

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему: «Підсистема прогнозування доступної сонячної енергії для
планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі»

Виконав: здобувач вищої освіти
4 курсу, групи Сінж 2022-1
напряму підготовки (спеціальності)
151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
Гайденко Єгор Романович


Керівник: Арсеньєва О. П., д.т.н., проф.
Рецензент: Капустенко П.О., к.т.н., доц.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

**Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури**
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри АКІТ

**БАРАНОВ О. О.**
«19» червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Гайденко Єгор Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підсистема прогнозування доступної сонячної енергії для
планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі
затверджені наказом закладу вищої освіти від «22» травня 2026 р. № 440-03
керівник роботи Арсеньєва О. П., д.т.н., проф.

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

2. Термін подання студентом роботи 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: рекомендації щодо розробки додатку, індивідуальне
завдання на розробку, дані енергоспоживання будинку та електромобіля









4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз предметної області: проаналізувати особливості домашніх фотоелектричних систем та систем енергоменеджменту; розглянути інтеграцію електромобілів у домашні енергосистеми та вплив заряджання на профіль енергоспоживання. Обрати математичну модель енергетичного балансу домашньої енергосистеми з урахуванням генерації, навантаження, параметрів електромобіля та накопичувачів енергії. Розробити алгоритм планування заряджання з урахуванням прогнозованої PV-генерації та доступності автомобіля. Розробити структуру програмної підсистеми та реалізувати її основні модулі. Провести тестування та аналіз результатів моделювання. Провести розрахунки в галузі охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)


Структура домашньої енергосистеми з фотоелектричною генерацією та електромобілем. Схема планування заряджання електромобіля. Функціональна модель програмної підсистеми (IDEF0). Структура програмних модулів.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|------------|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділ I | О. П. Арсеньєва, професор |  |  |
| Розділ II | О. П. Арсеньєва, професор |  |  |
| Розділ III | О. П. Арсеньєва, професор |  |  |
| Розділ IV | В. В. Малишева, доцент |  |  |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

Керівник 
(підпис)

Завдання прийняв до виконання 
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1 | Предпроектні дослідження | 12.05.2026 | |
| 2 | Аналіз предметної області | 14.05.2026 | |
| 3 | Розробка алгоритму планування підзарядки батареї | 16. 05.2026 | |
| 4 | Розробка програмного забезпечення | 24.05.2026 | |
| 5 | Тестування і аналіз результатів роботи програмного продукту | 06.05.2026 | |
| 6 | Охорона праці | 08. 06.2026 | |

Студент

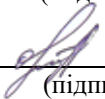


(підпис)

Є. Р. Гайденко

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

О. П. Арсеньєва

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

У роботі розглядається розробка програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі. Об'єктом дослідження є процес енергозабезпечення заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією. Предметом дослідження є методи прогнозування доступної сонячної енергії, математичні моделі визначення сонячного надлишку, алгоритми планування заряджання електромобіля та програмні засоби для аналізу і візуалізації результатів.

Мета роботи – розробка програмної підсистеми, яка дозволяє визначати доступну сонячну енергію, формувати графік заряджання електромобіля з пріоритетним використанням фотоелектричної генерації та оцінювати ефективність такого планування за показниками частки сонячної енергії й імпорту електроенергії з мережі.

Структура роботи представлена вступом, чотирма розділами, висновками, переліком посилань.

Структура та обсяг дипломної роботи бакалавра. Випускна кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, додатків та переліку посилань. Повний обсяг випускної кваліфікаційної роботи бакалавра становить 127 сторінок, в тому числі: 43 рисунки; 5 таблиць; 3 додатка на 31 сторінках; перелік посилань з 12 найменувань на 2 сторінках.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, ДОМАШНЯ ЕНЕРГОСИСТЕМА, ПРОГНОЗУВАННЯ, ЗАРЯДЖАННЯ, ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ.

ABSTRACT

The work considers the development of a software subsystem for forecasting available solar energy for electric vehicle charging planning in a home energy system. The object of the study is the process of energy supply for electric vehicle charging in a home energy system with photovoltaic generation. The subject of the study includes methods for forecasting available solar energy, mathematical models for determining solar surplus, algorithms for electric vehicle charging scheduling, and software tools for analysis and visualization of results.

The purpose of the work is to develop a software subsystem that enables the determination of available solar energy, the creation of an electric vehicle charging schedule with priority use of photovoltaic generation, and the evaluation of the effectiveness of such planning based on indicators of solar energy share and electricity import from the grid.

The structure of the work is represented by an introduction, four sections, conclusions and a list of references.

