

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В
ЕНЕРГОСИСТЕМУ МІСТА З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ
VEHICLE-TO-GRID (V2G)**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

КУЧИНСЬКИЙ Віталій

гр. СТ 2023-1у

Керівник:

Сергій ЄСАУЛОВ

доцент, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

Хворост Микола ХВОРОСТ
_____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Кучинський Віталій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи: Дослідження інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції Vehicle-to-Grid (V2G)**

кваліфікаційної роботи Єсаулов Сергій Михайлович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

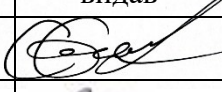
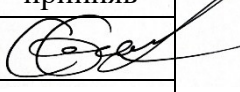

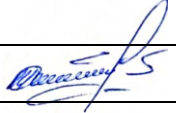

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, дані по надійності та працездатності основних вузлів електротранспорту, літературні джерела з експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту.

4. **Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи :**

1. Аналіз стану питання та існуючих рішень.
2. Розробка математичної моделі системи.
3. Розробка алгоритму керування режимами v2g.
4. Охорона праці.

5. **Перелік графічного матеріалу:** Актуальність та постановка задачі дослідження. Концепція Vehicle-to-Grid та принцип роботи. Світовий досвід використання V2G. Розробка математичної моделі системи. Добовий графік навантаження міської енергосистеми. Алгоритм керування режимами G2V та V2G. Результати моделювання роботи системи. Порівняльний аналіз ефективності V2G. Охорона праці та електробезпека систем Vehicle-to-Grid.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Сергій ЄСАУЛОВ, доцент		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	11.05 – 23.05.2026	
2	Розділи 1, 2	18.05 – 30.05.2026	
3	Розділи 3, 4	25.05 – 06.06.2026	
4	Охорона праці та БНС	01.06 – 13.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	08.06 – 13.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач

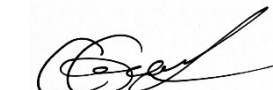


(підпис)

Віталій КУЧИНСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Сергій ЄСАУЛОВ

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто питання інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції Vehicle-to-Grid (V2G). Проведено аналіз сучасного стану розвитку електротранспорту та досліджено його вплив на режими роботи міських енергосистем. Показано, що електромобілі можуть виступати не лише як споживачі електроенергії, але і як розподілені накопичувачі, здатні брати участь у балансуванні навантаження.

Розроблено математичну модель системи, що враховує добовий графік навантаження, параметри електромобілів як накопичувачів енергії, обмеження зарядної інфраструктури та умови реалізації режиму V2G. Запропоновано алгоритм керування режимами заряджання та розряджання електромобілів залежно від стану енергосистеми та рівня заряду акумуляторів.

За результатами моделювання встановлено, що застосування концепції V2G дозволяє зменшити пікове навантаження енергосистеми на 12,96 %, підвищити мінімальне навантаження та зменшити розмах добового графіка споживання на 26,47 %, що свідчить про підвищення ефективності та стабільності роботи енергосистеми.

У роботі також розглянуто питання охорони праці при експлуатації систем V2G. Виконано аналіз небезпечних та шкідливих факторів і розроблено організаційно-технічні заходи щодо забезпечення безпечних умов праці.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей та алгоритмів для підвищення ефективності функціонування міських енергосистем та впровадження інтелектуальних систем керування електротранспортом.

Ключові слова: електротранспорт, Vehicle-to-Grid, V2G, енергосистема, електромобіль, оптимізація навантаження, математичне моделювання.

Пояснювальна записка містить: сторінок – 57, таблиць – 8, рисунків – 9, графічна частина складається з 12 аркушів презентаційного матеріалу.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	9
1.1 Роль електротранспорту в сучасній міській енергосистемі	9
1.2 Концепція Vehicle-to-Grid (V2G)	10
1.3 Світовий досвід впровадження V2G.....	10
1.4 Проблеми інтеграції.....	11
1.5 Постановка задачі дослідження	12
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ	13
2.1 Модель енергосистеми міста	13
2.2 Модель електромобіля як накопичувача енергії	15
2.3 Модель зарядної інфраструктури.....	17
2.4 Модель режиму V2G	19
2.5 Формування цільової функції.....	21
Висновки до розділу 2	25
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ V2G.....	26
3.1 Логіка роботи системи керування V2G	26
3.2 Псевдокод алгоритму керування режимами V2G	29
3.3 Оптимізаційний підхід до керування режимами V2G	31
3.4 Моделювання та аналіз результатів.....	34
3.4.1 Умови проведення моделювання.....	35
3.4.2 Результати моделювання без використання V2G	36
3.4.3 Результати моделювання з використанням V2G	37
3.4.4 Порівняльний аналіз	38

3.4.5	Аналіз чутливості алгоритму керування V2G	41
3.4.6	Узагальнення результатів	43
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	45
4.1	Вступ	45
4.2	Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	45
4.2.1	Нормативна база з охорони праці.....	47
4.3	Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки	48
4.3.1	Розрахунок електробезпеки.....	50
4.3.2	Розрахунок захисного відключення	51
4.3.3	Розрахунок тепловиділення.....	52
	Висновки по розділу	53
	ВИСНОВКИ.....	54
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Сучасний розвиток міських енергосистем характеризується зростанням рівня електрифікації транспорту, інтеграцією відновлюваних джерел енергії та впровадженням інтелектуальних технологій керування. Одним із ключових напрямів трансформації є масове впровадження електротранспорту, що призводить до суттєвих змін у структурі та режимах роботи електричних мереж.

Електромобілі, з одного боку, виступають як додаткове навантаження на енергосистему, що може призводити до збільшення пікових навантажень та нерівномірності графіка споживання. З іншого боку, вони мають значний потенціал як розподілені накопичувачі енергії, здатні брати участь у балансуванні енергосистеми. Реалізація такого підходу можлива завдяки концепції Vehicle-to-Grid (V2G), яка передбачає двосторонній обмін електроенергією між електромобілем та електричною мережею.

Використання технології V2G дозволяє підвищити гнучкість енергосистеми, забезпечити згладжування пікових навантажень, підвищити ефективність використання електроенергії та сприяти інтеграції відновлюваних джерел енергії. Водночас впровадження таких систем пов'язане з рядом технічних та організаційних проблем, зокрема необхідністю розробки ефективних алгоритмів керування режимами заряджання та розряджання, врахування обмежень електричних мереж і забезпечення надійності роботи обладнання.

Актуальність теми даної роботи зумовлена необхідністю дослідження впливу електротранспорту з функцією V2G на режими роботи міських енергосистем та розробки підходів до оптимального керування енергообміном між транспортними засобами та мережею.

Метою роботи є дослідження процесів інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції Vehicle-to-Grid та розробка алгоритму керування режимами заряджання і розряджання електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *задачі*:

- проаналізувати сучасний стан розвитку електротранспорту та концепції V2G;
- дослідити вплив електромобілів на добовий графік навантаження енергосистеми;
- розробити математичну модель системи інтеграції електротранспорту;
- сформулювати алгоритм керування режимами G2V та V2G;
- виконати моделювання роботи системи та оцінити ефективність запропонованого підходу;
- проаналізувати питання охорони праці при експлуатації систем V2G.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування міської енергосистеми при інтеграції електротранспорту.

Предметом дослідження є методи та алгоритми керування енергообміном між електромобілями та електричною мережею у рамках концепції Vehicle-to-Grid.

Методи дослідження базуються на застосуванні методів математичного моделювання електроенергетичних систем, аналізу динамічних процесів, оптимізаційних підходів, а також комп'ютерного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей і алгоритмів для підвищення ефективності роботи міських енергосистем та впровадження інтелектуальних систем керування зарядною інфраструктурою електромобілів.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Роль електротранспорту в сучасній міській енергосистемі

Сучасна міська енергосистема перебуває в умовах трансформації, пов'язаної з цифровізацією, децентралізацією генерації та зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У цьому контексті електротранспорт виступає не лише як новий споживач електроенергії, а як активний елемент енергосистеми з потенціалом накопичення та генерації енергії.

Електромобілі формують принципово новий тип навантаження, який характеризується стохастичністю підключення до мережі, змінним рівнем заряду акумуляторів та можливістю керованого споживання. Як показано у роботі [1], масове впровадження електромобілів без систем керування призводить до суттєвого спотворення графіка навантаження, зокрема до збільшення вечірніх піків до 20–25%. Критичний аналіз даного джерела показує, що автор детально розглядає сценарії неконтрольованого заряджання, однак обмежено враховує інтеграцію інтелектуальних систем керування, що знижує прикладну цінність результатів для сучасних Smart Grid.

З іншого боку, у дослідженні [2] доведено, що електромобілі можуть виступати як розподілені накопичувачі енергії, здатні компенсувати нерівномірність навантаження. Перевагою даного підходу є кількісна оцінка потенціалу V2G, однак обмеженням є спрощена модель поведінки користувачів, яка не враховує реальні експлуатаційні сценарії.

Таким чином, електротранспорт одночасно створює проблему зростання пікових навантажень і потенційно є засобом їх згладжування, що визначає необхідність інтегрованого підходу до керування.

1.2 Концепція Vehicle-to-Grid (V2G)

Концепція Vehicle-to-Grid (V2G) передбачає двосторонній обмін електроенергією між електромобілем та енергосистемою, що дозволяє використовувати транспортні засоби як мобільні накопичувачі енергії.

Принцип функціонування V2G базується на двох режимах:

- G2V (Grid-to-Vehicle) – заряджання акумулятора;
- V2G (Vehicle-to-Grid) – віддача енергії в мережу.

У роботі [3] показано, що використання V2G дозволяє забезпечити балансування навантаження та підтримку частоти мережі. Сильна сторона дослідження полягає у комплексному розгляді технічних аспектів реалізації V2G, однак обмеженням є відсутність детального аналізу деградації акумуляторів.

Технічна структура V2G включає зарядну станцію з двостороннім перетворенням енергії, силовий інвертор та систему керування.

У дослідженні [4] встановлено, що V2G може ефективно компенсувати нестабільність ВДЕ. Критично слід зазначити, що хоча автори демонструють потенціал інтеграції, вони не розглядають обмеження локальних електричних мереж, що є суттєвим фактором для міських умов.

1.3 Світовий досвід впровадження V2G

Практична реалізація V2G активно досліджується у провідних країнах світу, де впроваджуються пілотні проєкти різного масштабу.

У Європейському Союзі одним із найбільш відомих є проєкт Parker [5], у рамках якого було продемонстровано можливість використання електромобілів для надання допоміжних послуг енергосистемі, зокрема регулювання частоти. Недоліком даного джерела є його звітний характер без повної наукової верифікації результатів, що потребує обережного використання у наукових роботах.

У США значний внесок у розвиток V2G зроблено дослідницькою групою Університету Делавера [6], де експериментально підтверджено можливість використання електромобілів для балансування енергосистеми. Обмеженням є відсутність стандартизованих методик оцінки ефективності.

У Японії після Fukushima Daiichi nuclear disaster концепція V2G отримала розвиток у вигляді систем аварійного живлення, зокрема технології «Leaf-to-Home», розробленої компанією Nissan. Аналіз показує, що технічна реалізація V2G є можливою, економічна ефективність залежить від тарифної політики, а масштабування обмежується інфраструктурними факторами.

1.4 Проблеми інтеграції

Незважаючи на значний потенціал, інтеграція V2G супроводжується рядом суттєвих проблем. Однією з ключових є деградація акумуляторів. У роботі [7] показано, що інтенсивне використання батарей у режимі V2G скорочує їх ресурс. Сильна сторона дослідження – економічна оцінка, слабка – відсутність сучасних даних по нових типах акумуляторів (Li-ion нового покоління).

Іншою проблемою є відсутність ефективних алгоритмів керування. У роботі [1] зазначено, що більшість моделей базуються на спрощених сценаріях. Також критичним фактором є обмеження електричних мереж через перевантаження трансформаторів, обмеження пропускної здатності та відсутність Smart Grid інфраструктури.

