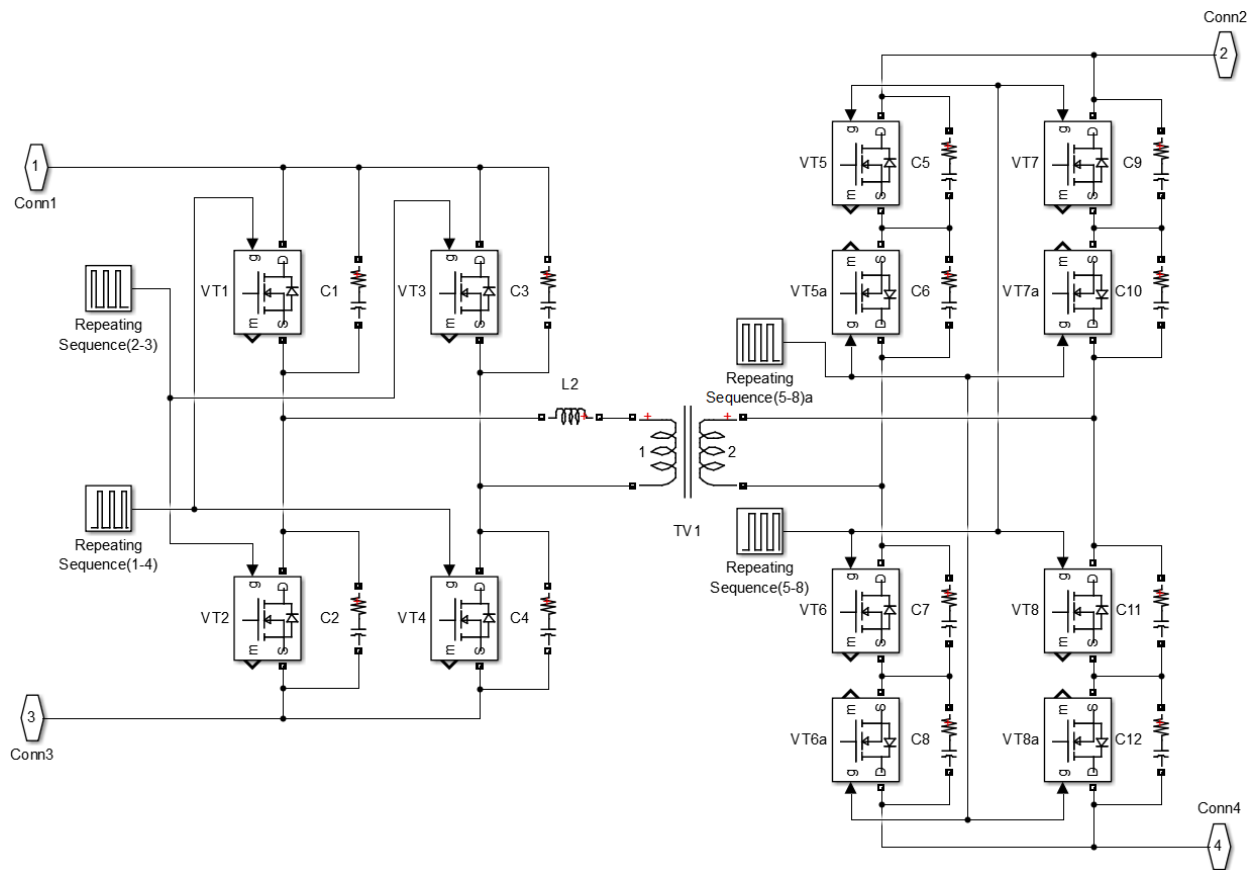


Рис. 4.2. Модель базової комірки - перетворювача

Блоки Repeating Sequence призначені для керування ключами в складі інвертора та випрямляча. Тривалість та період імпульсу визначається з умови забезпечення м'якої комутації. При використанні кількох комірок, імпульси керування подаються з фазовим зсувом  $\pi / m$ , де  $m$  – це кількість комірок.

Сигнали керування транзисторами в двокомірковому перетворювачі представлені на рис. 4.3, де S\_1-4 і S\_2-3 – ключі в першому модулі, а S\_5-8 та S\_6-7 – в другому.

Параметри перетворювача:  $E_1 = 220 \text{ В}$ ,  $E_2 = 220 \text{ В}$ . Модель транзистора створено на основі транзистора C3M0065090D [9] з параметрами: опір відкритого каналу транзистора  $R_{on} = 0.65 \text{ Ом}$ , напруга стік-витік  $U_{DS} = 900 \text{ В}$ , ємність переходу стік-витік  $C_{DS} = 660 \text{ пФ}$ .

На рис. 4.3 представлена часова діаграма струмів двомодульного перетворювача, де  $I_{out1}$ ,  $I_{out2}$  – струми на виході комірок,  $I_{sum}$  – сумарний струм комірок,  $I_{out}$  – струм джерела синусоїдальної напруги.