Structure and scope of the bachelor's thesis. The bachelor's thesis consists of an introduction, 4 sections, conclusions, appendices and a list of references. The full volume of the bachelor's final qualification work is 127 pages, including: 43 drawings; 5 table; 3 supplement on 31 pages; a list of links with 12 titles on 2 pages.

KEYWORDS: ELECTRIC VEHICLE, SOLAR ENERGY, PHOTOVOLTAIC SYSTEM, HOME ENERGY SYSTEM, FORECASTING, CHARGING, ENERGY MANAGEMENT.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Зміст | 1 |
| Перелік умовних позначень | 3 |
| Вступ | 4 |
| Розділ 1. Передпроектні дослідження домашніх енергосистем з електромобілем та сонячною генерацією | 8 |
| 1.1. Інтеграція електромобіля в домашню енергосистему..... | 8 |
| 1.2 Сонячні фотоелектричні системи в побутовому секторі | 12 |
| 1.3 Особливості заряджання електромобіля в домашніх умовах..... | 18 |
| 1.4 Домашні системи енергоменеджменту та керування навантаженням | 22 |
| 1.5 Методи прогнозування сонячної генерації для задач енергоменеджменту | 26 |
| 1.6 Постановка задачі дослідження..... | 30 |
| Висновки до розділу 1 | 34 |
| Розділ 2. Математична модель прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля | 35 |
| 2.1 Постановка задачі моделювання домашньої енергосистеми | 35 |
| 2.2 Вхідні дані та параметри моделі..... | 39 |
| 2.3 Модель визначення доступного сонячного надлишку..... | 42 |
| 2.4 Розрахунок потреби електромобіля в енергії..... | 46 |
| 2.5 Алгоритм планування заряджання електромобіля | 49 |
| 2.6 Показники оцінювання ефективності роботи підсистеми | 55 |
| Висновки до розділу 2 | 60 |

| | |
|---|-----|
| Розділ 3. Розробка програмної підсистеми прогнозування та планування заряджання..... | 62 |
| 3.1 Вибір програмного середовища для реалізації підсистеми..... | 62 |
| 3.2 Вимоги до програмної підсистеми..... | 66 |
| 3.3 Функціональна модель підсистеми в нотації IDEF0..... | 68 |
| 3.4 Структура програми та опис основних модулів..... | 75 |
| 3.5 Інтерфейс програми та подання результатів..... | 79 |
| 3.6 Тестування програми та аналіз результатів..... | 86 |
| Висновки до розділу 3..... | 92 |
| Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 94 |
| 4.1 Організаційно-правові основи забезпечення охорони праці..... | 94 |
| 4.2 Виявлення потенційних небезпек стосовно об'єкта проектування.... | 95 |
| 4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек та розробка заходів щодо їх попередження..... | 96 |
| Висновки до розділу 4..... | 100 |
| Загальні висновки..... | 101 |
| Список використаних джерел..... | 103 |
| Додаток А..... | 106 |
| Додаток Б..... | 109 |
| Додаток В..... | 122 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- API – Application Programming Interface, програмний інтерфейс прикладного програмування.
- DSM – Demand Side Management, керування попитом на стороні споживача.
- EV – Electric Vehicle, електромобіль.
- HEMS – Home Energy Management System, домашня система енергоменеджменту.
- IDEF0 – Integration Definition for Function Modeling, нотація функціонального моделювання.
- KPI – Key Performance Indicator, ключовий показник ефективності.
- MAE – Mean Absolute Error, середня абсолютна похибка.
- nRMSE – normalized Root Mean Square Error, нормована середньоквадратична похибка.
- OBD – On-Board Diagnostics, бортова діагностика автомобіля.
- PR – Performance Ratio, коефіцієнт продуктивності фотоелектричної системи.
- PV – Photovoltaic, фотоелектричний.
- ФЕП – фотоелектрична панель або фотоелектрична система, залежно від контексту.
- RMSE – Root Mean Square Error, середньоквадратична похибка.
- SOC – State of Charge, стан заряду акумуляторної батареї.
- dashboard – інформаційна панель для візуального подання результатів роботи програмної підсистеми.
- solar-aware charging – заряджання з урахуванням доступної сонячної енергії.
- smart charging – інтелектуальне заряджання електромобіля.
- smart grid – інтелектуальна електрична мережа.
- smart home – розумний будинок.
- Victron – система моніторингу та керування домашньою енергосистемою, дані якої використано для тестування підсистеми.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток енергетики та транспорту характеризується активним переходом до низьковуглецевих технологій, зростанням частки відновлюваних джерел енергії та поширенням електромобілів. Електромобіль розглядається не лише як транспортний засіб, а й як значне електричне навантаження, яке може впливати на добовий профіль споживання електроенергії в будинку та на роботу електричної мережі. Особливої актуальності ця проблема набуває у випадку домашнього заряджання, оскільки саме побутовий сектор є одним із ключових середовищ експлуатації зарядних пристроїв малої та середньої потужності.