Таким чином, без інтелектуального керування V2G може призводити до погіршення режимів роботи мережі.

1.5 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показує, що концепція V2G має значний потенціал для оптимізації роботи міських енергосистем, однак її ефективність визначається якістю алгоритмів керування та умовами інтеграції.

У рамках даної роботи ставиться задача дослідження впливу електротранспорту з функцією V2G на режими роботи енергосистеми міста.

Основні задачі:

- дослідити вплив V2G на добовий графік навантаження;
- розробити підхід до оптимізації режимів заряджання та розряджання;
- оцінити ефективність використання електромобілів як розподілених накопичувачів енергії.

Наукова новизна полягає у формуванні підходу до керування енергообміном, який враховує динаміку навантаження та обмеження енергосистеми.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для підвищення ефективності функціонування міських енергосистем в умовах зростання електротранспорту.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ

2.1 Модель енергосистеми міста

На першому етапі енергосистема міста подається у вигляді узагальненого графіка навантаження, який відображає зміну споживаної потужності протягом доби. Для більшості міських електричних мереж характерні денні та вечірні піки навантаження, що формуються через одночасну роботу побутових, транспортних, комерційних і промислових споживачів. У нічний період, навпаки, спостерігається спад споживання, що створює резерв потужності для заряджання електромобілів.

Узагальнений графік навантаження доцільно описати як функцію часу

$$P_{load}(t), \quad (2.1)$$

де $P_{load}(t)$ – активна потужність навантаження міської енергосистеми у момент часу t , кВт.

У загальному випадку ця функція може бути подана як сума базового навантаження та змінної складової:

$$P_{load}(t) = P_{base}(t) + P_{var}(t), \quad (2.2)$$

де $P_{base}(t)$ – відносно повільно змінна частина навантаження, що відповідає постійному споживанню;

$P_{var}(t)$ – змінна складова, яка формує добові піки та провали.

Характер зміни навантаження міської енергосистеми протягом доби визначається режимами функціонування споживачів електричної енергії та має виражену нерівномірність. Для більшості міських мереж типовими є періоди мінімального нічного навантаження, поступового зростання у ранковій годині та формування пікових значень у вечірній час.

З метою узагальнення цих особливостей та подальшого використання у математичній моделі доцільно розглянути типовий добовий графік навантаження, який відображає характерні режими роботи енергосистеми.

Характер зміни навантаження протягом доби наведено на рис. 2.1.

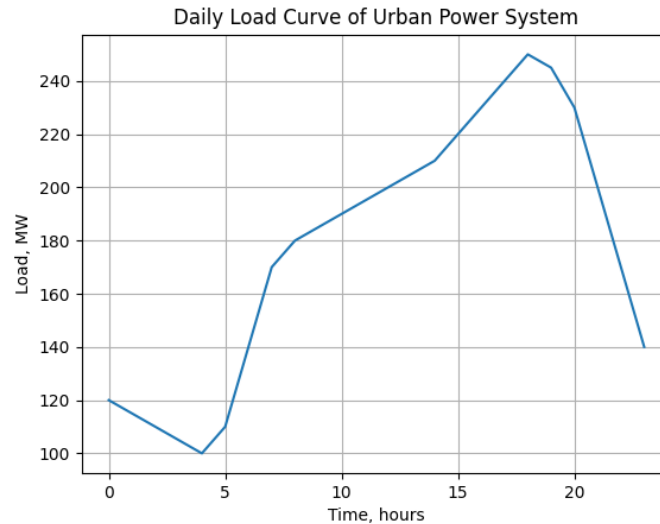


Рисунок 2.1 – Узагальнений добовий графік навантаження міської енергосистеми

Як видно з рис. 2.1, у нічний період спостерігається мінімальне навантаження, що створює сприятливі умови для реалізації режиму G2V. У вечірні години формується пікове навантаження, при якому доцільно використання режиму V2G для його зменшення.

Для формалізації добового графіка навантаження та забезпечення можливості подальшого моделювання необхідно задати основні параметри енергосистеми, що характеризують її роботу у різні часові інтервали.

До таких параметрів належать мінімальні та максимальні значення навантаження, часові межі пікових та нічних періодів, а також характер зміни потужності протягом доби.

Основні параметри узагальненого графіка навантаження міської енергосистеми наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри узагальненого графіка навантаження міської енергосистеми

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Мінімальне навантаження	P_{min}	120	МВт
Максимальне навантаження	P_{max}	250	МВт
Час піку	t_{peak}	18:00–21:00	год
Нічний спад	t_{night}	00:00–05:00	год

Наведені параметри використовуються для формування базового графіка навантаження. На їх основі у подальшому здійснюється моделювання впливу електромобілів.

Для подальшого аналізу можна ввести характерні інтервали часу:

- $t \in T_{night}$ – нічний період зниженого навантаження;
- $t \in T_{peak}$ – період пікового навантаження;
- $t \in T_{day}$ – денна робоча зона навантаження.

Тоді математична модель має враховувати, що:

$$P_{load}(t) \rightarrow \min \quad \text{для } t \in T_{night}, \quad (2.3)$$

$$P_{load}(t) \rightarrow \max \quad \text{для } t \in T_{peak}. \quad (2.4)$$

У подальшому ця функція є базою для оцінки того, яким чином підключення електромобілів у режимах G2V та V2G змінює форму добового графіка. Фактично $P_{load}(t)$ виступає вихідною характеристикою, з якою порівнюється модифікований графік навантаження після інтеграції електротранспорту.

2.2 Модель електромобіля як накопичувача енергії

У межах даної роботи електромобіль розглядається не лише як транспортний засіб, а як розподілений акумулятор енергії, здатний у певні моменти часу накопичувати електроенергію, а в інші – повертати її в мережу. Основною характеристикою такого об'єкта є енергетична ємність батареї E_{bat} , тобто номінальна ємність акумуляторної батареї, кВт·год.

Поточний енергетичний стан батареї зручно описувати через рівень заряду SOC (State of Charge), який визначається як відношення фактичного запасу енергії до номінальної ємності:

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_{bat}}, \quad (2.5)$$

де $E(t)$ – фактичний запас енергії в батареї у момент часу t , кВт·год.

Для коректного функціонування системи вводяться обмеження на рівень заряду:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}, \quad (2.6)$$

де SOC_{min} – мінімально допустимий рівень заряду, нижче якого розряд батареї небажаний;

SOC_{max} – максимально допустимий рівень заряду.

Електромобіль у межах розроблюваної моделі розглядається як розподілений накопичувач енергії з обмеженими ресурсами, що визначаються характеристиками акумуляторної батареї та умовами її експлуатації. Для адекватного відображення процесів заряджання та розряджання необхідно задати основні параметри, які визначають енергетичний стан електромобіля та допустимі режими його роботи. До таких параметрів належать ємність акумулятора, граничні значення рівня заряду, а також коефіцієнти корисної дії процесів заряджання та розряджання. Основні параметри моделі електромобіля як накопичувача енергії наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри моделі електромобіля як накопичувача енергії

Параметр	Позначення	Значення
Ємність батареї	E_{bat}	40–80 кВт·год
Мінімальний SOC	SOC_{min}	0.2
Максимальний SOC	SOC_{max}	0.9
ККД заряджання	η_{ch}	0.95
ККД розряджання	η_{dis}	0.9

Прийняті значення параметрів відповідають сучасним електромобілям середнього класу. Ці обмеження враховуються при моделюванні режимів V2G

Наявність цих обмежень має принципове значення. По-перше, вони запобігають прискореній деградації акумулятора. По-друге, вони забезпечують збереження транспортної функції електромобіля, тобто гарантують, що частина запасеної енергії залишається доступною для поїздки.

Баланс енергії в акумуляторі можна описати рівнянням

$$E(t + \Delta t) = E(t) + \eta_{ch} P_{ch}(t) \Delta t - \frac{P_{dis}(t) \Delta t}{\eta_{dis}}, \quad (2.7)$$

де $P_{ch}(t)$ – потужність заряджання, кВт;

$P_{dis}(t)$ – потужність розряджання, кВт;

η_{ch} – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання;

η_{dis} – коефіцієнт корисної дії процесу розряджання;

Δt – крок часу, год.

Якщо перейти до опису через SOC , тоді рівняння набуває вигляду

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \frac{\eta_{ch} P_{ch}(t) \Delta t}{E_{bat}} - \frac{P_{dis}(t) \Delta t}{\eta_{dis} E_{bat}}. \quad (2.8)$$

де $SOC(t)$ – поточний рівень заряду акумулятора;

E_{bat} – ємність акумуляторної батареї.

Наведене рівняння дозволяє визначати зміну рівня заряду акумулятора електромобіля в процесі роботи системи G2V/V2G та враховувати енергетичний стан транспортного засобу під час моделювання режимів роботи енергосистеми.

Це співвідношення дозволяє відстежувати зміну енергетичного стану електромобіля у часі та враховувати вплив як режиму заряджання, так і режиму V2G.

2.3 Модель зарядної інфраструктури

Зарядна інфраструктура є сполучною ланкою між електромобілем та енергосистемою міста. Саме через неї реалізується процес двостороннього енергообміну. Математично її можна описати через номінальну потужність зарядного пристрою станції P_{charge} , кВт. У реальній системі потужність не є довільною, а обмежується як параметрами самої станції, так і умовами роботи електричної мережі. Тому вводиться нерівність

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{charge}^{max}, \quad (2.9)$$

де P_{charge}^{max} – максимально допустима потужність заряджання.

Зарядна інфраструктура відіграє визначальну роль у процесі інтеграції електромобілів у міську енергосистему, оскільки саме через неї реалізується обмін енергією між транспортними засобами та електричною мережею. При цьому режими заряджання та віддачі енергії обмежуються як технічними характеристиками зарядних станцій, так і пропускну здатністю електричної мережі. Для забезпечення коректності математичної моделі необхідно врахувати граничні значення потужностей заряджання та розряджання, кількість підключених електромобілів, а також допустиме навантаження на мережу у точках підключення. Основні параметри зарядної інфраструктури та мережевих обмежень наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри зарядної інфраструктури та мережевих обмежень

Параметр	Позначення	Значення
Потужність зарядки	P_{charge}	7–22 кВт
Потужність V2G	P_{V2G}	5–10 кВт
Кількість авто	N	100–1000
Обмеження мережі	P_{grid}^{lim}	1–5 МВт

Обмеження враховують як технічні характеристики зарядних станцій, так і можливості мережі. Це дозволяє уникнути перевантаження локальних вузлів.

Для режиму передачі енергії з батареї в мережу також задається обмеження

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{V2G}^{max}, \quad (2.10)$$

де P_{V2G}^{max} – максимально допустима потужність віддачі енергії в мережу.

Крім внутрішніх технічних параметрів, необхідно враховувати мережеві обмеження. Сумарна потужність, що споживається всіма зарядними станціями в певному вузлі мережі, не повинна перевищувати допустиму пропускну здатність цієї ділянки:

$$\sum_{i=1}^N P_{ch,i}(t) \leq P_{grid}^{lim}, \quad (2.11)$$

де N – кількість одночасно підключених електромобілів;

P_{grid}^{lim} – гранично допустима потужність мережі у точці підключення.

Аналогічно для режиму віддачі енергії можна записати

$$\sum_{i=1}^N P_{dis,i}(t) \leq P_{V2G,grid}^{lim}. \quad (2.12)$$

Такі обмеження особливо важливі для міських умов, оскільки саме локальні перевантаження трансформаторів, кабельних ліній і розподільних пристроїв є одним із ключових стримуючих факторів широкої інтеграції електромобілів.

2.4 Модель режиму V2G

Режим Vehicle-to-Grid вводиться як активний механізм впливу електромобілів на навантаження енергосистеми. У цьому випадку електромобілі не просто споживають енергію, а виконують функцію

розподілених джерел, що тимчасово компенсують перевищення навантаження або реагують на економічні стимули.