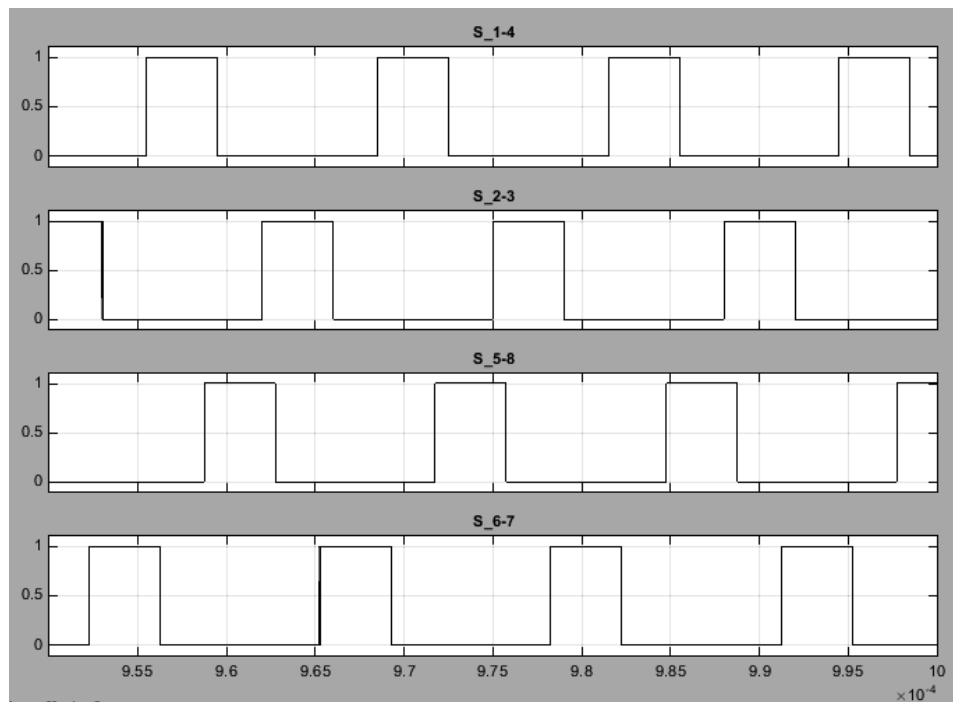


Рис. 4.3. Сигнали керування транзисторами в двокомірковому перетворювачі

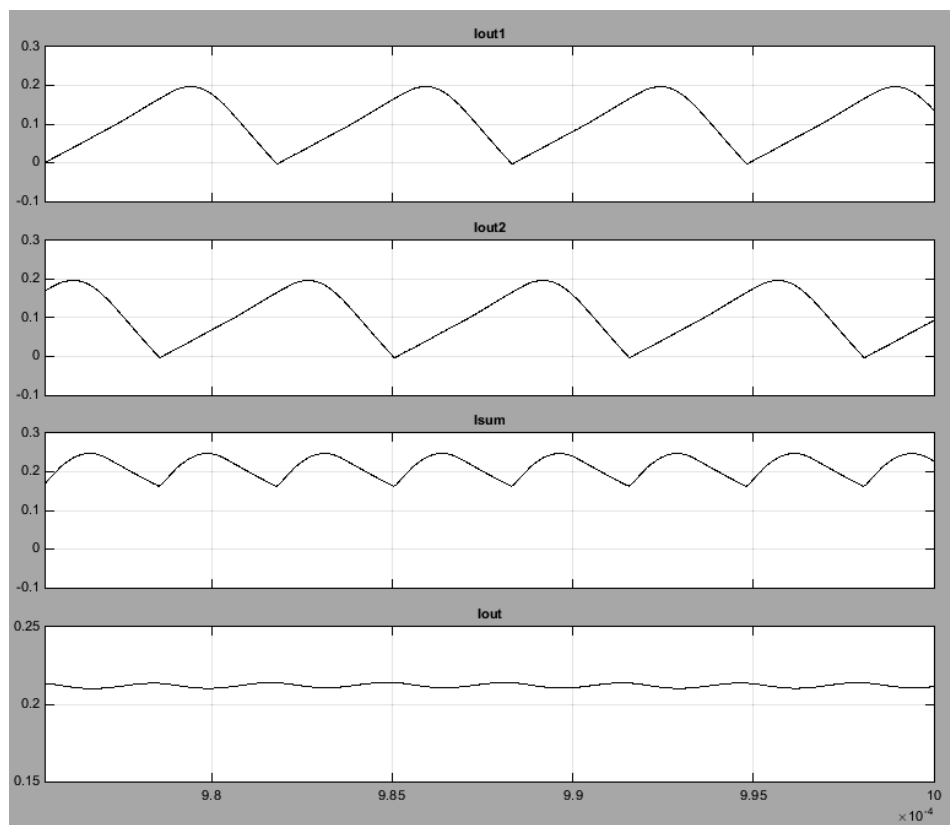


Рис. 4.4. Часові діаграми струмів двомодульного перетворювача

На рис. 4.5 зображені часові діаграми струмів і напруг перетворювача виконаного на одному модулі.

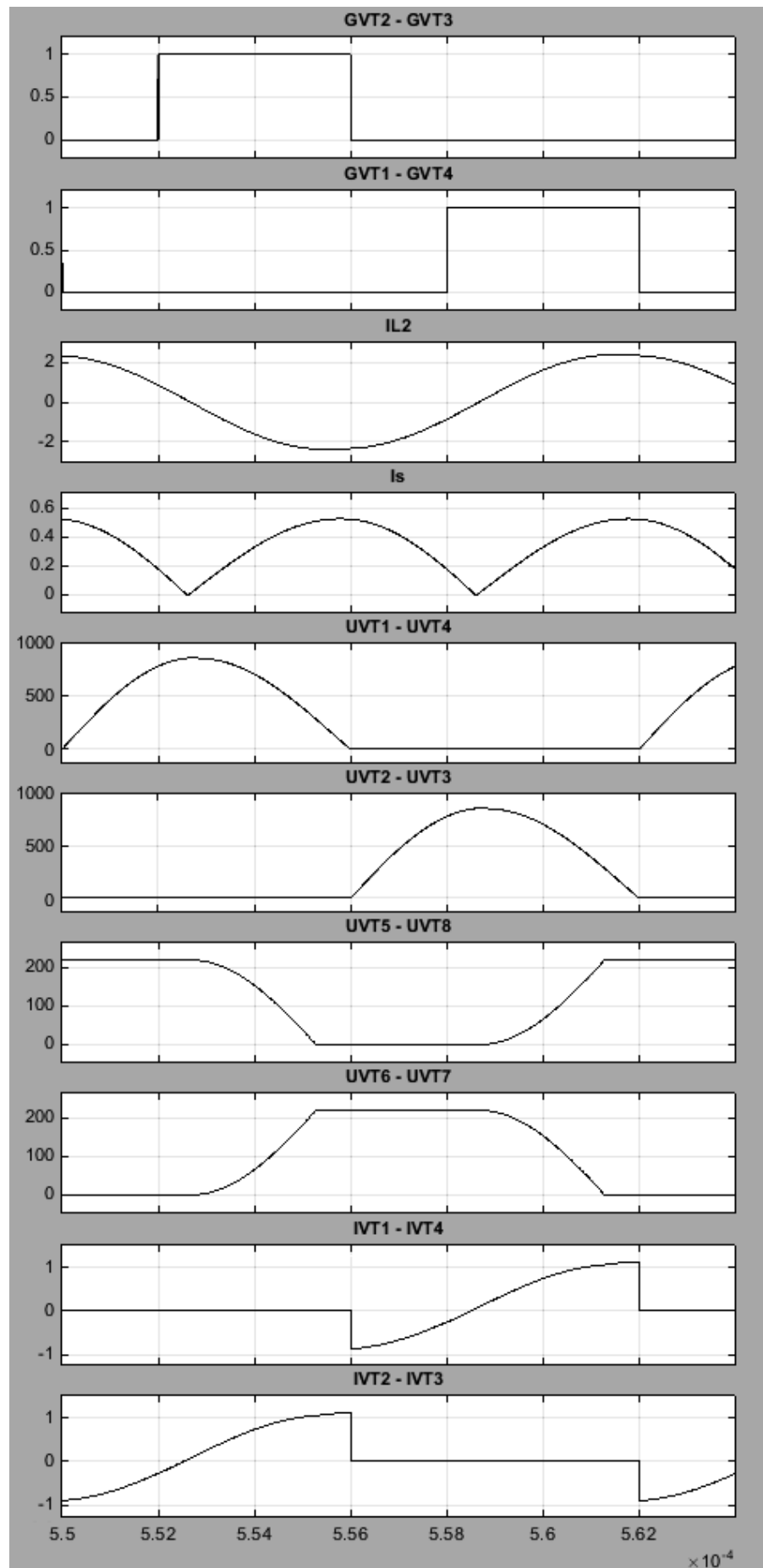


Рис. 4.3. Часові діаграми струмів і напруг перетворювача з одним модулем

GVT2 - GVT3, GVT1 - GVT4 – сигнали керування транзисторами на первинній стороні; IL2 – струм через індуктивність розсіювання трансформатора; IS – струм через джерело синусоїдальної напруги; UVT1 - UVT4, UVT2 - UVT3 – напруга на транзисторах первинної сторони, UVT5 - UVT8, UVT6 - UVT7 – напруга на транзисторах вторинної сторони, IVT1 - IVT4, IVT2 - IVT3 – струм через транзистори первинної сторони.

Щоб оцінити ефект від використання модульних перетворювачів проводилося два дослідження: визначався коефіцієнт пульсацій при сталих габаритах фільтра, результати наведені в табл. 4.1, та при сталому значенні коефіцієнта пульсацій, результати в табл. 4.2. Отримані значення підтверджують те, що збільшення кількості комірок сприяє зменшенню коефіцієнта пульсацій, та дозволяє використовувати для згладжування реактивні компоненти менших розмірів.

Таблиця 4.1.

Залежність пульсацій від кількості комірок при сталих габаритах фільтра

m	$K_p$
1	0.072
2	0.0047
3	0.0008
4	0.0002

Таблиця 4.2.

Залежність габаритів фільтра від кількості комірок m при сталому коефіцієнті пульсацій на виході

m	L	C
1	7 мГн	3.02 нФ
2	1.9 мГн	0.82 нФ
3	696 мкГн	0.3 нФ
4	0 Гн	0 Ф

На рис. 4.4 зображений графік залежності коефіцієнта пульсацій  $K_p$  на виході фільтра від кількості комірок m. На рис. 4.5 – графік залежності габаритів фільтра від кількості комірок.