Зростання кількості електромобілів потребує розвитку не тільки публічної зарядної інфраструктури, але й локальних інтелектуальних рішень для керування заряджанням. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, а продажі електромобілів у 2025 році очікувалися на рівні понад 20 млн одиниць, що відповідає приблизно одній чверті світового ринку нових автомобілів [1, 2]. Такі тенденції свідчать про необхідність удосконалення підходів до планування заряджання, особливо в умовах збільшення навантаження на розподільні електричні мережі.

Одним із перспективних напрямів зниження навантаження на мережу є поєднання електромобіля з домашньою фотоелектричною системою. У такій конфігурації частина енергії для заряджання може надходити безпосередньо від сонячних панелей, що підвищує рівень власного споживання відновлюваної енергії та зменшує імпорт електроенергії з мережі. Практичний інтерес до таких рішень пов'язаний із розвитком технологій заряджання за надлишковою сонячною генерацією, заряджання на основі прогнозу сонячної генерації та заряджання, оптимізованого за тарифами на електроенергію, які дозволяють узгоджувати заряджання електромобіля з доступною сонячною генерацією, прогнозом погоди та тарифними умовами [3].

Водночас сонячна генерація має змінний характер і залежить від часу доби, сезону, хмарності, температури та інших метеорологічних факторів. Через це заряджання електромобіля без урахування прогнозу доступної сонячної енергії може призводити до неефективного використання фотоелектричної системи: надлишкова енергія може не використовуватися для заряджання, а потреба в енергії для електромобіля може покриватися з мережі у години, коли власна генерація є недостатньою. Тому важливим завданням є створення програмної підсистеми, яка прогнозує доступну сонячну енергію та формує доцільний графік заряджання електромобіля.

У контексті домашніх енергосистем важливим є визначення обсягу енергії, який потенційно може бути використаний для заряджання електромобіля без збільшення навантаження на електричну мережу. Для цього необхідно враховувати співвідношення між прогнозованою генерацією фотоелектричної системи та енергоспоживанням будинку в різні часові інтервали.

Оцінювання доступної сонячної енергії для заряджання електромобіля передбачає аналіз таких факторів, як потужність фотоелектричної установки, характер побутового навантаження, часові параметри використання електромобіля та можливість застосування накопичувачів енергії. Урахування зазначених факторів створює передумови для формування підходів до планування заряджання в умовах змінної сонячної генерації та нерівномірного енергоспоживання.

Таким чином, актуальність роботи визначається необхідністю автоматизованого планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією. Така підсистема дозволяє підвищити частку використання власної сонячної енергії, зменшити залежність від мережі, покращити енергетичну ефективність будинку та забезпечити зручніше планування експлуатації електромобіля.

Об'єктом дослідження є процес енергозабезпечення заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією.

Предметом дослідження є методи прогнозування доступної сонячної енергії та алгоритми планування заряджання електромобіля з урахуванням побутового навантаження, параметрів фотоелектричної системи, потреби електромобіля в енергії та можливого використання домашньої батареї.

Методи дослідження включають аналіз та узагальнення наукових джерел для дослідження сучасних підходів до інтеграції електромобілів і фотоелектричних систем у домашні енергосистеми; методи математичного моделювання для формалізації процесів прогнозування доступної сонячної енергії та визначення енергетичного балансу системи; методи алгоритмізації та програмної інженерії для розробки програмної підсистеми планування заряджання; методи порівняльного аналізу для оцінювання ефективності запропонованого підходу за показниками використання сонячної енергії та обсягом імпорту електроенергії з мережі.

Метою роботи є розробка програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі, що дозволяє підвищити використання власної фотоелектричної генерації та зменшити імпорт електроенергії з мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. проаналізувати сучасні підходи до інтеграції електромобілів, фотоелектричних систем та домашніх систем енергоменеджменту;
2. розглянути роль прогнозування сонячної генерації у задачах інтелектуального заряджання електромобіля;
3. сформулювати структуру домашньої енергосистеми з фотоелектричною установкою, побутовим навантаженням, електромобілем і накопичувачем енергії;
4. розробити математичну модель визначення доступної сонячної енергії для заряджання електромобіля;
5. розробити алгоритм планування заряджання електромобіля з урахуванням прогнозованого сонячного надлишку та часових обмежень користувача;