Функцію сумарної потужності, що повертається електромобілями в мережу, задамо у вигляді

$$P_{V2G}(t) = \sum_{i=1}^N P_{dis,i}(t). \quad (2.13)$$

Тоді скоригований графік навантаження міської енергосистеми можна описати рівнянням

$$P_{sys}(t) = P_{load}(t) + P_{G2V}(t) - P_{V2G}(t), \quad (2.14)$$

де $P_{sys}(t)$ – навантаження системи з урахуванням інтеграції електромобілів;

$P_{G2V}(t)$ – сумарна потужність заряджання всіх електромобілів;

$P_{V2G}(t)$ – сумарна потужність, що повертається в мережу.

Таким чином, у режимі заряджання електромобілі збільшують навантаження системи, а у режимі V2G – зменшують його.

Активація режиму V2G має бути обумовлена певними правилами. Найпростішим варіантом є спрацьовування за перевищенням навантаження:

$$\text{якщо } P_{load}(t) > P_{th}, \text{ потім увімкнути функцію V2G,} \quad (2.15)$$

де P_{th} – порогове значення потужності, вище якого вмикається підтримка мережі з боку електромобілів.

Реалізація режиму Vehicle-to-Grid у складі міської енергосистеми передбачає не безперервний, а керований процес віддачі енергії, який активується лише за наявності відповідних технічних та економічних передумов. Такий підхід дозволяє узгодити інтереси енергосистеми та користувачів електромобілів, забезпечуючи ефективне використання накопиченої енергії без порушення експлуатаційних вимог до транспортних засобів. Для формалізації логіки керування необхідно задати умови активації режиму V2G, які враховують рівень навантаження в мережі, тарифні сигнали,

а також обмеження за рівнем заряду акумулятора. Основні умови активації режиму Vehicle-to-Grid наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Умови активації режиму Vehicle-to-Grid

Умова	Позначення	Значення
Поріг навантаження	(P_{th})	0.85 (P_{max})
Поріг тарифу	(C_{th})	2.5 грн/кВт·год
Резерв SOC	(SOC_{res})	0.4

Таким чином, режим V2G реалізується як керована функція, що залежить від технічних та економічних факторів.

Додатковою умовою може бути тарифний сигнал. Якщо вартість електроенергії в певний момент часу перевищує встановлений рівень, то розряд у мережу стає економічно доцільним:

$$\text{якщо } C(t) > C_{th}, \text{ потім увімкнути функцію V2G,} \quad (2.16)$$

де $C(t)$ – поточний тариф на електроенергію;

C_{th} – граничне тарифне значення для активації V2G.

Водночас обов'язково має перевірятися умова достатнього рівня заряду:

$$SOC(t) \geq SOC_{res}, \quad (2.17)$$

де SOC_{res} – резервний рівень заряду, нижче якого участь у V2G заборонена.

Отже, режим V2G у математичній моделі реалізується не як безумовний процес, а як керована функція, що активується лише за наявності технічної та економічної доцільності.

2.5 Формування цільової функції

Кінцевою метою побудови математичної моделі є можливість оптимального керування процесами заряджання та розряджання електромобілів у межах міської енергосистеми. Для цього формується цільова функція, яка відображає бажані критерії роботи системи.

У даній роботі доцільно врахувати три основні цілі:

1. мінімізацію пікових навантажень;
2. мінімізацію витрат електроенергії або вартості енергообміну;
3. максимізацію ефективності використання електромобілів як накопичувачів.

Перша складова може бути подана як мінімізація максимального значення системного навантаження:

$$J_1 = \max_{t \in T} P_{sys}(t) \rightarrow \min. \quad (2.18)$$

Цей критерій орієнтований на зменшення перевантаження мережі у пікові години.

Друга складова пов'язана з економічними витратами. Якщо $C(t)$ – тариф на електроенергію, тоді вартість заряджання та розряджання можна описати інтегральним критерієм

$$J_2 = \int_0^T [C(t)P_{G2V}(t) - C(t)P_{V2G}(t)] dt \rightarrow \min. \quad (2.19)$$

Тут враховується, що заряджання потребує витрат, а віддача енергії в мережу може генерувати дохід або компенсацію.

Третій критерій пов'язаний з енергетичною ефективністю системи. Його можна описати через коефіцієнт корисного використання накопиченої енергії:

$$\eta_{use} = \frac{\int_0^T P_{V2G}(t) dt}{\int_0^T P_{G2V}(t) dt}. \quad (2.20)$$

У такому разі

$$J_3 = \eta_{use} \rightarrow \max. \quad (2.21)$$

Сформовані у попередніх підрозділах математичні моделі енергосистеми, електромобіля та зарядної інфраструктури створюють основу для постановки задачі оптимального керування процесами заряджання та розряджання в системі Vehicle-to-Grid. Для забезпечення ефективної взаємодії

між електротранспортом і мережею необхідно врахувати одночасно декілька критеріїв, зокрема технічні обмеження енергосистеми, економічні показники та ефективність використання накопиченої енергії.

З цією метою вводиться цільова функція оптимізації, яка формується як зважена сума окремих критеріїв. Вибір вагових коефіцієнтів дозволяє адаптувати модель до конкретних умов функціонування та визначити пріоритети керування. Основні параметри цільової функції оптимізації наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри цільової функції оптимізації

Параметр	Позначення	Значення	Опис
Ваговий коефіцієнт мінімізації піку	w_1	0.4–0.6	Визначає пріоритет зменшення пікового навантаження
Ваговий коефіцієнт вартості енергії	w_2	0.2–0.4	Враховує економічні витрати/вигоди
Ваговий коефіцієнт ефективності	w_3	0.2–0.3	Характеризує ефективність використання V2G
Максимальне навантаження системи	P_{max}	200–300	МВт
Мінімальне навантаження системи	P_{min}	80–150	МВт
Максимальний тариф	C_{max}	3.0–5.0	грн/кВт·год
Мінімальний тариф	C_{min}	1.0–2.0	грн/кВт·год
Тривалість періоду оптимізації	T	24	год

Вибір вагових коефіцієнтів визначає пріоритети оптимізації системи. Наведені параметри визначають структуру цільової функції оптимізації та дозволяють врахувати як технічні, так і економічні аспекти функціонування системи. Вибір вагових коефіцієнтів здійснюється залежно від пріоритетів дослідження: при необхідності зменшення пікових навантажень збільшується коефіцієнт w_1 , тоді як при орієнтації на економічну ефективність – коефіцієнт w_2 .

Оскільки одночасно досягти абсолютного оптимуму за всіма трьома критеріями неможливо, формується зведена цільова функція у вигляді зваженої суми:

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 - w_3 J_3 \rightarrow \min, \quad (2.22)$$

де w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність відповідних критеріїв.

Такий запис дозволяє адаптувати модель до конкретної практичної постановки задачі. Якщо головним є зменшення піку – збільшується вага w_1 . Якщо пріоритетом є економічна ефективність – більшу вагу отримує w_2 . Якщо ж дослідження орієнтоване на максимальне використання потенціалу електромобілів як накопичувачів – акцент переноситься на w_3 .

Для узагальнення розробленої математичної моделі доцільно подати взаємозв'язок між основними елементами системи V2G у вигляді структурної схеми. Така схема дозволяє наочно відобразити, як параметри енергосистеми, зарядної станції, електромобіля та системи керування пов'язані між собою в процесі двостороннього обміну енергією.

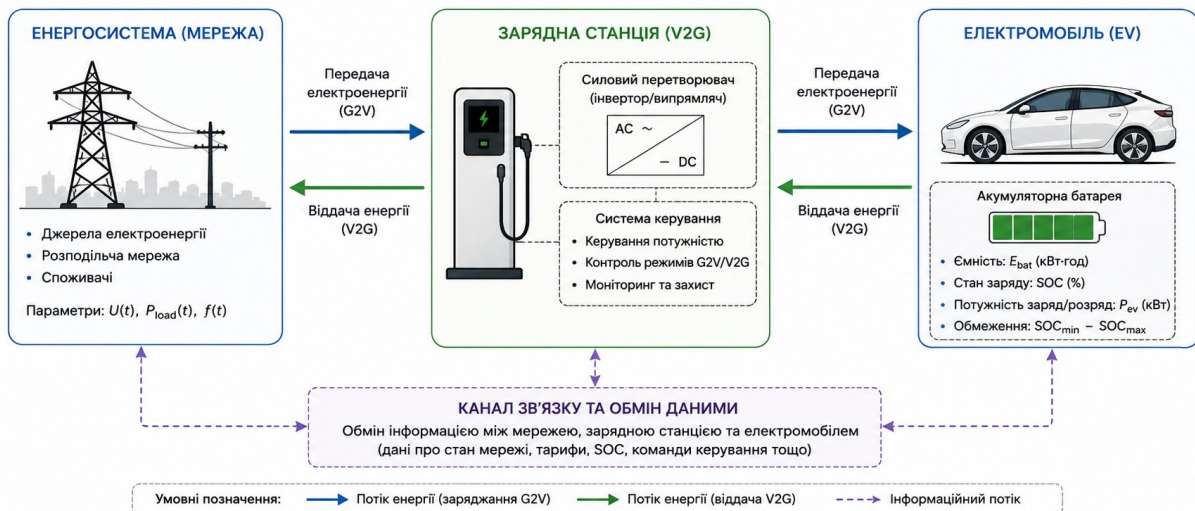


Рисунок 2.2 – Структура математичної моделі системи V2G

На рисунку 2.2 показано, що енергосистема, зарядна станція та електромобіль утворюють єдину керовану систему, у якій реалізуються два основні напрями енергообміну: зарядження електромобіля від мережі в

режимі G2V та віддача енергії від акумулятора в мережу в режимі V2G. Зарядна станція виконує функцію проміжного силового та інформаційного вузла, через який здійснюється перетворення енергії, контроль потужності, моніторинг стану обладнання та керування режимами роботи.

Інформаційний канал забезпечує обмін даними між енергосистемою, зарядною інфраструктурою та електромобілем. До таких даних належать поточне навантаження мережі, тарифні умови, рівень заряду акумулятора SOC, обмеження за потужністю та команди керування. Саме на основі цих параметрів у математичній моделі визначається доцільний режим роботи системи: заряджання, віддача енергії або очікування.

Таким чином, наведена структурна схема узагальнює математичні залежності, розглянуті у підрозділах 2.1–2.5, і показує логіку формування керуючого впливу в системі інтеграції електротранспорту в міську енергосистему.

Висновки до розділу 2

У розділі розроблено математичну модель системи інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції Vehicle-to-Grid. Сформовано модель добового навантаження міської мережі, в якій враховано характерні режими денного піку та нічного спаду. Електромобіль формалізовано як накопичувач енергії з обмеженнями за ємністю батареї та рівнем заряду. Для зарядної інфраструктури введено обмеження за потужністю заряджання та пропускною здатністю мережі. Побудовано функцію режиму V2G, що враховує умови активації за перевищенням навантаження, тарифними сигналами та резервом енергії батареї. Сформовано цільову функцію оптимізації, спрямовану на мінімізацію пікових навантажень і витрат енергії та максимізацію ефективності використання електромобілів у складі міської енергосистеми.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ V2G

3.1 Логіка роботи системи керування V2G

Логіка роботи системи керування режимами Vehicle-to-Grid базується на безперервному аналізі стану енергосистеми, параметрів електромобілів та зовнішніх керуючих впливів. Основною метою є забезпечення адаптивного вибору режиму роботи кожного електромобіля – заряджання (G2V), віддача енергії в мережу (V2G) або очікування – залежно від поточних умов.

Система функціонує у дискретному часі з кроком Δt , на кожному з яких виконується оцінка вхідних параметрів та прийняття рішення щодо режиму роботи.

До основних вхідних параметрів належать:

- поточне навантаження енергосистеми $P_{load}(t)$;
- рівень заряду акумулятора електромобіля $SOC(t)$;
- тариф на електроенергію $C(t)$;
- кількість підключених електромобілів N .