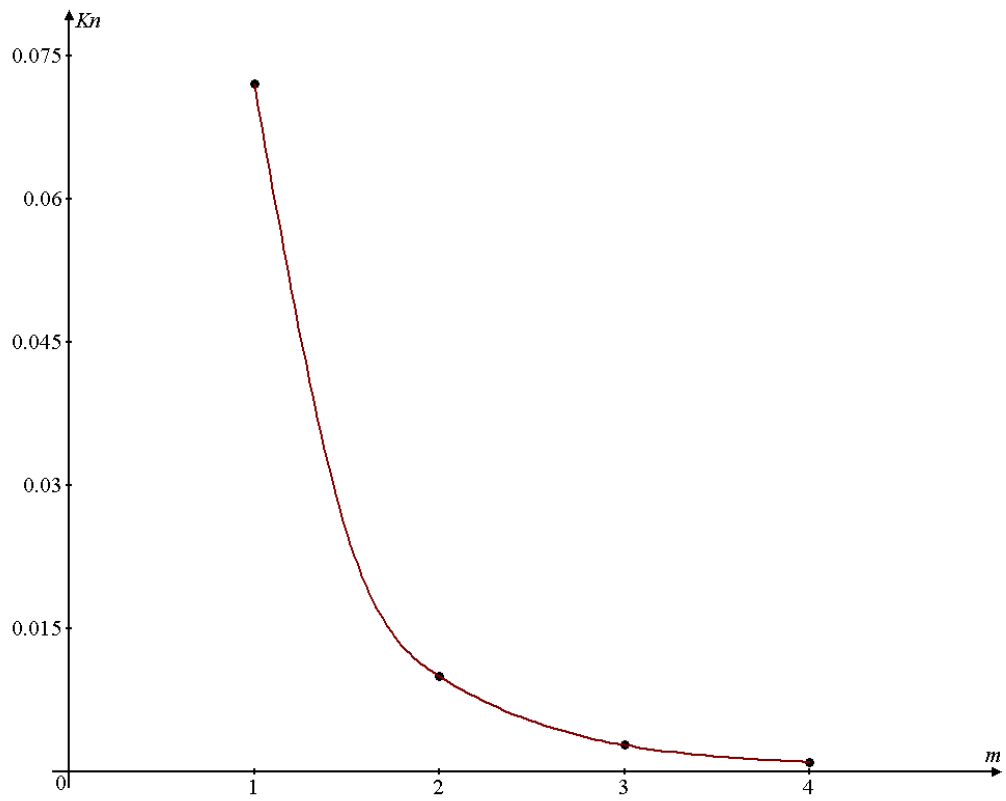


Рис. 4.4. Залежність коефіцієнта пульсацій на виході перетворювача від кількості комірок

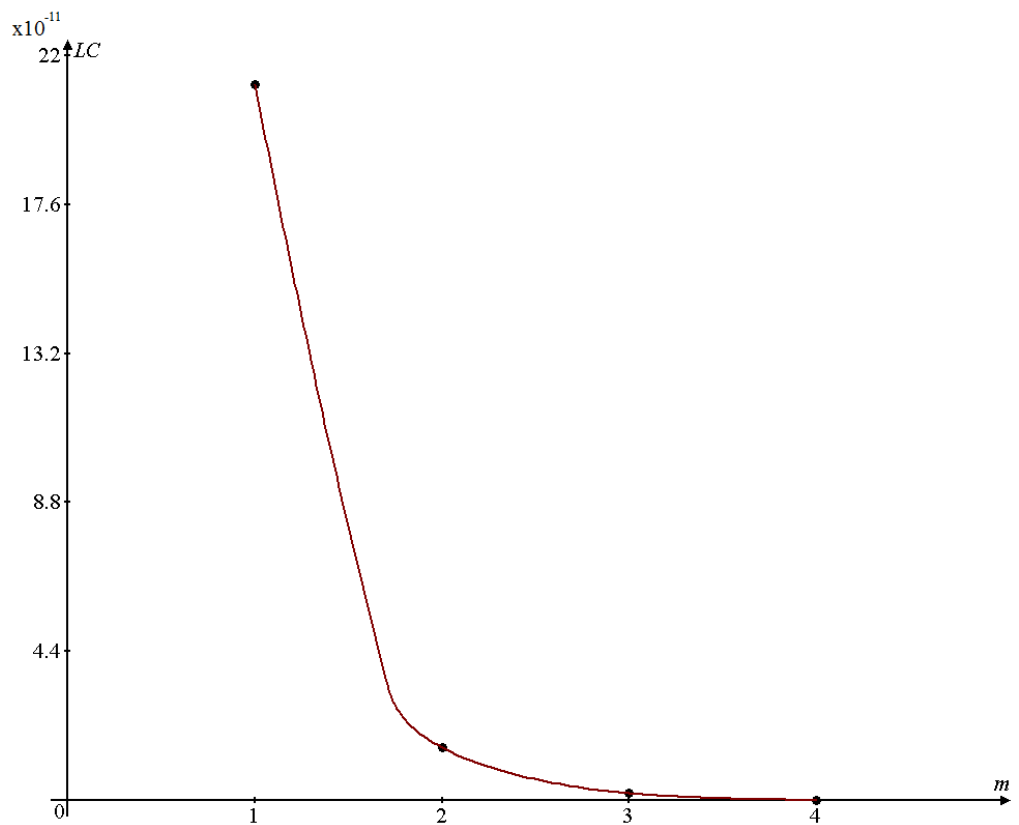


Рис. 4.5. Залежність габаритів фільтру від кількості комірок при сталому відношенні  $L/C$

Залежність ККД від кількості комірок представлена на рис. 4.6, а залежність ККД від потужності в однокомірковому перетворювачі з м'якою і жорсткою комутацією показана на рис. 4.7.