6. реалізувати програмну підсистему для обробки вхідних даних, прогнозування доступної сонячної енергії та формування графіка заряджання;
7. провести тестування підсистеми та оцінити ефективність запропонованого підходу за часткою використаної сонячної енергії та обсягом імпорту електроенергії з мережі;
8. провести розрахунки стосовно охорони праці.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмної підсистеми, яка може бути використана як елемент домашньої системи енергоменеджменту для планування заряджання електромобіля на основі прогнозу доступної сонячної енергії. Запропонований підхід може бути корисним для власників електромобілів і домашніх фотоелектричних систем, оскільки дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо часу та режиму заряджання. Додатково підсистема дає змогу порівнювати різні сценарії заряджання та оцінювати вплив точності прогнозу PV-генерації на частку використання сонячної енергії.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі розглянуто сучасний стан використання електромобілів, фотоелектричних систем і домашніх систем енергоменеджменту. У другому розділі наведено математичну модель прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля. У третьому розділі описано архітектуру та реалізацію програмної підсистеми. У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки під час експлуатації домашньої енергосистеми з фотоелектричною установкою та зарядним пристроєм.

РОЗДІЛ 1. ПЕРЕДПРОЄКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОМАШНІХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ ТА СОНЯЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

1.1. Інтеграція електромобіля в домашню енергосистему

Поширення електромобілів змінює характер побутового енергоспоживання, оскільки електромобіль стає не лише транспортним засобом, а й додатковим електричним навантаженням значної потужності. На відміну від більшості побутових приладів, заряджання тягової батареї може тривати декілька годин і суттєво впливати на добовий графік споживання електроенергії. Тому інтеграція електромобіля в домашню енергосистему потребує не тільки наявності зарядного пристрою, але й засобів моніторингу, прогнозування та керування енергетичними потоками.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, домашнє заряджання залишається одним із найпоширеніших способів заряджання електромобілів, хоча розвиток публічної зарядної інфраструктури також є необхідною умовою масового впровадження електротранспорту [1]. У 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, що свідчить про швидке зростання зарядної інфраструктури, однак для власників приватних будинків або домогосподарств із доступом до паркувального місця саме домашнє заряджання залишається найбільш зручним і регулярним режимом експлуатації електромобіля [1].

З технічної точки зору домашня енергосистема з електромобілем може включати такі основні елементи: підключення до зовнішньої електричної мережі, побутове навантаження, фотоелектричну установку, інвертор, зарядний пристрій електромобіля, за потреби – стаціонарний накопичувач енергії, а також контролер або програмну підсистему енергоменеджменту. Така структура відповідає концепції «активного споживача», який не лише споживає електроенергію з мережі, але й виробляє, накопичує та оптимізує власне енергоспоживання. У сучасних дослідженнях домашня система енергоменеджменту розглядається як засіб моніторингу та оптимального

керування потоками енергії між відновлюваною генерацією, накопичувачами, електромобілем і побутовими приладами [4].

У контексті даної роботи найбільший інтерес становить поєднання електромобіля з фотоелектричною системою. Сонячна електростанція в побутовому секторі може частково покривати потреби будинку в електроенергії, а за наявності надлишкової генерації – забезпечувати заряджання електромобіля. Такий підхід дозволяє підвищити частку власного споживання сонячної енергії, зменшити імпорт електроенергії з мережі та знизити залежність користувача від зовнішніх тарифних умов. У практичних рішеннях для домашнього заряджання використовуються режими заряджання за надлишковою сонячною генерацією, заряджання на основі прогнозу сонячної генерації та заряджання з урахуванням цінових сигналів [3].

Разом із тим, інтеграція електромобіля в домашню енергосистему створює і певні технічні виклики. Якщо заряджання виконується без координації з іншими навантаженнями будинку та без урахування стану мережі, воно може збільшувати пікове навантаження. Емпіричне дослідження домашнього заряджання електромобілів на основі даних інтелектуального лічильнику приблизно 1600 домогосподарств показало, що попит на електроенергію в пікові години може зростати на 7–14 % для середнього домогосподарства з домашнім заряджанням електромобіля [5]. Це підтверджує необхідність інтелектуального планування заряджання, особливо у вечірні години, коли побутове споживання зазвичай зростає.

Одним із базових показників для аналізу роботи такої системи є енергетичний баланс будинку. У спрощеному вигляді його можна подати так:

$$E_{\text{grid}}(h) = E_{\text{house}}(h) + E_{\text{EV}}(h) - E_{\text{PV}}(h) - E_{\text{bat}}(h) \quad (1.1)$$

де $E_{\text{grid}}(h)$ – енергія, що імпортується з мережі протягом години h ; $E_{\text{house}}(h)$ – енергоспоживання побутових навантажень; $E_{\text{EV}}(h)$ – енергія, спрямована на заряджання електромобіля; $E_{\text{PV}}(h)$ – енергія, вироблена

фотоелектричною системою; $E_{bat}(h)$ – енергія, що надходить від домашнього накопичувача або накопичується в ньому залежно від прийнятого знаку балансу.