На основі цих параметрів формується логіка керування, яка реалізує наступні принципи:

- у періоди низького навантаження здійснюється заряджання електромобілів;
- при досягненні пікових навантажень активується режим V2G;
- при недостатньому рівні заряду батареї участь у V2G забороняється;
- при відсутності необхідності в енергообміні система переходить у режим очікування.

Таким чином, кожен електромобіль розглядається як автономний елемент, що підпорядковується загальній логіці системи, але приймає рішення на основі локальних параметрів.

Узагальнений алгоритм прийняття рішення може бути представлений у вигляді послідовності умов:

1. Перевірка підключення електромобіля до мережі
2. Визначення рівня навантаження системи
3. Аналіз рівня заряду батареї
4. Перевірка тарифних умов
5. Вибір режиму: G2V / V2G / очікування

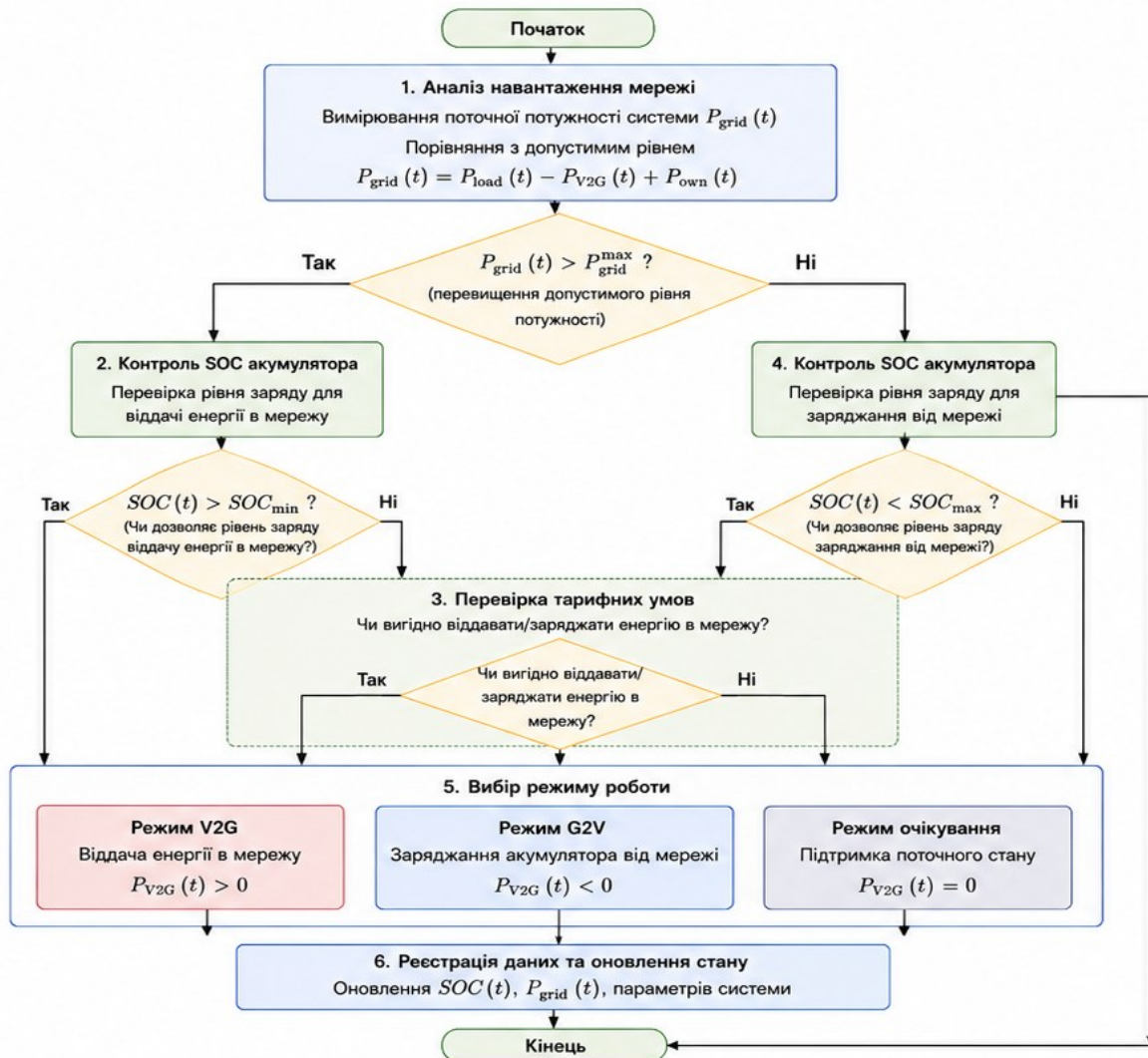


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму керування режимами V2G

Алгоритм керування режимами (рис.3.1) V2G реалізується у вигляді послідовної перевірки технічних, енергетичних та економічних умов функціонування системи. На першому етапі визначається факт підключення електромобіля до зарядної інфраструктури. За відсутності підключення система переходить у режим очікування. Якщо електромобіль підключений, виконується перевірка мінімально допустимого рівня заряду акумулятора. У

разі, коли рівень заряду є меншим за допустиме значення, формується команда на заряджання в режимі G2V.

За умови достатнього рівня заряду система аналізує стан енергосистеми. Якщо поточне навантаження перевищує встановлений поріг, додатково перевіряється наявність резервного запасу енергії в батареї. При достатньому резерві активується режим V2G, а при недостатньому – система переходить у режим очікування. Якщо ж пікове навантаження відсутнє, виконується перевірка часових і тарифних умов. У разі нічного періоду або низького тарифу обирається режим заряджання G2V, в іншому випадку реалізується режим очікування. Після цього цикл повторюється на наступному кроці дискретного часу.

Як видно з рисунку 3.1, алгоритм керування реалізує адаптивний вибір режиму роботи електромобіля залежно від стану енергосистеми та параметрів акумулятора. Пріоритет надається забезпеченню надійності енергосистеми та збереженню ресурсу батареї, що досягається введенням обмежень за рівнем заряду та умов активації режиму V2G.

Для реалізації алгоритму керування режимами G2V та V2G доцільно подати загальну структуру системи керування у вигляді функціональної схеми. Така схема дозволяє відобразити послідовність обробки вхідних параметрів, процес прийняття рішення та формування режиму роботи електромобіля залежно від стану енергосистеми та акумуляторної батареї.

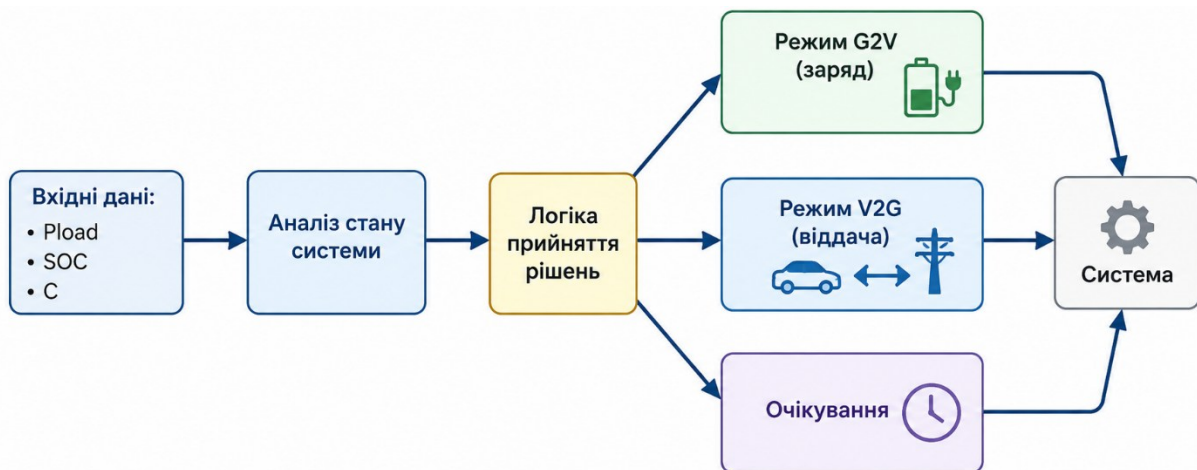


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи керування режимами V2G

На рисунку 3.2 представлено структурну схему системи керування режимами V2G, яка реалізує адаптивний вибір режиму роботи електромобіля на основі аналізу навантаження енергосистеми, рівня заряду акумулятора та тарифних умов. Система забезпечує перемикання між режимами G2V, V2G та очікування, що дозволяє оптимізувати навантаження енергосистеми та підвищити ефективність використання електричної енергії.

3.2 Псевдокод алгоритму керування режимами V2G

Для формалізації логіки роботи системи керування доцільно подати алгоритм у вигляді псевдокоду. Такий опис дозволяє чітко відобразити послідовність перевірки умов, вибір режиму роботи електромобіля та циклічний характер функціонування системи в дискретному часі. Псевдокод є проміжною ланкою між математичною моделлю та програмною або імітаційною реалізацією алгоритму.

Нижче наведено узагальнений псевдокод алгоритму керування режимами G2V та V2G.

Початок

Задати початкові параметри:

- P_{th} – порогове значення навантаження
- C_{th} – порогове значення тарифу
- SOC_{min} – мінімально допустимий рівень заряду
- SOC_{res} – резервний рівень заряду для V2G
- Δt – крок дискретизації часу

Для кожного моменту часу t виконувати:

Зчитати поточні значення:

- $P_{load}(t)$ – навантаження енергосистеми
- $SOC(t)$ – рівень заряду акумулятора
- $C(t)$ – тариф на електроенергію
- Connected – стан підключення електромобіля до мережі

Якщо Connected = False тоді

Mode = "Очікування"

Перейти до наступного моменту часу

Кінець якщо

```

Якщо  $SOC(t) < SOC_{min}$  тоді
  Mode = "G2V"
  Виконати заряджання
  Оновити  $SOC(t+\Delta t)$ 
  Перейти до наступного моменту часу
Кінець якщо

Якщо  $P_{load}(t) > P_{th}$  тоді
  Якщо  $SOC(t) > SOC_{res}$  тоді
    Mode = "V2G"
    Виконати передачу енергії в мережу
    Оновити  $SOC(t+\Delta t)$ 
  Інакше
    Mode = "Очікування"
  Кінець якщо
Інакше
  Якщо (нічний період = True) АБО  $C(t) < C_{th}$  тоді
    Mode = "G2V"
    Виконати заряджання
    Оновити  $SOC(t+\Delta t)$ 
  Інакше
    Mode = "Очікування"
  Кінець якщо
Кінець якщо

Кінець циклу

Кінець

```

Наведений псевдокод відображає базову логіку функціонування системи. На першому етапі перевіряється можливість участі електромобіля в енергообміні, тобто факт його підключення до мережі. За відсутності підключення система не виконує жодних енергетичних дій і переходить у режим очікування. Далі контролюється мінімальний допустимий рівень заряду акумулятора. Якщо він є нижчим за встановлену межу, пріоритет автоматично надається заряджанню батареї.

У разі достатнього рівня заряду система аналізує стан навантаження енергосистеми. Якщо поточне навантаження перевищує порогове значення, активується перевірка можливості роботи у режимі V2G. Такий режим дозволяється лише за умови, що в акумуляторі збережений резерв енергії, достатній для подальшої експлуатації електромобіля.

Якщо енергосистема не перебуває у піковому режимі, алгоритм переходить до аналізу часових і тарифних умов. У нічний період або за наявності низького тарифу система ініціює заряджання батареї в режимі G2V.

Якщо ж ці умови не виконуються, електромобіль залишається у режимі очікування.

Таким чином, псевдокод демонструє, що запропонований алгоритм реалізує адаптивний вибір режиму роботи електромобіля залежно від технічного стану батареї, режиму навантаження енергосистеми та економічних умов енергообміну. Така структура є достатньо простою для програмної реалізації, але водночас враховує ключові фактори, що визначають ефективність інтеграції електротранспорту в енергосистему міста.