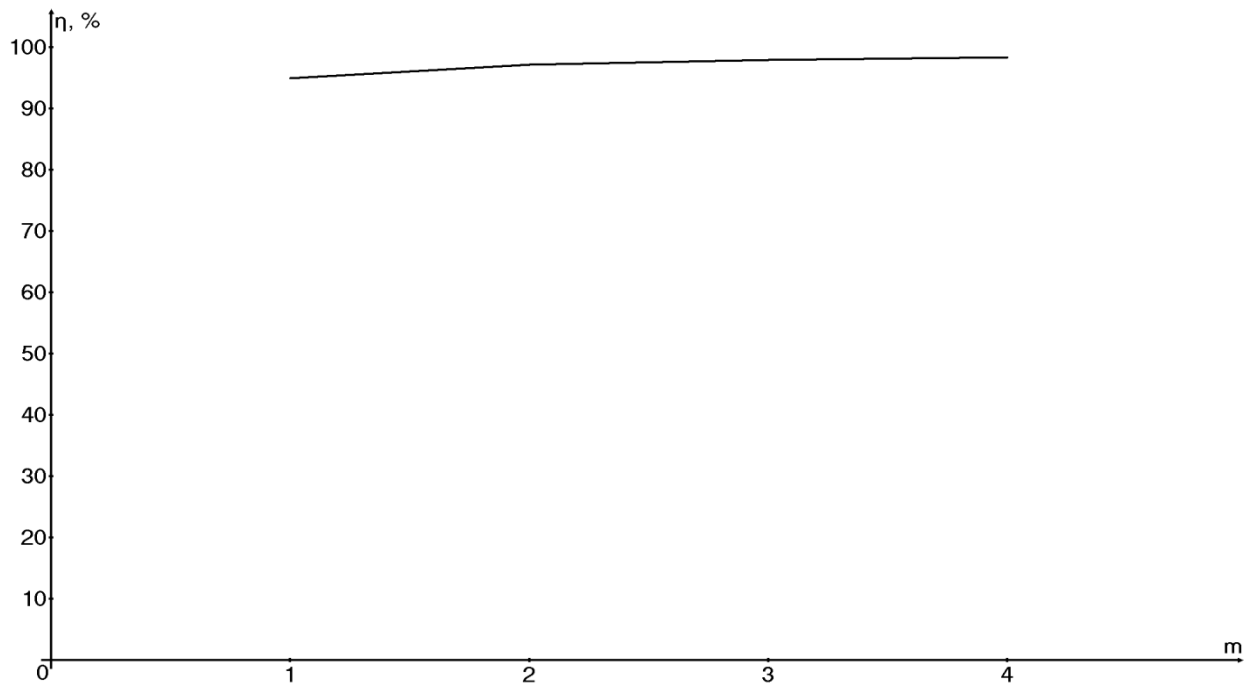


Рис. 4.6. Залежність ККД перетворювача від кількості комірок

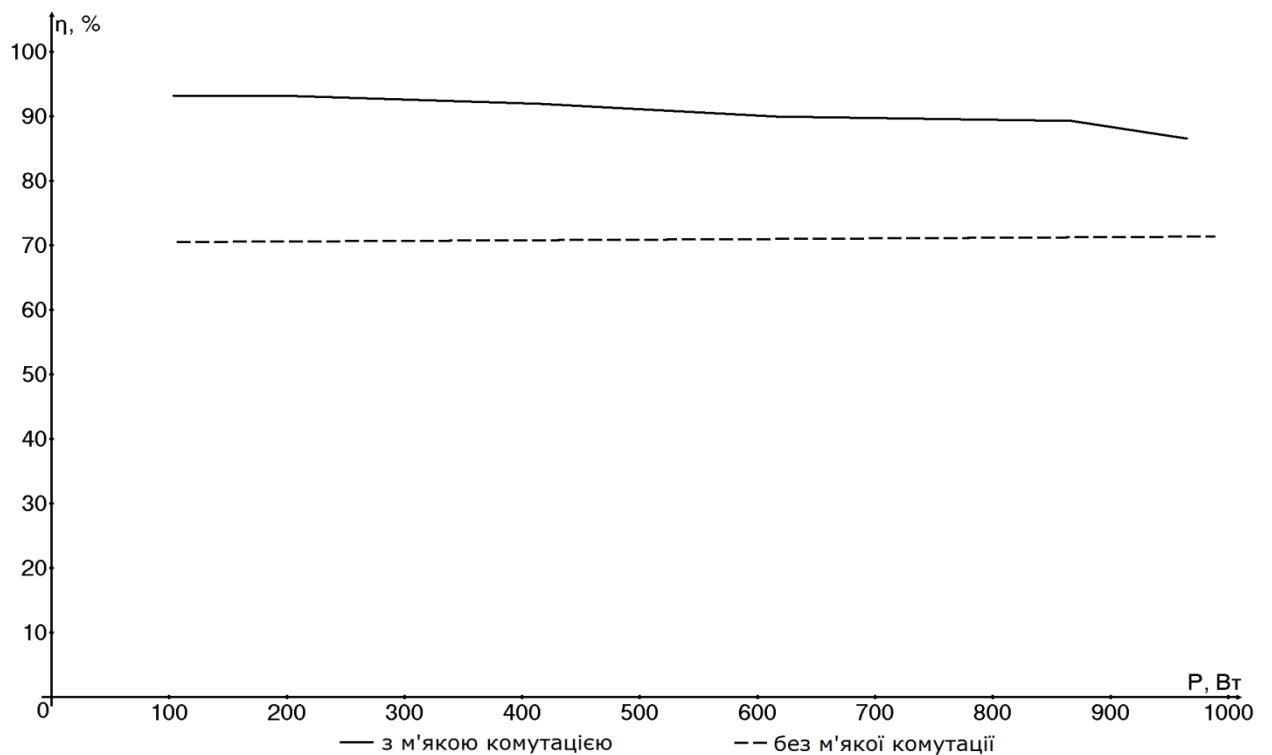


Рис. 4.7. Залежність ККД перетворювачів від потужності

Визначений шляхом моделювання ККД для різної кількості комірок підтверджує, що при паралельному з'єднанні комірок еквівалентний опір зменшується, тому ККД зростає.

З аналізу рис. 4.7 можна зробити висновок, що ККД перетворювача з м'якою комутацією на 10-15 % більше ніж у перетворювача з жорсткою комутацією у діапазоні потужностей 100-1000 Вт за рахунок відсутності динамічних втрат при перемиканні, а отже перевага запропонованого перетворювача є очевидною.

## 4.2. Моделювання перетворювача змінного струму

При роботі перетворювача з джерелом змінного струму встановлюється кероване джерело синусоїдальної напруги E2 (рис. 4.8).

Блоками Repeating Sequence керується матричний перетворювач на вторинній стороні, протягом першої половини періоду мережі струм пропускається в одному напрямку, а протягом другої – в зворотному.

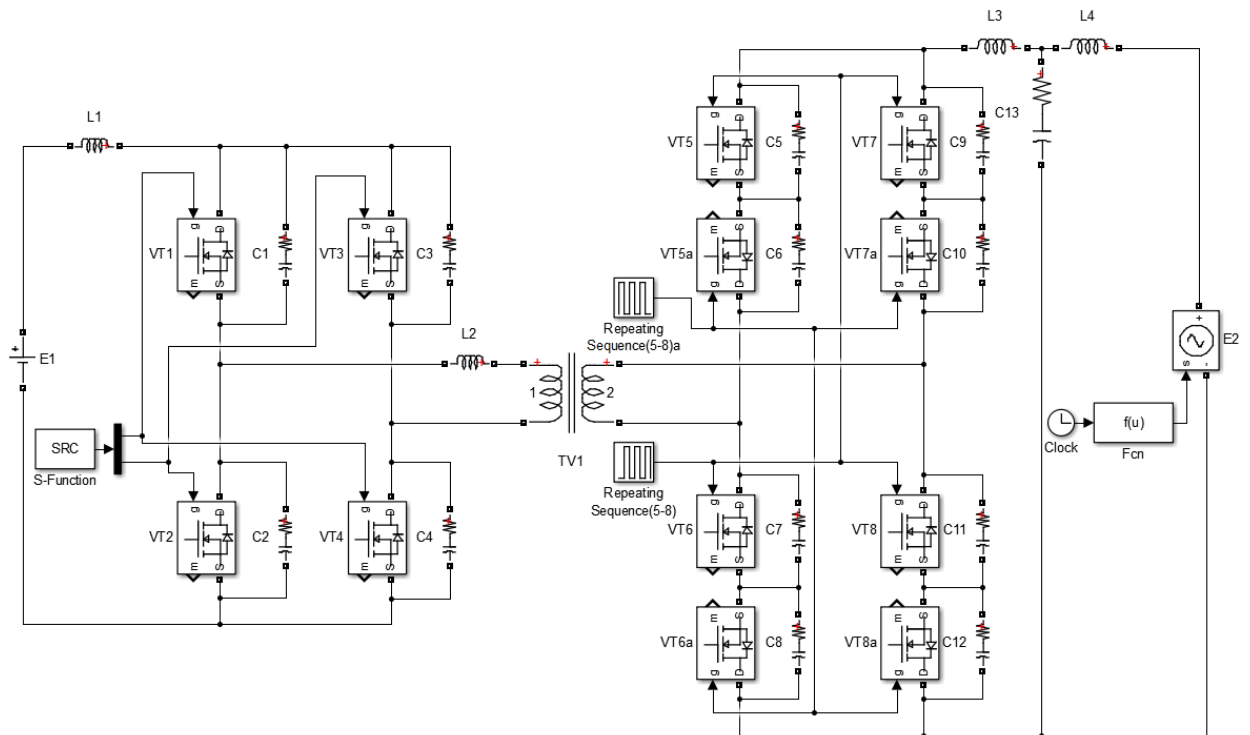


Рис. 4.8. Модель перетворювача при роботі з джерелом змінного струму.

Керування інвертором на первинній стороні здійснюється за допомогою блоку S-Function. Управління відбувається по принципу широтно-імпульсної модуляції. Шляхом моделювання схеми на постійному струмі визначені діапазони тривалості і періоду імпульсів на різних значеннях вихідної потужності при яких перетворювач працює в режимі м'якої комутації. В залежності від миттєвого значення, яке необхідно отримати на виході випрямляча в конкретний момент часу обирається значення тривалості та періоду імпульсу і згідно цих значень формується імпульс керування транзисторами. Програмний код S-функції наведений у додатку А.

В двонаправленому перетворювачі на змінному струмі досліджується, як покращується форма струму зі збільшенням кількості комірок. На рис. 4.9. зображені осцилограми струму у джерелі змінної напруги.