Для задачі планування заряджання важливо визначити не лише загальну сонячну генерацію, а саме ту її частину, яка залишається після покриття поточного навантаження будинку. Цю величину можна трактувати як доступний сонячний надлишок:

$$E_{surplus}(h) = \max(0; E_{PV}(h) - E_{house}(h)) \quad (1.2)$$

де $E_{surplus}(h)$ – доступна надлишкова сонячна енергія, яка потенційно може бути використана для заряджання електромобіля або накопичення в батареї. Якщо $E_{PV}(h) > E_{house}(h)$, система має позитивний сонячний надлишок. Якщо ж $E_{PV}(h) \leq E_{house}(h)$, у відповідний часовий інтервал власна генерація повністю використовується для покриття побутового навантаження, а заряджання електромобіля потребує або перенесення на інший час, або використання електроенергії з мережі.

Заряджання електромобіля від сонячної генерації має часове обмеження, оскільки максимальна генерація фотоелектричної системи зазвичай припадає на денні години, тоді як автомобіль може бути відсутнім біля будинку через поїздки користувача. Тому для ефективного використання PV-енергії необхідно враховувати не тільки прогноз генерації, але й часовий інтервал доступності автомобіля для заряджання. Якщо автомобіль перебуває вдома у години високої сонячної генерації, заряджання може виконуватися безпосередньо від PV-системи. Якщо ж автомобіль доступний переважно ввечері, доцільним є використання домашнього накопичувача енергії або часткове перенесення заряджання на години з нижчим тарифом.

У наукових дослідженнях підкреслюється, що прогнозування PV-генерації є важливою умовою ефективного інтелектуального заряджання. Зокрема, застосування прямого прогнозування сонячної іррадіації для

планування заряджання електромобіля дозволяє підвищити використання власної PV-енергії та зменшити коливання сумарного навантаження будинку [6]. У такій постановці прогноз сонячної генерації використовується як вхідний сигнал для алгоритму планування, який визначає, у які години доцільно заряджати електромобіль, щоб максимально використати локально вироблену енергію.

Ефективність інтеграції електромобіля з домашньою PV-системою може оцінюватися за різними показниками. Одним із них є частка заряджання електромобіля за рахунок сонячної енергії:

$$k_{PV,EV} = \frac{E_{PV,EV}}{E_{EV, total}} \quad (1.3)$$

де $k_{PV,EV}$ – частка енергії заряджання, отримана від фотоелектричної системи; $E_{PV,EV}$ – енергія PV-системи, фактично використана для заряджання електромобіля; $E_{EV, total}$ – загальна енергія, необхідна для заряджання електромобіля за розрахунковий період. Чим більше значення цього показника, тим вищий рівень використання власної сонячної генерації для потреб електромобіля.

Іншим важливим показником є обсяг імпорту електроенергії з мережі для заряджання:

$$E_{grid, EV} = E_{EV, total} - E_{PV,EV} - E_{bat, EV} \quad (1.4)$$

де $E_{grid, EV}$ – енергія, отримана з мережі для заряджання електромобіля; $E_{bat, EV}$ – енергія, передана до електромобіля з домашнього накопичувача. Цей показник дозволяє оцінити, наскільки запропонований алгоритм планування зменшує залежність заряджання від зовнішньої мережі.

Таким чином, інтеграція електромобіля в домашню енергосистему з фотоелектричною генерацією є комплексною задачею, яка поєднує питання

електропостачання, прогнозування, автоматизованого керування та оптимізації споживання. Узагальнену структуру домашньої енергосистеми з фотоелектричною генерацією та електромобілем, розроблену на основі узагальненої архітектури домашніх систем енергоменеджменту [4], подано на рис. 1.1. До її складу входять фотоелектричні панелі, інвертор, побутове навантаження, електромережа, домашній накопичувач енергії, зарядний пристрій електромобіля та програмна підсистема, яка аналізує прогноз сонячної генерації, споживання будинку і потребу електромобіля в енергії.