3.3 Оптимізаційний підхід до керування режимами V2G

Розроблений у попередньому підрозділі алгоритм керування забезпечує базову адаптацію режимів роботи електромобілів до стану енергосистеми. Однак він ґрунтується на жорстко заданих порогових умовах і не враховує повною мірою динаміку зміни навантаження, прогнозні дані та економічні фактори у довгостроковій перспективі.

З метою підвищення ефективності функціонування системи доцільно перейти до оптимізаційного підходу, який дозволяє визначати керуючі дії на основі мінімізації або максимізації заданої цільової функції.

Формалізація задачі оптимізації.

Задача керування режимами V2G може бути сформульована як задача оптимізації:

$$J = w_1 \cdot \max(P_{sys}(t)) + w_2 \cdot \int_0^T C(t) \cdot P_{G2V}(t) dt - w_3 \cdot \int_0^T C(t) \cdot P_{V2G}(t) dt \rightarrow \min \quad (3.1)$$

де J – цільова функція оптимізації;

$P_{sys}(t)$ – сумарне навантаження системи;

$P_{G2V}(t)$ – потужність заряджання електромобілів;

$P_{V2G}(t)$ – потужність віддачі енергії в мережу;

$C(t)$ – тариф на електроенергію;

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти;

T – інтервал моделювання.

Таким чином, оптимізація спрямована на зменшення пікових навантажень, мінімізацію витрат на заряджання та максимізацію вигоди від передачі енергії в мережу.

Обмеження задачі.

Процес оптимізації виконується з урахуванням технічних обмежень:

1. Обмеження рівня заряду:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}. \quad (3.2)$$

2. Обмеження потужності заряджання:

$$0 \leq P_{G2V}(t) \leq P_{charge}^{max}. \quad (3.3)$$

3. Обмеження потужності V2G:

$$0 \leq P_{V2G}(t) \leq P_{V2G}^{max}. \quad (3.4)$$

4. Обмеження мережі:

$$\sum_{i=1}^N P_{G2V,i}(t) \leq P_{grid}^{lim}. \quad (3.5)$$

Таким чином, математична модель враховує обмеження рівня заряду акумулятора, потужності заряджання, режиму V2G та допустимого навантаження енергосистеми. Це дозволяє забезпечити безпечну та ефективну роботу системи двостороннього енергообміну.

Методи реалізації оптимізації.

Для розв'язання задачі можуть бути використані різні підходи:

1. Правило-орієнтоване керування є базовим і вже реалізоване у підрозділі 3.2. Перевага – простота. Недолік – відсутність глобальної оптимальності.

2. Лінійна оптимізація. Може використовуватись для визначення оптимальних графіків заряджання, мінімізація витрат електроенергії:

$$\sum C(t) \cdot P(t) \rightarrow \min . \quad (3.6)$$

Перевагами є швидкість розрахунку і можливість використання в реальному часі. Недоліки: обмежена гнучкість та складність врахування нелінійних процесів.

3. Прогнозно-орієнтоване керування. Передбачає використання прогнозу навантаження $P_{load}(t)$ та тарифів $C(t)$. Алгоритм оптимізує керування на горизонті прогнозу T_p . Перевагами є висока ефективність та адаптація до змін, а до недоліків належать складність реалізації та потреба у прогнозних моделях.

4. Інтелектуальні методи. До них належать нейронні мережі та нечітка логіка. Вони дозволяють враховувати невизначеність і працювати без жорстких порогів. Однак їх використання потребує навчання та значних обчислювальних ресурсів.

Таблиця 3.1 Порівняльний аналіз підходів

Метод	Переваги	Недоліки
керування за правилами	простота, надійність	не оптимальний
Лінійна оптимізація	швидкість	обмежена точність
MPC	адаптивність	складність
AI/ML	гнучкість	потреба в даних

За результатами аналізу сучасних підходів до керування режимами заряджання електромобілів для реалізації у даній роботі було обрано алгоритм керування за правилами (rule-based control). Такий підхід характеризується простотою реалізації, невисокими обчислювальними витратами та можливістю роботи у реальному часі без необхідності використання складних прогнозних моделей або значних обсягів обчислень.

На відміну від методів оптимізації та алгоритмів машинного навчання, rule-based алгоритм не потребує тривалого навчання системи та забезпечує

стабільну роботу при зміні параметрів навантаження енергосистеми. Крім того, для задач бакалаврської роботи використання такого підходу є доцільним через його наочність, адаптивність та можливість практичної реалізації у системах керування зарядною інфраструктурою електротранспорту.

Отримані результати моделювання підтвердили, що запропонований алгоритм забезпечує ефективне згладжування добового графіка навантаження та зниження пікових перевантажень енергосистеми.

Таким чином, використання оптимізаційних методів дозволяє значно підвищити ефективність керування режимами V2G порівняно з базовими алгоритмами. Вибір конкретного підходу залежить від вимог до точності, швидкодії та складності реалізації системи.

У рамках даної роботи доцільно використовувати комбінований підхід, який поєднує простоту керування за правилами алгоритму з елементами оптимізації, що дозволяє забезпечити баланс між ефективністю та практичною реалізованістю.

3.4 Моделювання та аналіз результатів

Моделювання виконувалося у середовищі MATLAB/Simulink із дискретним кроком $\Delta t = 1$ год. Результати отримано шляхом чисельного розрахунку добового графіка навантаження з урахуванням алгоритму керування режимами G2V/V2G.

Для перевірки працездатності запропонованого алгоритму було створено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Модель дозволяє виконати порівняльний аналіз режимів роботи енергосистеми без використання технології V2G та з використанням двостороннього обміну енергією між електромобілем і мережею.

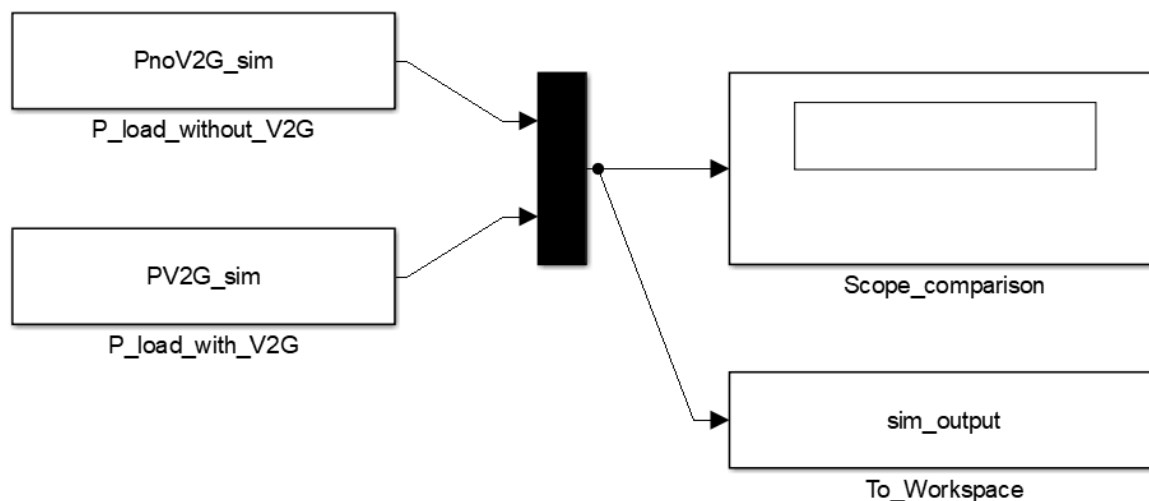


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель дослідження режимів роботи системи V2G у середовищі MATLAB/Simulink

У моделі використовуються два вхідних сигнали: добовий графік навантаження енергосистеми без використання V2G та графік навантаження при роботі алгоритму G2V/V2G. Блок Mux виконує об'єднання сигналів для їх подальшого порівняння, блок Scope забезпечує візуалізацію результатів моделювання, а блок To Workspace дозволяє передавати результати до робочого середовища MATLAB для подальшого аналізу та обробки.

3.4.1 Умови проведення моделювання

Моделювання виконується для умовної міської енергосистеми з типовим добовим графіком навантаження, представленим у розділі 2. Як базовий сценарій розглядається режим роботи без використання V2G, тобто при некерованому або частково керованому заряджанні електромобілів.

Для оцінки ефективності алгоритму використовується другий сценарій, у якому реалізовано керування режимами заряджання та віддачі енергії відповідно до розробленого алгоритму.

Основні параметри моделювання:

кількість електромобілів

$$N=200$$

середня ємність акумулятора

$$E_{bat}=60$$

максимальна потужність заряджання	$P_{charge}=7$
максимальна потужність V2G	$P_{V2G}=5$
часовий інтервал моделювання	24 години
крок дискретизації	$\Delta t=1$

3.4.2 Результати моделювання без використання V2G

У базовому сценарії електромобілі здійснюють заряджання переважно у вечірній час після завершення робочого дня, що призводить до накладання додаткового навантаження на вже існуючий пік споживання.

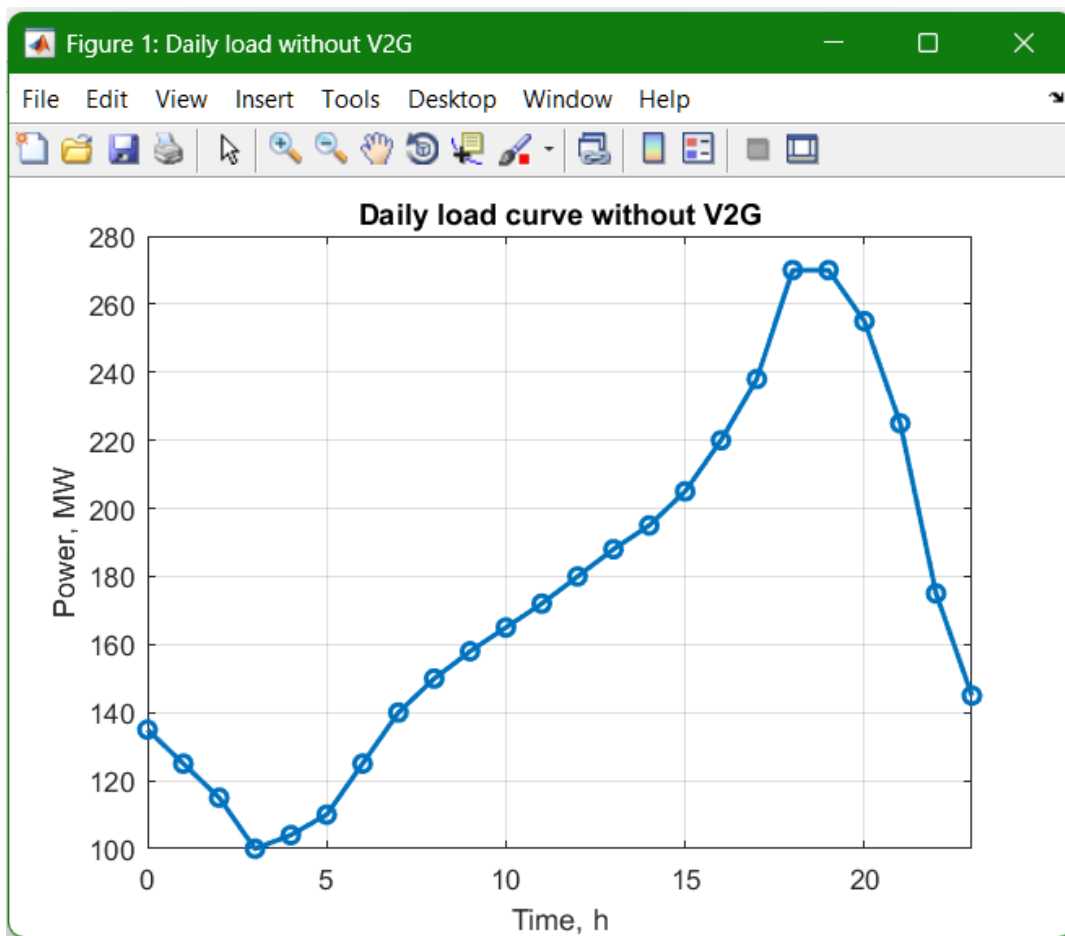


Рисунок 3.3 – Добовий графік навантаження без використання V2G

Як видно з рис. 3.3 вечірній пік навантаження суттєво зростає, відбувається перевантаження мережі у період 18:00–21:00, використання електромобілів у такому режимі погіршує роботу енергосистеми.