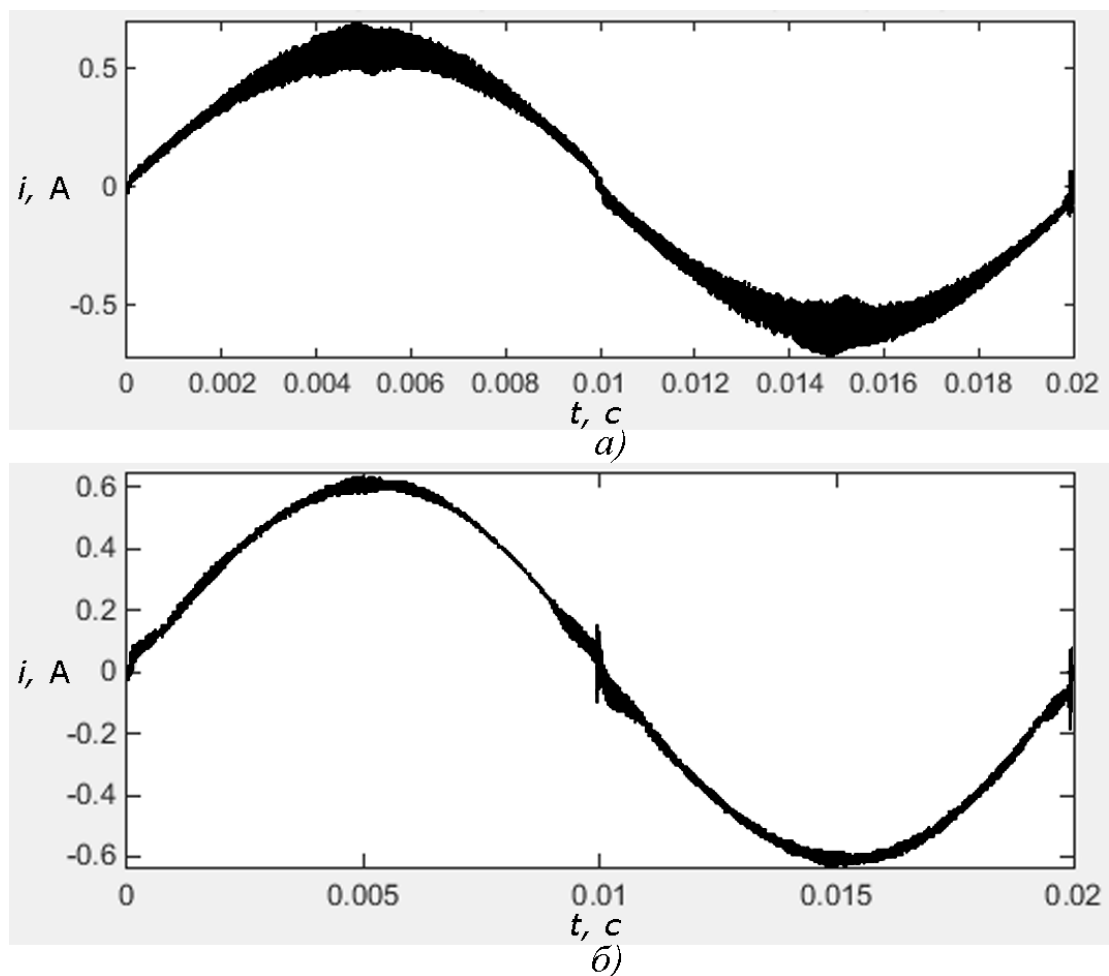


Рис. 4.9. – Діаграма вхідного струму джерела синусоїдальної напруги а) одномодульного перетворювача, б) двомодульного перетворювача

Коефіцієнт нелінійних спотворень струму в однокомірковому перетворювачі складає  $\text{THD} = 9,48 \%$ , а в двокомірковому  $\text{THD} = 4,29 \%$ . Отже зі збільшення кількості комірок форма струму покращується.

### **Висновки до четвертого розділу**

Моделювання роботи двонаправленого модульного перетворювача, зокрема проведення дослідження залежності пульсації від кількості комірок при сталих габаритах фільтра підтвердило ефективність використання модульних перетворювачів, оскільки зі збільшенні числа комірок від однієї до чотирьох спостерігається зменшення пульсацій від 0,072 до 0,0002. А отримана залежність габаритів фільтра від кількості комірок при сталому значенні пульсацій дозволила визначити наскільки можна зменшити параметри реактивних елементів вихідного фільтра. Отримана залежність ККД перетворювача від потужності показала, що перетворювач з м'якою комутацією має на 10-15% вище коефіцієнт корисної дії ніж перетворювач з жорсткою комутацією. Дослідження роботи перетворювача на змінному струмі дозволило встановити, що зі збільшенням кількості комірок форма струму покращується, зокрема коефіцієнт нелінійних спотворень у однокомірковому перетворювачі становить  $\text{THD} = 9,48 \%$ , а в двокомірковому  $\text{THD} = 4,29 \%$ .

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап – це загальна назва для компанії, яка перебуває на перших стадіях діяльності. Стартапи засновані одним, або кількома підприємцями, які мають на меті розробити товар, який на їх думку має попит на ринку. Такі компанії, зазвичай починають з високих витрат і обмеженого доходу, тому потребують стартового капіталу, який шукають серед венчурних капіталістів [58].

Головною відмінністю стартапа від малого бізнесу є темп розвитку. Малий бізнес може рости повільно, або не рости взагалі і при цьому успішно займати своє місце на ринку. Для стартапу стрімкий ріст є необхідним. Стартап має мало спільних рис з дрібним підприємництвом, він нестабільний, його розвиток непередбачуваний в далекій перспективі.

Пройшовши певний етап розвитку такий проект перестає бути стартапом, отримує визнання і масштабується, або закривається як неконкурентоспроможний, або незатребуваний.

Згідно статистики 90 % стартап-проектів не отримують визнання і змушені закриватися. Причинами невдач проектів є неправильна стратегія розвитку, переоцінена важливість проекту, відсутність досвіду роботи, або некомпетентність команди. Факторами, що відрізняють успішні стартапи від невдалих є: затребуваність на ринку, постійний і всеосяжний контроль процесів на ринку та всередині компанії, швидкий ріст. Одним з способів досягнення успіху є планування і дотримання етапів розроблення стартап-проекту [59, 60].

### **Етапи розробки стартап – проекту**

#### *1. Маркетинговий аналіз стартап – проекту*

Під час цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;

- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

## *2. Організація стартап – проекту*

Під час цього етапу:

- складається календарний план – графік реалізації стартап – проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації.

## *3. Фінансово – економічний аналіз та оцінка ризиків проекту*

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово – економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

## *4. Заходи з комерціалізації проекту*

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування пропозиції.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно, створюють передумови для успішного ринкового старту [61].

В рамках магістерської дисертації був виконаний перший етап розробки стартап – проекту, що передбачає маркетинговий аналіз стартап – проекту зарядного пристрою акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії.

### 5.1. Опис ідеї проекту

В табл. 5.1 наведено опис ідеї проекту, а в табл. 5.2 визначені сильні слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап-проекту		
Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Створення та реалізація зарядного пристрою акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії.	1. Централізована система електроживлення	Додатковий заробіток на використанні енергії накопиченої в акумуляторі в години, коли транспортний засіб перебуває на парковці
	2. Автономна система електроживлення	Забезпечення резервного електропостачання приватного будинку в разі відключення електроенергії

Таблиця 5.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту						
Техніко-економічні характеристики	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W слабк а сторо на	N нейтр альна сторо на	S сильн а сторо на
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
Можливість двонаправленого передавання енергії	+	+	-			+
Робота з відновлювальними джерелами енергії	+	-	-			+
Модульна структура	+	-	-			+
М'яка комутація	+	+	-			+



## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначені ідеї проекту та технології її реалізації. У табл. 5.3 наведена технологічна здійсненність ідеї стартап-проекту.

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Відбирання максимальної потужності від відновлювальних джерел енергії	Розробка, дослідження	Наявна	Доступна
2	Забезпечення корекції коефіцієнту потужності	Розробка, дослідження	Наявна	Доступна

Технологічний аудит ринку показав, що технічно та технологічно реалізувати продукт можливо.

## 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

Шляхом аналізу були визначені можливості, які можна використати протягом ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, що можуть виникнути на шляху реалізації проекту. Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту наведено в табл. 5.4.,

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	8
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	28000
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Згідно з ДСТУ
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	40%

Оскільки, динаміка ринку зростає, а кількість головних гравців на ринку не велика, є всі можливості вийти на ринок і бути конкурентоспроможним, а розвиток ідеї проекту є перспективним та доцільним.