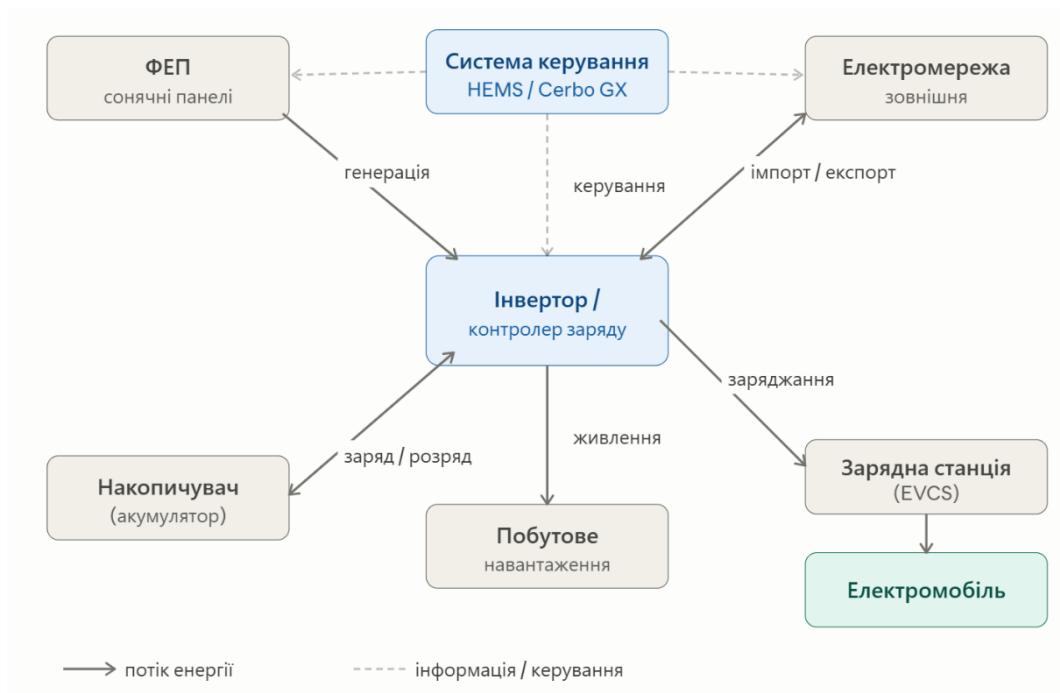


Рисунок 1.1 – Структура домашньої енергосистеми з фотоелектричною генерацією та електромобілем

1.2 Сонячні фотоелектричні системи в побутовому секторі

Сонячні фотоелектричні системи є одним із найбільш поширених технічних рішень для використання відновлюваної енергії на рівні окремого домогосподарства. Їх застосування пов'язане з можливістю локального виробництва електроенергії безпосередньо в місці її споживання, що зменшує залежність будинку від зовнішньої електромережі та створює умови для

підвищення енергоефективності побутового сектору. У літературі зазначається, що сонячна енергія є особливо придатною для використання на рівні домогосподарств, оскільки фотоелектричні модулі можуть встановлюватися на дахах будівель, інтегруватися в локальні енергосистеми та працювати разом з акумуляторними накопичувачами й системами керування навантаженням [7].

Актуальність використання фотоелектричних систем у побутовому секторі визначається декількома чинниками. По-перше, житлові будівлі споживають значну частину кінцевої енергії, тому навіть часткове покриття побутового навантаження за рахунок власної генерації може мати помітний енергетичний ефект. По-друге, розвиток електромобілів збільшує електричне навантаження домогосподарств, що робить доцільним пошук локальних джерел енергії для заряджання. По-третє, поява систем домашнього енергоменеджменту дозволяє не лише виробляти сонячну електроенергію, але й планувати її використання з урахуванням графіка споживання, стану акумулятора та потреб електромобіля.

Загальна структура побутової фотоелектричної системи зазвичай включає сонячні панелі, інвертор, систему захисту та комутації, лічильник електроенергії, побутові навантаження, а також, за потреби, акумуляторний накопичувач. Фотоелектричні панелі перетворюють сонячну радіацію на електричну енергію постійного струму. Інвертор перетворює постійний струм у змінний, придатний для живлення побутових споживачів або передачі в електромережу. Якщо система доповнена накопичувачем, надлишкова енергія може зберігатися та використовуватися пізніше, наприклад у вечірні години або під час заряджання електромобіля.

У спрощеному вигляді енергія, яку може виробити фотоелектрична система за певний період часу, визначається площею сонячних модулів, їх ефективністю, рівнем сонячної радіації та втратами в системі. У літературі для попереднього оцінювання виробітку PV-системи використовується залежність

між площею панелей, коефіцієнтом корисної дії, сонячною радіацією та коефіцієнтом продуктивності системи [8].

$$E_{PV} = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot H \cdot PR \quad (1.5)$$

де E_{PV} – електроенергія, вироблена фотоелектричною системою за розрахунковий період, кВт·год; A_{PV} – сумарна площа фотоелектричних модулів, м²; η_{PV} – коефіцієнт корисної дії модулів; H – сонячна радіація на площину модулів за відповідний період, кВт·год/м²; PR – коефіцієнт продуктивності системи, який враховує втрати в інверторі, кабелях, через нагрівання модулів, забруднення поверхні та інші фактори.