Максимальне навантаження:

$$P_{max}^{base} = 270 \text{ МВт}.$$

3.4.3 Результати моделювання з використанням V2G

У другому сценарії використовується розроблений алгоритм керування, який переносить заряджання на нічний період та активує режим V2G у години пікового навантаження.

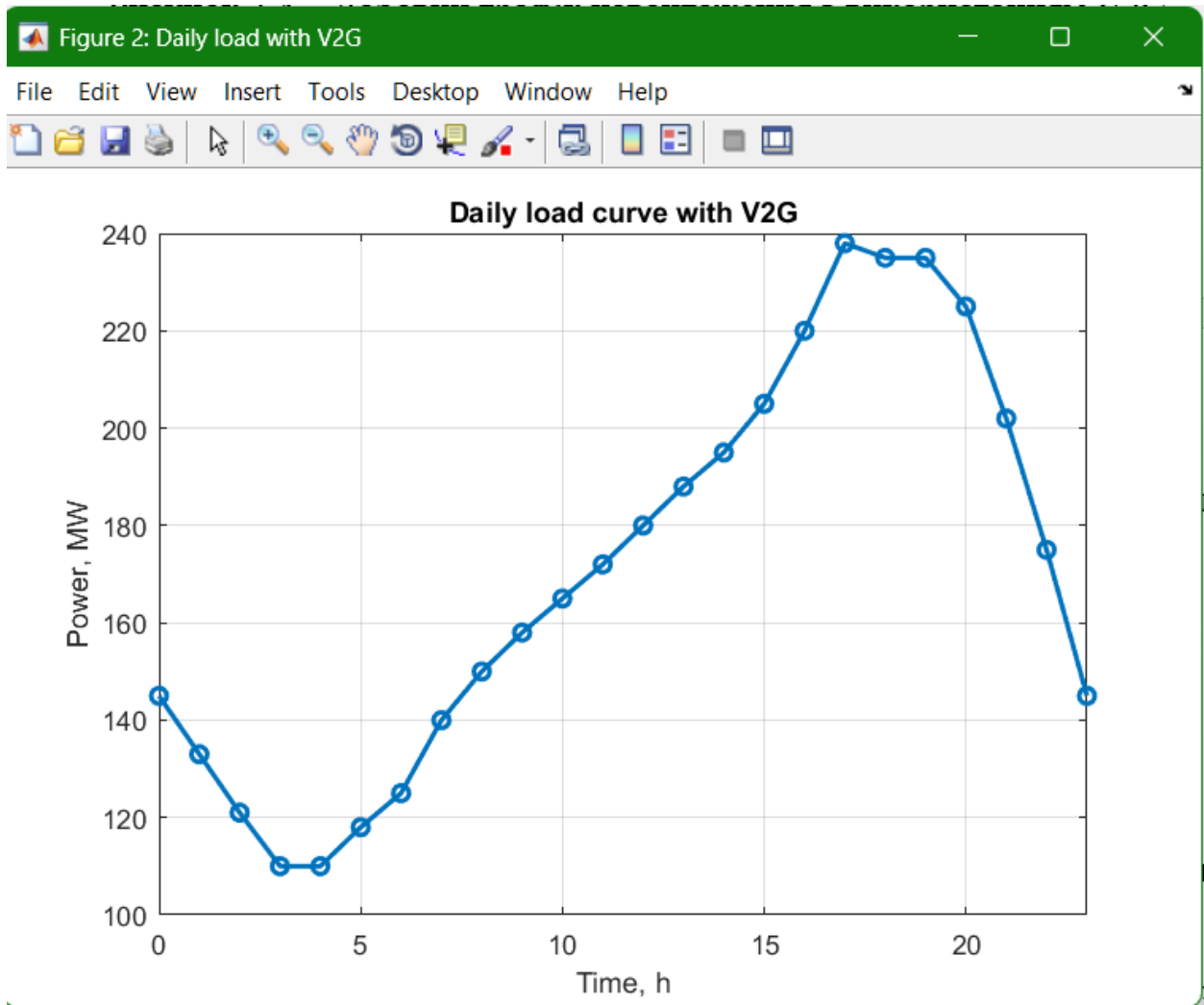


Рисунок 3.4 – Добовий графік навантаження з використанням V2G

Як видно з рис. 3.4 пікове навантаження зменшується, графік стає більш рівномірним, а нічний спад частково компенсується заряджанням.

Максимальне навантаження:

$$P_{max}^{V2G} = 235 \text{ МВт}.$$

3.4.4 Порівняльний аналіз

Для кількісної оцінки ефективності алгоритму проведено порівняння двох сценаріїв.

Для більш наочного аналізу ефективності запропонованого алгоритму виконано суміщене порівняння добових графіків навантаження енергосистеми у двох режимах роботи: без використання технології V2G та з використанням двостороннього обміну енергією між електромобілями і мережею.

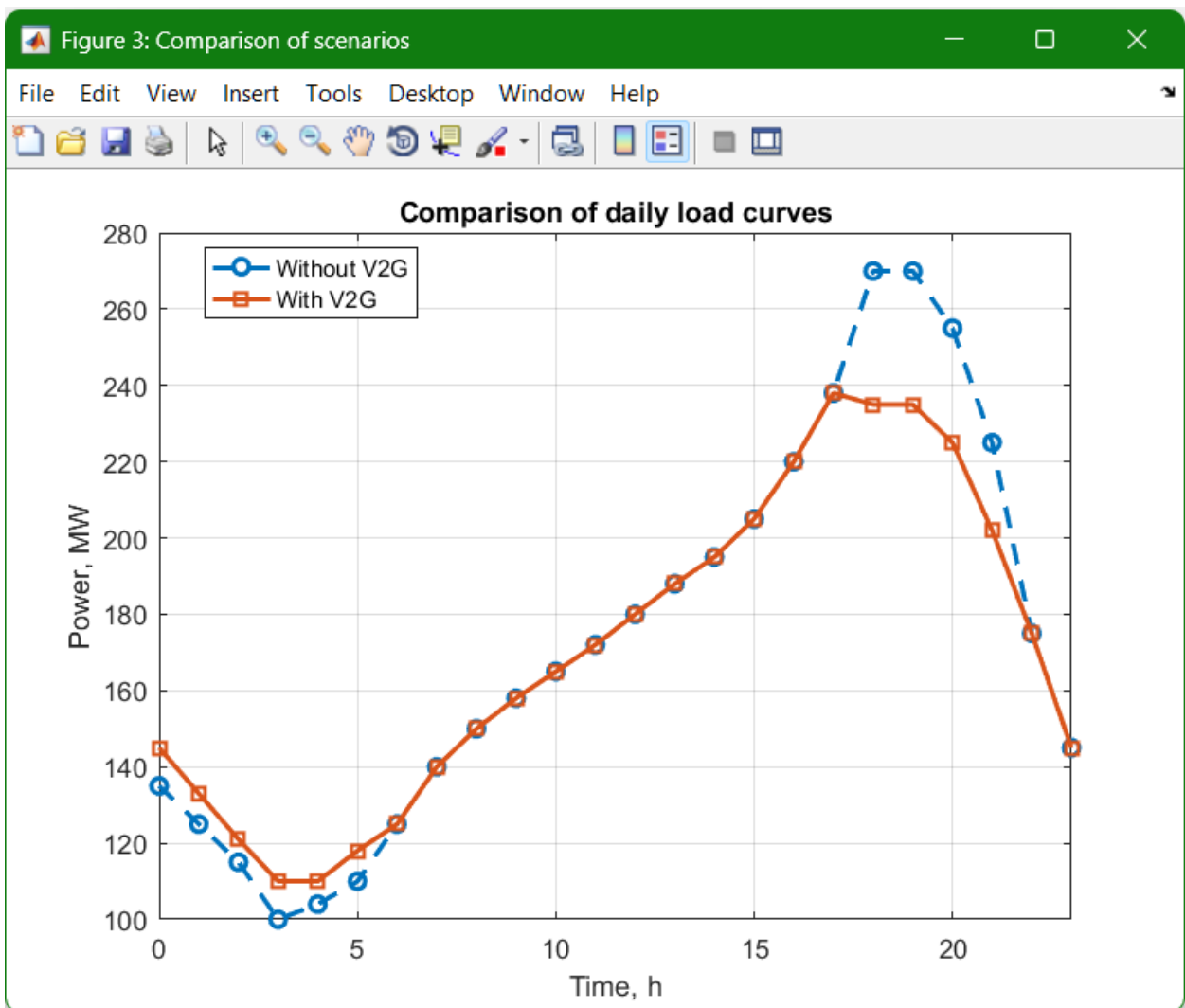


Рисунок 3.5 – Порівняння добових графіків навантаження енергосистеми без використання V2G та з використанням V2G

З наведеного графіка видно, що застосування алгоритму V2G дозволяє знизити рівень вечірнього пікового навантаження та зробити добовий графік

більш рівномірним. У режимі без V2G спостерігається різке зростання навантаження у вечірній період через одночасне заряджання електромобілів. При використанні режиму V2G частина накопиченої енергії повертається до мережі у години максимального споживання, а процес заряджання переноситься переважно на нічний період. Отримані результати підтверджують ефективність використання технології V2G для згладжування добового графіка навантаження міської енергосистеми.

Для кількісної оцінки ефективності використання технології Vehicle-to-Grid виконано порівняння основних параметрів роботи енергосистеми у двох режимах: без використання V2G та з використанням алгоритму двостороннього обміну енергією.