Визначені потенційні клієнти, відмінності у їх поведінці, сформовані імовірні вимоги потенційних споживачів до продукції та компанії-постачальника, характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту наведена в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
Забезпечення регулювання кривої навантаження мережі	Фізичні особи, компанії, що надають послуги паркування	Експлуатація в різних умовах	- до продукції: Ефективність Якість Надійність - до компанії-постачальника: Професіоналізм Чесність Порядність Технічна підтримка

У табл. 5.6 визначені фактори загроз, що можуть перешкоджати ринковому впровадженню проекту, їх зміст та можлива реакція компанії-виробника

Таблиця 5.6

Фактори загроз

<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
Конкуренція	Можливість появи нових гравців на ринку, чия продукція буде кращою за ту ж ціну	Коригування алгоритмів системи керування модулями перетворювача для досягнення кращих вихідних характеристик

У табл. 5.7 визначені фактори можливостей, що можуть сприяти ринковому впровадженню проекту, їх зміст та можлива реакція компанії-виробника

Таблиця 5.7

Фактори можливостей		
<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливостей</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
Менші масогабаритні параметри	Менші масогабаритні параметри перетворювача дають можливість зробити перетворювач більш компактним та зручним	Залучення нових клієнтів за допомогою маркетингу

Результати ступеневого аналізу конкуренції на ринку наведено в табл. 5.8

Таблиця 5.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку		
<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: чиста	Споживач обирає компанію, чия продукція краща	Підвищення якості товару та обслуговування
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальна	Відноситься до вузького ринку збуту	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Притаманна лише одній галузі застосування	Розширення функціоналу та галузей застосування
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Відрізняється топологією перетворювачів	Покращення ефективності перетворювача
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Привабливішою є дешевша продукція Рентабельнішою є якісніша продукція	Покращення цінової політики та якості товару
6. За інтенсивністю: не марочна	Не жорстка конкуренція	Не агресивні форми піару

У табл. 5.9 наведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності, зокрема критеріїв, якими керуються потенційні клієнти при виборі продукту перед купівлею.

Таблиця 5.9

## Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
Ціна	Серед подібних за характеристиками продуктів, покупці обиратимуть той, який дешевше
Якість	Серед подібних по ціні продуктів, покупці обиратимуть той, який має кращі характеристики
Відомість	При рівності перших двох факторів перевага надаватиметься більш відомому товару

У табл. 5.10 наведено результати порівняльного аналізу сильних та слабких сторін.

Таблиця 5.10

## Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін “Nuvve”

<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “Nuvve”</i>						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна							+	
Якість				+				
Відомість				+				

В табл. 5.11 представлені результати аналізу слабких та сильних сторін проекту, а також можливості та загрози для нього.

Таблиця 5.11

## SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Модульна структура, забезпечує вищу надійність	Слабкі сторони: Нижча в порівнянні з аналогами максимальна потужність
Можливості: Можливість додаткового зменшення масогабаритних параметрів	Загрози: Поява більш ефективних топологій перетворювача та систем керування

#### 5.4. Розробка маркетингової програми проекту

Для розробки маркетингової програми стартап-проекту спершу потрібно визначити основну стратегію конкурентної поведінки, результати якої наведено у табл. 5.12.

Таблиця 5.12

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>Чи є проект «періопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
Ні	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

В табл. 5.13 наведено визначення ключових переваг концепції потенційного товару, тобто, вигоду, яку пропонує дана система для споживачів.

Таблиця 5.13

## Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
Забезпечення регулювання кривої навантаження електромережі	Реалізація двонаправленого передавання електроенергії	Ефективність; Надійність; Дешевизна

Рівень цін на товари замітники та можливі аналоги, рівень доходів цільової групи споживачів, а також верхню та нижню межу цін на ПЗ наведено у табл. 5.14.

Таблиця 5.14

## Визначення меж встановлення ціни

<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
120-130% від ціни нашого продукту	120-130% від ціни нашого продукту	Від 100000 грн	30000-40000 грн

У табл. 5.15 представлено формування системи збуту, зокрема специфіка закупівельної поведінки потенційних клієнтів, функції збуту, глибина каналу збуту та оптимальна система збуту

Таблиця 5.15

## Формування системи збуту

<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
Роздрібна та оптова закупівля продукту	Збут на налаштування товару	Усі можливі (глибока)	Власна

**Висновки до п'ятого розділу**

Проведений аналіз ринку для розроблюваного проекту показав, що даний проект має можливості досягти успіху та зайняти свою нішу на ринку. Отримана інформація показує, що з кожним роком попит на даний тип товару зростає, що свідчить про високі перспективи впровадження проекту. Перешкодами до входження на ринок може стати потреба у великій кількості кваліфікованих кадрів та дорогого обладнання, а також конкурентний тиск з боку великих компаній, що займаються розробкою подібних зарядних пристроїв. Втім правильно розставлені пріоритети, та дотримання стратегії розвитку збільшує шанси зарекомендувати свій продукт на ринку та отримати прибуток з проекту. Подальша імплементація проекту є доцільною та рентабельною.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації проаналізовано проблему інтеграції автомобільних акумуляторів до централізованих або автономних систем електроживлення.

1. Проведений огляд методів реалізації концепції V2G (Vehicle to Grid) в системах електропостачання та оцінена економічної доцільності використання цієї концепції.

2. Серед існуючих топологій двонаправлених перетворювачі обрано ізольовану топологію з матричним перетворювачем, на її основі розроблений універсальний зарядний пристрій електромобіля з двостороннім передаванням енергії. Аналітичним методом проведені розрахунки компонентів перетворювача.

3. Для підвищення ефективності запропонований модульний підхід до побудови перетворювача. Аналітичним методом оцінені переваги використання такого підходу, зокрема отримана залежність коефіцієнту пульсацій від кількості комірок та оцінений вплив кількості комірок на зміну коефіцієнту корисної дії перетворювача

4. Проведене моделювання в програмному середовищі Matlab Simulink. Порівняння коефіцієнтів корисної дії показало, що у перетворювача з м'якою комутацією ККД на 10-15 % вище ніж у аналогічного перетворювача з жорсткою комутацією. Оцінено ефект від використання модульного перетворювача при роботі з джерелами постійної та змінної напруги, зокрема проведено порівняння коефіцієнтів пульсації в перетворювачах із різною кількістю комірок при сталому значенні габаритів згладжувального фільтра показало що зі збільшенням кількості комірок від однієї до чотирьох можна досягти зменшення коефіцієнту пульсацій від 0,072 до 0,0002. Також підібрані параметри фільтра для різної кількості комірок, при яких забезпечується однаковий коефіцієнт пульсацій. Дослідження роботи перетворювача на змінному струмі показало, що збільшення кількості комірок покращує форму

вихідного струму, оскільки коефіцієнт нелінійних спотворень струму в одномодульному перетворювачі складає  $\text{THD} = 9.48 \%$ , а в двомодульному  $\text{THD} = 4.29\%$ .

Отримані результати показали, що використання модульної топології є ефективним, а використання самого перетворювача згідно концепції Vehicle to Grid має великий потенціал.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Han S., Han Sh. Economic feasibility of V2G frequency regulation in consideration of battery wear. *Energies*. 2013. Vol. 6, № 1. P. 748-765.
2. Andersen P. B., Olesen O. J., Poilasne G., Chri B. The Nikola project intelligent electric vehicle integration IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Istanbul, Turkey, 2014.
3. Nissan Leaf can now power the office. Nissan Motor Co. : веб-сайт: URL: <http://blog.alliance-renaultnissan.com/blog/nissan-leafs-can-now-power-office-wellhome> (дата звернення: 02.03.2020)
4. Некрасов С. А., Цырук С. А., Жармагамбетова М. С. О системном подходе к проблеме развития аккумулирования энергии. *Промышленная энергетика*. 2013. № 3. С. 2-6.
5. Калашников В.И., Чепига А.А. Анализ концепции vehicle-to-grid. *вестник донецкого национального технического университета Донецк* 2019. № 2(16) С. 89-94.
6. Шидловський А. К., Жаркін А. Ф., Павлов В. Б., Новський В. О. Вплив розвитку зарядної інфраструктури електромобільного і гібридного транспорту на режими електричних мереж. *Технічна електродинаміка*, 2018. № 3. С. 74-81.
7. Shuai, W.; Maillé, P.; Pelov, A. Charging Electric Vehicles in the Smart City: A Survey of Economy-Driven Approaches. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2016/ Vol. 17, P. 2089–2106. DOI: 10.1109/TITS.2016.2519499
8. Guo, J.; Yang, J.; Lin, Z.; Serrano, C.; Cortes, A.M. Impact Analysis of V2G Services on EV Battery Degradation—A Review. In *Proceedings of the 2019 IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 23–27 June 2019. P.248–253 DOI: 10.1109/PTC.2019.8810982.
9. Adrene Briones James Francfort Paul Heitmann Michael Schey Steven Schey John Smart “Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow Regulations and Building Codes Review by the AVTA” 2012. 98 P.