У дослідженнях з інтелектуальним заряджанням для електромобілів використовується підхід погодинного аналізу для перетворення прогнозу сонячної іррадіації у прогноз фотоелектричної генерації, який далі застосовується як вхідний параметр алгоритму керування заряджанням [6].

Важливою особливістю фотоелектричної генерації є її нерівномірність у часі. Найбільший виробіток зазвичай припадає на денні години, тоді як максимальне побутове споживання часто спостерігається вранці та ввечері. Така невідповідність між профілем виробництва та профілем споживання створює проблему використання надлишкової сонячної енергії. Якщо в момент високої генерації електромобіль підключений до зарядного пристрою, надлишок PV-енергії може бути спрямований безпосередньо на заряджання. Якщо ж автомобіль відсутній або заряджання не заплановане, надлишкова енергія може експортуватися в мережу або накопичуватися в батареї.

У домашній енергосистемі з електромобілем доцільно розглядати не тільки загальний виробіток сонячної електростанції, а й частку цієї енергії, яка може бути використана безпосередньо в межах домогосподарства. Для задачі заряджання електромобіля окремо може бути визначена частка PV-енергії в енергозабезпеченні заряджання $k_{PV,EV}$. Саме збільшення цього показника є

одним із практичних завдань програмної підсистеми, що розробляється в даній роботі.

Фотоелектрична система в побутовому секторі може працювати за різними схемами. Найпростішою є мережева PV-система без накопичувача, у якій сонячна енергія спочатку використовується для покриття поточних навантажень будинку, а надлишок передається до мережі. Більш гнучкою є система з акумуляторним накопичувачем, яка дозволяє зберігати енергію в періоди високої генерації та використовувати її в години низької генерації або підвищеного споживання. У системі з електромобілем додатковим керованим навантаженням стає зарядний пристрій, який може змінювати час і потужність заряджання залежно від доступної сонячної енергії.

У роботах, присвячених домашнім системам енергоменеджменту, підкреслюється, що PV-система, акумулятор, побутові навантаження та електромобіль мають розглядатися як взаємопов'язані елементи єдиної системи керування. HEMS виконує функції моніторингу виробництва та споживання, оптимального розподілу енергії та планування роботи керованих споживачів [4]. У цьому контексті електромобіль може виступати як навантаження, яке не обов'язково має заряджатися одразу після підключення, а може бути заряджене у найбільш доцільний часовий інтервал.

Необхідність прогнозування сонячної генерації пов'язана з тим, що рішення про заряджання електромобіля часто потрібно приймати заздалегідь. Наприклад, користувач може задати бажаний рівень заряду батареї та час наступної поїздки, а підсистема повинна визначити, у які години доцільно заряджати електромобіль, щоб максимально використати прогнозований сонячний надлишок. У дослідженні інтелектуальної системи енергоменеджменту для smart home з PV-генерацією зазначається, що прогноз PV-потужності є важливим вхідним параметром для планування навантажень, роботи накопичувача та заряджання електромобіля [9].

При цьому ефективність використання сонячної генерації залежить не лише від потужності встановленої PV-системи, але й від узгодженості між

генерацією та споживанням. Якщо потужність системи зavelика відносно денного навантаження, значна частина енергії може бути надлишковою. Якщо ж потужність замала, власної генерації може бути недостатньо для заряджання електромобіля. Тому під час аналізу домашньої PV-системи доцільно розглядати не тільки її номінальну потужність, а й добові профілі $E_{PV}(h)$, $E_{house}(h)$ та $E_{EV}(h)$, оскільки саме їх співвідношення визначає можливість заряджання від сонячної енергії.