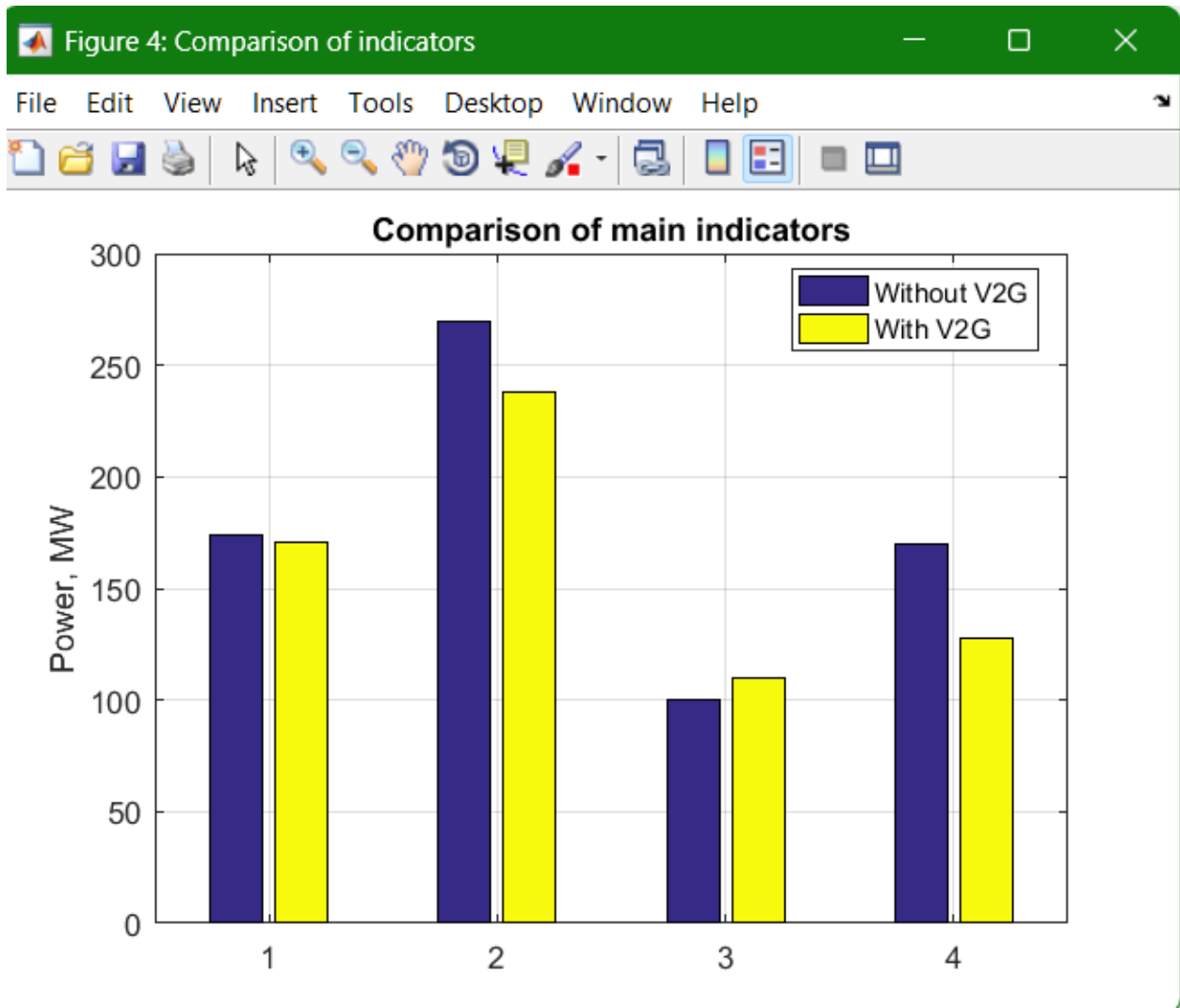


Рисунок 3.6 – Порівняння основних параметрів роботи енергосистеми без використання V2G та з використанням V2G

З наведених результатів видно, що використання технології V2G дозволяє зменшити максимальне навантаження енергосистеми, а також знизити розмах добового графіка навантаження. Одночасно спостерігається незначне підвищення мінімального навантаження у нічний період, що пов'язано з перенесенням процесу заряджання електромобілів на години зниженого споживання електроенергії. Це забезпечує більш рівномірний режим роботи енергосистеми та зменшує перевантаження у пікові години.

Для кількісної оцінки ефективності алгоритму проведено порівняння двох сценаріїв: без використання V2G та з використанням режиму двостороннього енергообміну.

Числові значення отримані на основі розрахунків добового графіка навантаження, сформованого відповідно до параметрів моделі.

Таблиця 3.2 – Порівняння параметрів роботи енергосистеми без V2G та з V2G

Показник	Без V2G	з V2G	Абсолютна зміна	Відносна зміна, %
Максимальне навантаження, МВт	270	235	-35	-12,96
Мінімальне навантаження, МВт	100	110	+10	+10,00
Середнє навантаження, МВт	188,33	181,88	-6,45	-3,43
Розмах навантаження, МВт	170	125	-45	-26,47

Результати порівняльного аналізу показують, що застосування алгоритму керування режимами G2V/V2G дозволяє знизити максимальне навантаження енергосистеми з 270 МВт до 235 МВт, тобто на 12,96 %. Крім того, розмах добового графіка навантаження зменшується зі 170 МВт до 125 МВт, що відповідає зниженню на 26,47 %. Отримані результати підтверджують ефективність використання електромобілів як розподілених накопичувачів енергії для згладжування графіка навантаження міської енергосистеми.

Для оцінки змін використано показники абсолютної та відносної різниці, що визначаються за такими залежностями:

$$\Delta P = P_{V2G} - P_{\text{без } V2G}, \quad (3.7)$$

$$\delta = \frac{P_{V2G} - P_{\text{без } V2G}}{P_{\text{без } V2G}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

Зокрема, для максимального навантаження:

$$\Delta P_{max} = 235 - 270 = -35 \text{ МВт},$$

$$\delta_{P_{max}} = \frac{235 - 270}{270} \cdot 100\% = -12,96\%$$

Аналіз наведених у таблиці 3.2 даних показує, що використання алгоритму керування режимами V2G призводить до істотної зміни характеру добового графіка навантаження. Зокрема, спостерігається зменшення максимального навантаження на 35 МВт, що відповідає зниженню піку на 12,96 %. Одночасно відбувається підвищення мінімального навантаження на 10 МВт, що свідчить про часткове заповнення нічного провалу за рахунок перенесення процесу заряджання на періоди низького споживання.

Крім того, середнє значення навантаження зменшується на 6,45 МВт (3,43 %), що вказує на більш ефективний розподіл енергоспоживання протягом доби. Найбільш показовим є зменшення розмаху навантаження на 45 МВт (26,47 %), що характеризує значне підвищення рівномірності роботи енергосистеми.

Моделювання виконувалося у середовищі MATLAB/Simulink із дискретним кроком $\Delta t = 1$ год. Результати отримано шляхом чисельного розрахунку добового графіка навантаження з урахуванням алгоритму керування режимами G2V/V2G (рис.3.5).

3.4.5 Аналіз чутливості алгоритму керування V2G

Для додаткової оцінки працездатності запропонованого алгоритму було виконано аналіз чутливості системи до зміни основних параметрів роботи. Дослідження проводилося шляхом варіювання кількості електромобілів, тарифних умов та рівня заряду акумуляторів.

1. Вплив кількості електромобілів

При збільшенні кількості електромобілів, підключених до системи V2G, спостерігається зростання можливостей щодо згладжування добового графіка навантаження. Це пояснюється збільшенням сумарної накопичувальної ємності системи та підвищенням потужності, яка може бути передана до мережі у пікові години.

Разом із тим, надмірне збільшення кількості електромобілів призводить до зростання навантаження на зарядну інфраструктуру та підвищує вимоги до систем керування й координації процесів заряджання та розряджання. Таким чином, ефективність системи V2G значною мірою залежить від співвідношення між кількістю електромобілів та пропускнуою здатністю електричної мережі.

2. Вплив тарифних умов

Одним із ключових факторів роботи алгоритму є тарифний сигнал. При зниженні нічного тарифу система автоматично переносить процес заряджання електромобілів на нічний період, що дозволяє додатково зменшити вечірнє пікове навантаження.

У випадку збільшення різниці між денним та нічним тарифами ефективність алгоритму зростає, оскільки підвищується економічна доцільність використання режиму G2V у нічні години та режиму V2G у години максимального споживання електроенергії.

Якщо тарифні сигнали відсутні або мають незначну різницю, ефективність роботи системи V2G знижується, а процеси заряджання стають менш керованими.

3. Вплив рівня заряду акумулятора SOC

Важливим параметром системи є рівень заряду акумулятора електромобіля SOC. При низькому значенні SOC система блокує передачу енергії до мережі для забезпечення необхідного запасу енергії транспортного засобу.

Як показало моделювання, при зменшенні SOC нижче встановленого резервного рівня SOC_{res} режим V2G не активується, а електромобіль переходить у режим заряджання або очікування. Це дозволяє запобігти надмірному розряджання акумулятора та забезпечує стабільність роботи системи.

Таким чином, запропонований алгоритм демонструє адаптивний характер роботи та забезпечує стійке функціонування системи при зміні основних параметрів експлуатації. Отримані результати підтверджують можливість ефективного використання технології V2G для керування режимами навантаження міської енергосистеми.

3.4.6 Узагальнення результатів

Отримані результати моделювання показують, що використання алгоритму керування режимами V2G дозволяє зменшити пікове навантаження енергосистеми; підвищити рівномірність графіка споживання; ефективно використовувати електромобілі як накопичувачі енергії; покращити умови роботи енергосистеми без додаткових інвестицій у генерацію.

Відносне зниження пікового навантаження становить $\delta_{P_{max}} = 12,96\%$, що свідчить про високу ефективність запропонованого алгоритму керування.

Додатково встановлено, що впровадження режиму V2G сприяє згладжуванню добового графіка навантаження, що проявляється у зменшенні різниці між максимальним та мінімальним значеннями потужності. Це дозволяє знизити навантаження на генеруючі та мережеві елементи енергосистеми, підвищити їх надійність та зменшити ймовірність перевантажень у пікові періоди.

Таким чином, результати моделювання підтверджують доцільність використання електромобілів як активних елементів керування енергосистемою та демонструють потенціал концепції Vehicle-to-Grid для підвищення ефективності функціонування міських енергетичних систем.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

У сучасних умовах розвитку міського електротранспорту та впровадження інтелектуальних систем керування, зокрема концепції Vehicle-to-Grid (V2G), питання охорони праці набувають особливої актуальності. Це пов'язано з тим, що експлуатація електромобілів та зарядної інфраструктури супроводжується впливом електричних, теплових, механічних та інформаційних факторів, які можуть становити небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Особливістю розглядуваної системи є двосторонній обмін енергією між електромобілем та електричною мережею, що ускладнює режими роботи обладнання та підвищує вимоги до безпеки його експлуатації. Крім того, використання алгоритмів керування передбачає застосування комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, що також формує специфічні умови праці.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [8], основними завданнями є забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань, а також впровадження організаційних і технічних заходів захисту працівників.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що виникають при експлуатації систем V2G, а також розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

У процесі експлуатації електромобілів та зарядної інфраструктури з підтримкою V2G на персонал можуть впливати наступні небезпечні та шкідливі фактори [9 – 15].

1. Електричні фактори

Найбільш небезпечним є вплив електричного струму. Сучасні системи заряджання працюють при напрузі:

- до 400 В (АС);
- до 800 В (DC у швидкісних зарядних станціях) [14].

Небезпека полягає у:

- можливості ураження електричним струмом;
- появи дугових розрядів;
- пошкодженні ізоляції.

Відповідно до вимог електробезпеки, навіть короточасний вплив струму може призвести до тяжких наслідків, що регламентується правилами безпечної експлуатації електроустановок [12, 13] та вимогами ПУЕ [9, 11].

Особливо небезпечними є режими V2G, при яких енергія передається від акумулятора в мережу, що створює ризик зворотного живлення.

2. Теплові фактори

У процесі заряджання та розряджання акумуляторів виникає тепловиділення, що може призводити до:

- перегріву силових елементів;
- зниження ресурсу батарей;
- ризику займання у разі несправності.

Питання теплової безпеки враховуються у стандартах, що регламентують роботу зарядних систем електромобілів [14].

3. Електромагнітні поля

Робота силових перетворювачів та інверторів супроводжується утворенням електромагнітних полів, які можуть:

- впливати на електронне обладнання;
- створювати додаткове навантаження на організм людини.

Допустимі рівні електромагнітних впливів та заходи захисту визначаються стандартами експлуатації електроустановок [15].

4. Механічні фактори

До механічних небезпек належать:

- рухомі частини електротранспорту;
- підключення/відключення кабелів;
- можливість пошкодження роз'ємів.

Такі ризики враховуються у вимогах до організації робіт та експлуатації електроустановок [15].

5. Фактори, пов'язані з роботою за комп'ютером

Оскільки керування системою V2G здійснюється з використанням програмного забезпечення, оператор піддається впливу:

- статичного навантаження;
- напруження зору;
- психоемоційного навантаження.

Вимоги до організації таких робочих місць визначаються санітарними нормами [14].

4.2.1 Нормативна база з охорони праці

При аналізі питань охорони праці для систем інтеграції електротранспорту в енергосистему з використанням концепції V2G необхідно спиратися на чинну нормативну базу, яка регламентує безпечну експлуатацію електроустановок, організацію робочих місць та вимоги до електротехнічного обладнання.

Основним документом, що визначає загальні принципи забезпечення безпеки праці в Україні, є Закон України «Про охорону праці», який встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці та відповідальність за їх недотримання [8].