10. Saponara, S., Saletti, R., & Mihet-Popa, L. Hybrid micro-grids exploiting renewables sources, battery energy storages, and bi-directional converters. *Applied Sciences*, 2019. Vol. 22, № 9. P. 4973.
11. Shari D., Iqbal M., Alam F., Ahmad A. State of the Art Review of Electric Vehicle to Grid (V2G) technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 561, P. 1-11. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012103
12. Research on the involvement of power battery in power grid peak shaving. Linkage : веб-сайт. URL: <https://www.linkagepower.com/info/research-on-the-involvement-of-power-battery-i-35579908.html> (дата звернення: 23.03.2020)
13. Tohid Harighi, Ramazan Bayindir, Sanjeevikumar Padmanaban, Lucian Mihet-Popa, Eklas Hossain An Overview of Energy Scenarios, Storage Systems and the Infrastructure for Vehicle-to-Grid Technology *Energies* 2018. Vol. 11 № 8, P. 2174. DOI: 10.3390/en11082174
14. Кулова Т. Л., Николаев И. И., Фатеев. В. Н., Алиев. А. Ш. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии, Проблемы химии 2018. № 1. С. 9-34.
15. Anhabri F., Kais S. Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014. № 43. P. 1073-1089.
16. Duan, Zhiyu (2012). *Comparison of Vehicle-to-Grid versus Other Grid Support Technologies*. Master's project, Duke University. P. 29
17. Milligan M., Danohoo P., Lew D., Ela E. Operating reserves and wind power integration: An international comparison. 9th Annual International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems. Quebec City, Canada. 2010. P. 1-16.
18. Brooks A. N. Vehicle Charging as a Source of Grid Frequency Regulation. *World Electric Vehicle Journal* 2013. Vol. 6, № 1. P. 1-18.

19. Xu S., Zhang L., Yan Z., Feng D., Wang G., Zhao X. Optimal Scheduling of Electric Vehicles Charging in low-Voltage Distribution Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2016. Vol. 11, № 4. P. 810-819 DOI: 10.5370/JEET.2016.11.4.810.
20. Mehta, D. Srinivasan, M. Khambadkone, J. Yang, A. Trivedi. Smart Charging Strategies for Optimal Integration of Plug-in Electric Vehicles within Existing Distribution System Infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2016. Vol. 9, № 1. P. 299-312. DOI: 10.1109/TSG.2016.2550559
21. Hoang D., Wang P., Niyato D. Charging and dis-charging of plug-in electric vehicles (PEVs) in vehicle-to-grid (V2G) systems: a cyber insurance-based model. *IEEE Access* 2017. Vol. 5, P. 732–754 DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2649042
22. Zheng Y., Dong Z.Y., Xu Y., Meng K., Zhao J.H., Qiu J. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: Comparison study and optimal planning. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29, № 1. P 221–229. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2278852.
23. Adegbohun F., Von Jouanne A., Lee K. Y. Autonomous battery swapping system and methodologies of electric vehicles. *Energies*, 2019. Vol.12, № 4, P. 1-14. DOI: 10.3390/en12040667.
24. Nissan Leaf review. Drive : веб-сайт. URL: <https://www.drive.com.au/new-car-review/2019-nissan-leaf-review-122067>
25. Износ батарей в популярных электрокарах составляет 2,3 % в год по данным Geotab. *Elektrovesti* : веб-сайт. URL: [https://elektrovesti.net/69144\\_iznos-batarey-v-populyarnykh-elektrokarakh-sostavlyayet-23-v-god-po-dannym-geotab](https://elektrovesti.net/69144_iznos-batarey-v-populyarnykh-elektrokarakh-sostavlyayet-23-v-god-po-dannym-geotab) (дата звернення: 05.04.2020)
26. Луценко І. М., Циган П. С. Технічні та економічні аспекти використання електромобілів в електричних мережах України Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Енерго- та ресурсозберігаючі технології. 2017. № 6 (107). С. 21-30.

27. Хацкевич Ю.В., Луценко І.М., Рухлов А.В., Перспективи регулювання графіка навантажень енергосистеми за допомогою електромобілів. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2017. № 5. С. 86-93.
28. Gabbar H. Smart Energy Grid Engineering - British Columbia, Canada, Academic Press, 2016. 568 p. ISBN 978-0-12-805343-0.
29. Salvatti, G.A.; Carati, E.G.; Cardoso, R.; da Costa, J.P.; de Oliveira Stein, C.M. Electric vehicles energy management with V2G/G2V multifactor optimization of smart grids. *Energies* 2020. № 13, P. 1–22. DOI: 10.3390/en13051191.
30. Here's what you need to know about dc fast charging MyEv : веб-сайт. URL: <https://www.myeV.com/research/buyers-sellers-advice/heres-what-you-need-to-know-about-dc-fast-charging> (дата звернення: 10.04.2020)
31. Wu X, Freese D, Cabrera A, Kitch WA. 'Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 34 P. 1-22. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.007.
32. Guo D., Zhou C., Potential performance analysis and future trend prediction of electric vehicle with V2G/V2H/V2B capability. *AIMS Energy*, 2016. Vol. 4, № 2. P. 331-346 DOI: 10.3934/energy.2016.2.331.
33. Monteiro, V., Afonso, J.A., Ferreira, J.C. and Afonso, J.L., Vehicle electrification: New challenges and opportunities for smart grids *Energies* 2019. Vol. 12, № 1. P. 1-20. DOI:10.3390/en12010118.
34. Jung, J. H., Kim, H. S., Ryu, M. H., & Baek, J. W. Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012. Vol. 28 № 4, P. 1741-1755. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2213346.
35. Zhou Y, Li X. Vehicle to grid technology: A review. 34th Chinese Control Conference (CCC)., 2015. Jul 28 P. 9031-9036.
36. Mira M. C., Zhang Z., Andersen M. A. Review of high efficiency bidirectional dc-dc topologies with high voltage gain. In 2017. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2017. P. 1-6.

37. Pathak A., Sahu V., "Review & study of bidirectional of DC-DC converter topologies for electric vehicle application." *International Journal of Science, Engineering and Technology* 2015. Vol. 3, № 6. P. 101-105.
38. Тительмаєр К., Гусев О., Велігорський О. Огляд неізольованих двонаправлених топологій перетворювачів для портативних застосувань на базі відновлювальних джерел електроенергії. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 176-188.
39. Zhang, J., Lai, J.S., Kim, R.Y., Yu, W. High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter. *IEEE Transactions on power electronics*, 2007. Vol. 22, № 4. P. 1145-1153. DOI: 10.1109/TPEL.2007.900462.
40. Martinez A.F. Contributions to the Modulation and Closed-Loop Control of Multilevel Dual-Active-Bridge DC-DC Converters : Doctoral thesis. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya. 2017. P. 172.
41. Xie, Y., Sun, J., Freudenberg, J. S. Power flow characterization of a bidirectional galvanically isolated high-power DC/DC converter over a wide operating range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009. Vol. 25, № 1. P. 54-66.
42. Marcelino, F. L., Sathler, H. H., de Oliveira, T. R., Donoso-Garcia, P. F. Modeling and control of a Dual Active Bridge for energy storage in DC microgrid applications. In 2017. *IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)* (2017, April) (P. 1-8).
43. Xuwei, P., Rathore, A. K. Novel bidirectional snubberless naturally commutated soft-switching current-fed full-bridge isolated DC/DC converter for fuel cell vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013. Vol. 61, № 5, P. 2307-2315.
44. Qin H. Dual active bridge converters in solid state transformers : Doctoral Dissertations. Missouri university of science and technology. 2012. P. 112.