Питання безпечної експлуатації електроустановок регламентуються «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів», де визначено вимоги до персоналу, порядок допуску до робіт, а також заходи захисту від ураження електричним струмом [9]. Це особливо важливо для

систем V2G, де реалізується двосторонній обмін енергією, що ускладнює режими роботи електрообладнання.

Вимоги до технічної експлуатації та конструкції електроустановок визначаються Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), які встановлюють норми щодо заземлення, ізоляції, вибору кабелів та захисних пристроїв [10]. Дані положення є базовими при проектуванні зарядної інфраструктури для електромобілів.

Окрему групу становлять стандарти, що регламентують роботу зарядних систем електромобілів. Зокрема, стандарт ДСТУ EN 61851 визначає вимоги до безпечної експлуатації зарядних станцій, включаючи режими роботи, захист від перенапруг та вимоги до електричних з'єднань [11].

Також важливе значення мають стандарти з експлуатації електроустановок, зокрема ДСТУ EN 50110-1, який встановлює правила організації робіт, розподілу відповідальності та заходів безпеки при обслуговуванні електрообладнання [11].

Таким чином, аналіз нормативної бази показує, що забезпечення безпеки при впровадженні систем V2G повинно базуватися на комплексному врахуванні вимог до електробезпеки, експлуатації обладнання та організації праці персоналу.

4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки

Для зниження рівня впливу небезпечних факторів необхідно впровадити комплекс організаційних та технічних заходів, що відповідають вимогам чинних нормативних документів у галузі охорони праці та електробезпеки [8 – 13].

1. Заходи електробезпеки

До основних заходів електробезпеки належать:

- застосування захисного заземлення та занулення;
- використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ);

- ізоляція струмопровідних частин;
- блокування включення при відкритих корпусах;
- використання індивідуальних засобів захисту (рукавиці, інструмент з ізоляцією).

Зазначені заходи спрямовані на запобігання ураженню електричним струмом та відповідають вимогам правил безпечної експлуатації електроустановок і ПУЕ [9 – 11].

2. Захист від теплових впливів

Захист від теплових факторів забезпечується шляхом:

- застосування систем охолодження акумуляторів;
- контролю температури у реальному часі;
- автоматичного відключення при перегріві;
- використання негорючих матеріалів.

Необхідність таких заходів обумовлена ризиком перегріву та займання акумуляторних систем, що враховується у стандартах зарядної інфраструктури електромобілів [11].

3. Захист від електромагнітних впливів

Для зменшення впливу електромагнітних полів застосовуються:

- екранування силових кабелів;
- правильне прокладання проводки;
- використання фільтрів перешкод.

Ці заходи відповідають вимогам експлуатації електроустановок та спрямовані на зниження впливу електромагнітних завад на обладнання і персонал [11].

4. Організація робочого місця оператора

Безпечні умови праці оператора забезпечуються шляхом:

- дотримання ергономічних вимог;
- правильного освітлення робочої зони;
- використання регульованих робочих місць;

– організації перерв у роботі (не менше 10–15 хв кожні 2 години).

Зазначені вимоги регламентуються санітарними нормами роботи з комп'ютерною технікою [9].

5. Організаційні заходи

До організаційних заходів належать:

- проведення інструктажів з охорони праці;
- допуск до роботи тільки кваліфікованого персоналу;
- розробка інструкцій з експлуатації обладнання;
- регулярне технічне обслуговування.

Вказані заходи спрямовані на попередження виробничого травматизму та відповідають вимогам законодавства з охорони праці [10].

4.3.1 Розрахунок електробезпеки

Одним із найбільш небезпечних факторів при експлуатації зарядної інфраструктури електромобілів є дія електричного струму на організм людини. Для оцінки рівня небезпеки розглянемо випадок дотику людини до струмопровідної частини.

Струм, що протікає через тіло людини, визначається за законом Ома [12–15]:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4.1)$$

де U – напруга дотику, В;

R – електричний опір тіла людини, Ом.

Застосування даної залежності для оцінки ураження електричним струмом наведено в нормативних документах та довідкових джерелах з електробезпеки [2, 7].

Для розрахунку приймаємо типові значення:

$$U = 220 \text{ В}, \quad R = 1000 \text{ Ом}.$$

Тоді струм через тіло людини становить:

$$I = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ А},$$

або

$$I = 220 \text{ мА}$$

Аналіз результату.

Отримане значення струму значно перевищує допустимі рівні. Згідно з нормативними вимогами:

- струм понад 10 мА є відчутним і небезпечним;
- струм понад 100 мА може призвести до фібриляції серця і є смертельно небезпечним [2, 3].

Таким чином:

$$I = 220 \text{ мА} > 100 \text{ мА}.$$

тобто ураження електричним струмом у таких умовах є критично небезпечним.

Отже, без застосування засобів захисту робота з електрообладнанням зарядної інфраструктури є небезпечною для життя людини. Це обґрунтовує необхідність використання систем електробезпеки.

4.3.2 Розрахунок захисного відключення

Для забезпечення захисту персоналу від ураження електричним струмом у сучасних електроустановках застосовуються пристрої захисного відключення (ПЗВ), принцип дії яких базується на контролі струмів витоку [14, 15].

Приймаємо струм спрацювання ПЗВ:

$$I_{\text{спр}} = 30 \text{ мА} .$$

Згідно з нормативними вимогами, струм спрацювання ПЗВ повинен бути меншим за небезпечний для людини рівень:

$$I_{\text{спр}} < I_{\text{небезпечний}} , \quad (4.2)$$

$$30 \text{ мА} < 100 \text{ мА} .$$

умова виконується.

Оскільки пристрій спрацьовує при струмі значно меншому за небезпечний, відключення електроживлення відбувається раніше, ніж струм досягне рівня, що загрожує життю людини.

Застосування ПЗВ забезпечує ефективний захист персоналу від ураження електричним струмом та є обов'язковим елементом електробезпеки зарядної інфраструктури.

4.3.3 Розрахунок тепловиділення

Для оцінки теплових процесів у струмопровідних елементах використовується залежність [14, 15]:

$$Q = I^2 R t , \quad (4.3)$$

де I – сила струму, А;

R – електричний опір провідника, Ом;

t – час протікання струму, с.

Дана формула описує кількість тепла, що виділяється у провіднику, і широко використовується при аналізі нагріву електрообладнання [7].

Вихідні дані: $I=10 \text{ А}$, $R=0,5 \text{ Ом}$, $t=3600 \text{ с}$

Розрахунок:

$$Q=10^2 \cdot 0,5 \cdot 3600=180000 \text{ Дж}.$$

Отримане значення тепловиділення є суттєвим і може призводити до перегріву кабелів, деградації ізоляції та зниження надійності роботи обладнання. Такі явища особливо актуальні для систем заряджання електромобілів, де тривалий час протікають значні струми [4].

Отже, для забезпечення безпечної роботи необхідно передбачити системи охолодження, контроль температури і захист від перевантаження.

Таким чином, проведені розрахунки підтверджують необхідність застосування комплексних заходів електробезпеки, що включають використання пристроїв захисного відключення, надійну ізоляцію струмопровідних частин та контроль теплових режимів роботи обладнання.

Висновки по розділу

У розділі проведено аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що виникають при експлуатації систем інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції V2G. Встановлено, що основну небезпеку становлять електричні та теплові фактори, а також ризики, пов'язані з роботою силового обладнання та комп'ютерних систем керування.

Запропоновані організаційно-технічні заходи дозволяють забезпечити безпечні умови праці персоналу, знизити ризик аварійних ситуацій та підвищити надійність функціонування системи в цілому.

Проведені розрахунки підтверджують необхідність застосування комплексних заходів електробезпеки, що включають використання пристроїв захисного відключення, надійну ізоляцію струмопровідних частин та контроль теплових режимів роботи обладнання. Це, у свою чергу, забезпечує зниження рівня виробничих ризиків, підвищення безпеки обслуговуючого персоналу та надійність функціонування електротехнічних систем у процесі експлуатації.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці є необхідною умовою ефективного впровадження технологій Vehicle-to-Grid у міські енергосистеми.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу дослідження інтеграції електротранспорту в енергосистему міста з використанням концепції Vehicle-to-Grid (V2G).

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку технології V2G та особливості інтеграції електромобілів у міські енергосистеми. Встановлено, що електротранспорт суттєво впливає на графіки навантаження, а використання електромобілів як накопичувачів енергії дозволяє підвищити ефективність роботи енергосистеми. На основі аналізу світового досвіду сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі розроблено математичну модель системи інтеграції електротранспорту в енергосистему міста. Сформовано модель добового навантаження, модель електромобіля, зарядної інфраструктури та режиму V2G. Запропоновано цільову функцію, спрямовану на зниження пікових навантажень і підвищення ефективності використання електроенергії.

У третьому розділі розроблено алгоритм керування режимами G2V та V2G з урахуванням навантаження мережі, рівня заряду акумулятора та тарифних умов. За результатами моделювання встановлено, що використання V2G дозволяє знизити пікове навантаження на 35 МВт (12,96 %) та зменшити розмах добового графіка навантаження на 26,47 %, що свідчить про підвищення рівномірності роботи енергосистеми.

У четвертому розділі виконано аналіз небезпечних і шкідливих факторів та розроблено заходи з охорони праці під час експлуатації систем V2G. Проведені розрахунки підтвердили необхідність застосування сучасних засобів електрозахисту.

У результаті роботи доведено, що інтеграція електротранспорту на основі концепції Vehicle-to-Grid є ефективним засобом підвищення енергетичної ефективності міських енергосистем. Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених моделей і алгоритмів під час

проектування систем керування зарядною інфраструктурою та інтеграції електромобілів у міські енергосистеми.

Результати роботи апробовано на IV ВСЕУКРАЇНСЬКІЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ «ЕНЕРГЕТИКА КРІЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ» – Секція 1. Технологічний прорив: від механічних систем до цифрової інженерії та робототехніки – 14 ТРАВНЯ 2026 – ВСП «Бурштинський енергетичний фаховий коледж ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ» [16].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Richardson, P. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 19. P. 247–254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.04>
2. Kempton, W., Tomic, J. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 144, No. 1. P. 268–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025>
3. Kempton, W., Tomic, J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 144, No. 1. P. 280–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.022>
4. Lund, H., Kempton, W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, No. 9. P. 3578–3587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.007>
5. Andersen, P. B., Toghroljerdi, S. H., Sørensen, T. M., Christensen, B. E., Høj, J. C. M. L., Zecchino, A. The Parker Project: Final Report. 2019. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/201164295/Parker_Final_report_v1.1_2019.pdf
6. Kempton, W., et al. A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system. University of Delaware. URL: <https://www.udel.edu/v2g/>
7. Peterson, S. B., Whitacre, J. F., Apt, J. The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. *Journal of Power Sources*. 2010. Vol. 195, No. 8. P. 2377–2384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.09.070>
8. Закон України «Про охорону праці». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
9. ДНАОП.0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації

електроустановок споживачів». URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>

10. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). URL:
https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27607

11. ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

12. ДСТУ EN 61851-1:2017. Системи заряджання електричних транспортних засобів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=73235

13. ДСТУ EN 50110-1:2014. Експлуатація електроустановок. URL:
https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=73372

14. Козлов С. С. Охорона праці та цивільний захист. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальностей 101, 141, 184. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 174 с. URL:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27324/1/OP_TsZ.pdf

15. Лут М. Т., Радько І. П., Ковтун П. М., Окушко О. В. Охорона праці (електробезпека): навчальний посібник. 2017. 355 с. URL:
<https://dglib.nubip.edu.ua/handle/123456789/443>

16. Кучинський В. С., Камнев О. О., Розінков І. О. ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ЕНЕРГОСИСТЕМУ МІСТА: ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ // ІV ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА КРІЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ». Секція 1. Технологічний прорив: від механічних систем до цифрової інженерії та робототехніки. 14 ТРАВНЯ 2026. - ВСП «Бурштинський енергетичний фаховий коледж ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ». https://drive.google.com/drive/folders/1G1Y9DdeY_3--mzS_R34WZCXADiusV58p