45. Jiang, J., Bao, Y., Wang, L. Y. Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid. *Energies* Vol. 7, № 8. P. 4858-4894.
46. Sridhar A., Prabu A., Bidirectional AC-DC Converter for Vehicle-to-Grid (V2G) Applications : Master's Theses. Marquette University 2015. P. 62.
47. Li Y., Junyent-Ferré A., Judge P.D. A Boost-Full-Bridge-Type Single-Active-Bridge Isolated AC-DC Converter. In 2019 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* 2019. Mar 17 P. 2021-2028.
48. Weise, N. D., Castelino G., Basu K., Mohan N, A single-stage dual-active-bridge-based soft switched AC–DC converter with open-loop power factor correction and other advanced features. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. Vol. 29, № 8. P. 4007-4016. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293112.
49. Saha J., Yadav G., Panda S., A Bidirectional Matrix-Based AC-DC Dual-Active Bridge for Modular Solid-State-Transformers. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* 2020. P. 1136-1141.
50. Varajao D., Araujo R., Miranda L., Lopes J., Weise N., Control of an isolated single-phase bidirectional AC-DC matrix converter for V2G applications. *Electric Power Systems Research*, 2017. P.19-29.
51. Зиновьев Г. С., Силовая электроника . 5-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2012. 667 с.
52. Denisov Y. O., Stepenko S. A., Gorodny A. N., Kravchenko A. O. Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters. *IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2014. P. 393-397. DOI: [10.1109/ELNANO.2014.6873446](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2014.6873446)
53. Бондаренко О. Ф., Бондаренко Ю. В., Сафронов П. С., Калошин О. О. Проблеми оцінки надійності перетворювачів з модульною топологією. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2017. № 27(1249). С. 238-243.

54. Zumel P., Ortega L., Lazaro A., Fernandez C., Barrado A., Rodriguez A. Modular dual-active bridge converter architecture. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 52, № 3. P. 2444–2455. DOI: 10.1109/TIA.2016.2527723.
55. Hu T., Khan M. M., Xu K., Zhou L., Rana A. Design of an input-parallel output-parallel multi-module dc-dc converter using a ring communication structure. *J. Power Electron*. 2015. № 15. P. 886–898. DOI: 10.6113/JPE.2015.15.4.886.
56. Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D., Vinnikov D., and Galkin I., "Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles," *Energies*, 2020. Vol. 13, № 4. 774 с.
57. Verbytskyi I., Bondarenko O., and Vinnikov D., "Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding," in 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2017. P. 1-6.
58. Startup Investopedia : веб-сайт. URL: <https://www.investopedia.com/terms/s/startup.asp> (дата звернення: 27.11.2020).
59. What's the Difference Between a Small Business Venture and a Startup? BPlans : веб-сайт. URL: <https://articles.bplans.com/whats-difference-small-business-venture-startup> (дата звернення: 27.11.2020).
60. The Simplified Way to Manage Your Startup: Mistakes, Methods, Best Practices Medium : веб-сайт. URL: <https://medium.com/swlh/the-simplified-way-to-manage-your-startup-mistakes-methods-best-practices-28d8804a4426> (дата звернення: 27.11.2020).
61. Розроблення стартап-проекту. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / за ред. О. А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

## ДОДАТОК А.

### Лістинг програмного забезпечення

```
function [sys,x0,str,ts] = MPPT(t,x,u,flag)
```

```
switch flag,
```

```
case 0,
```

```
    [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
case 3,
```

```
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```
case 9,
```

```
    sys=[];
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(par)
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
```

```
sizes.NumDiscStates = 0;
```

```
sizes.NumOutputs = 2;
```

```
sizes.NumInputs = 0;
```

```
sizes.DirFeedthrough = 1;
```

```
sizes.NumSampleTimes = 1;
```

```
Old_values.tstart = 0; %значення часу від якого рахувати
```

```
Old_values.ti = 0;
```

```
Old_values.tper = 0;
```

```
set_param(gcb,'UserData',Old_values); %збереження значення потужності і  
коефіцієнту заповнення
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
x0 = [];
```



```

str = [];
ts = 0.01e-5;    %часовий інтервал між сусідніми вимірюваннями АЦП

% end mdlInitializeSizes

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
Um=311;
timin = 0.03e-5;
timid = 0.1e-5;
timax = 0.9e-5;
tpermin = 0.84e-5;
tpermid = 0.88e-5;
tpermax = 2.05e-5;
Old_values = get_param(gcb,'UserData'); %зчитування збережених даних з
буфера
sys(1) = 0;
sys(2) = 0;
fi=pi/100;
if(t == 0)
    Old_values.ti=timin;
    Old_values.tper = tpermin;
    sys(1) = 0;
    sys(2) = 1;
elseif(t >= (Old_values.tstart + Old_values.tper))
    U=abs(Um*sin(2*pi*50*t))
    k=U/Um
    if(k<0.08)
        k=k/0.08;
        Old_values.tper = (tpermid-tpermin)*k+tpermin;
        Old_values.ti = (timid-timin)*k+timin;

```

```

else
    k=(k-0.08)/0.92;
    Old_values.tper = (tpermax-tpermid)*k+tpermid;
    Old_values.ti = (timax-timid)*k+timid;
end
Old_values.tstart = t;
sys(1) = 0;
sys(2) = 1;
elseif(t<=Old_values.tstart+Old_values.ti)
    sys(1) = 0;
    sys(2) = 1;
elseif(t>=(Old_values.tstart+Old_values.tper/2) &&
t<=(Old_values.tstart+(Old_values.tper/2)+Old_values.ti))
    sys(1) = 1;
    sys(2) = 0;
end
if (2*pi*50*t+fi>pi)&&(2*pi*50*t<pi)
    sys(1)=0;
    sys(2)=0;
    sys
end
if (2*pi*50*t+fi>2*pi)&&(2*pi*50*t<2*pi)
    sys(1)=0;
    sys(2)=0;
end

set_param(gcb,'UserData',Old_values); % збереження даних поточної робочої
точки

% end mdlOutputs

```

## ABSTRACT

**Actuality of theme.** Nowadays, there is a problem of balancing the production and distribution of electricity, due to the inability of producers to instantly meet the needs of consumers in peak load hours. Existing energy storage systems today have a low density of energy storage and their maintenance requires significant costs. The gradual reduction in the price of electric batteries has contributed to the increase in private electric vehicles in the transport sector. With the proliferation of electric vehicles, much of the electricity will be stored in electric vehicle batteries. As a result of research, most of the time private vehicles are not used, the accumulation of electricity in their batteries should be applied to regulate the network demand curve, in addition, it can bring additional income to electric vehicle owners.

**Association of work with scientific programs, plans, and topics.** The dissertation was prepared in accordance with the research plan of the Department of Electronic Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

**The purpose and objectives of research.** Development of a universal bidirectional charger, the use of which allows to use the batteries of electric vehicles, in particular within the concepts of V2G (Vehicle to Grid) as a drive for the organization of autonomous system power supply.

To achieve this goal the following tasks were solved:

- to review the methods of implementing V2G concepts to select the best method for the integration of batteries in power supply systems;
- choose a topologic of the converter for efficient transmission of electricity in both directions;
- develop a control law to adjust the power factor;
- choose the number of cells to achieve the required power parameters;
- conduct modeling to assess the technical performance of the transducers, in particular efficiency and the value of the ripple factor.

*The object of the study* is a charger for batteries of electric vehicles with the possibility of bidirectional energy transfer.

*The subject of the study* is the process of converting electricity parameters based on a bidirectional converter and evaluating the efficiency of its use.

**Research methods:** solving tasks was using the theory of electric circuits, the theory of electromagnetic engineering, the theory of converting engineering, the analytical schedule of prefabricated parts of the schematic diagram and modeling of the conversion scheme in Matlab Simulink software package.

**Scientific novelty.**

1. The use of a modular converter for a charger based on a bidirectional converter with two active bridges and soft switching is proposed;
2. The law of conversion control is developed, which allows the forming of grid current with correction of power factor and THD  $<5\%$ .

**The practical significance of the obtained results.**

1. Developed a method of calculating the ripple factor as a function of a number of cells.
2. Simulink model modular converters based on real models of transistors and diodes are developed and the efficiency conversion module is estimated to be in the range of 85-95%.

**The personal contribution of the applicant** is an independent review of the relevant scientific and technical literature, analysis of the chosen topologic of transformation, calculations of the power part, modeling of the scheme.

**Publications.** The main provisions and results of the master's study are covered in the following publications:

1. Verbytskyi I. V., Harnytskyi A. V. Battery charger with bidirectional power transmission. Microsystems, Electronics and Acoustics. 2020 (accepted for printing)
2. Verbytskyi I., Harnytskyi A. Modular electric vehicle battery charger with bidirectional power flow. Bulletin of the National Technical University "KhPI".

Series: New solutions in modern technology. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020 (accepted for printing)

Structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five sections, conclusion, a list of used sources of 61 titles and 1 appendix. The total volume of the dissertation is 85 page, including 76 page of the main text, 31 figures and 21 tables.