Узагальнену класифікацію основних варіантів використання фотоелектричної системи в домашній енергосистемі доцільно подати в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні варіанти використання фотоелектричної системи в домашній енергосистемі [4, 6, 8, 9]

| Варіант системи | Склад системи | Особливість використання для заряджання електромобіля |
|---|---|--|
| PV-система без накопичувача | PV-модулі, інвертор, будинок, мережа | Заряджання можливе переважно в години поточної сонячної генерації |
| PV-система з акумулятором | PV-модулі, інвертор, будинок, батарея, мережа | Надлишкова сонячна енергія може накопичуватися та використовуватися пізніше |
| PV-система з EV як керованим навантаженням | PV-модулі, інвертор, будинок, зарядний пристрій, EV, мережа | Час заряджання може узгоджуватися з періодами високої PV-генерації |
| PV-система з акумулятором і інтелектуальним заряджанням | PV-модулі, інвертор, будинок, батарея, EV, програмна підсистема | Найбільш гнучкий варіант: заряджання планується з урахуванням прогнозу PV, навантаження будинку та потреб EV |

Як видно з таблиці 1.1, найбільш доцільним для задачі даної роботи є варіант PV-системи з акумулятором і інтелектуальним заряджанням. У такій

конфігурації електромобіль розглядається як кероване навантаження, а програмна підсистема визначає доцільний час заряджання з урахуванням прогнозованої сонячної генерації, побутового споживання та потреби автомобіля в енергії.

У домашній енергосистемі фотоелектричні модулі перетворюють сонячну радіацію на електроенергію постійного струму, яка через інвертор подається до внутрішньої електричної шини будинку. Далі ця енергія може використовуватися для покриття побутового навантаження, заряджання електромобіля, накопичення в акумуляторній батареї або передачі до зовнішньої електромережі. Узагальнену схему такого перетворення та розподілу енергії наведено на рис. 1.2.

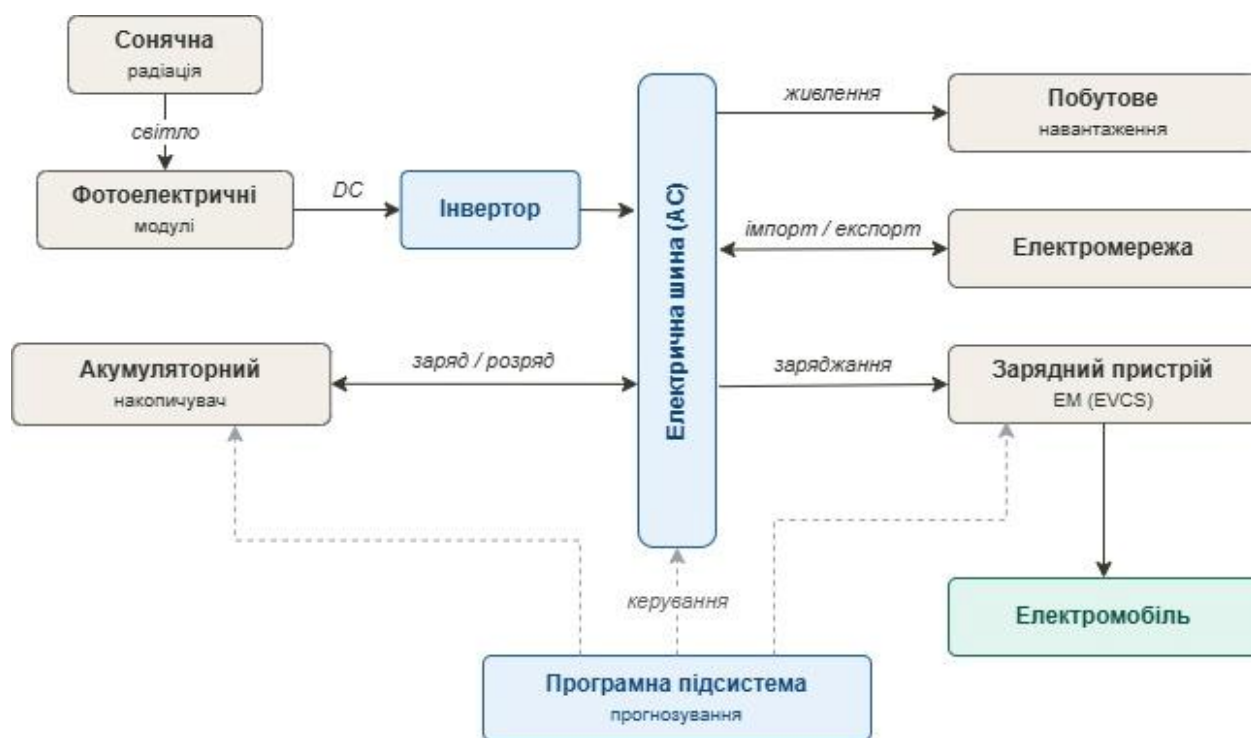


Рисунок 1.2 – Перетворення та використання енергії фотоелектричної системи в домашній енергосистемі

Як видно з рис. 1.2, електромобіль у такій системі є одним із можливих споживачів сонячної енергії. Однак, на відміну від звичайного побутового навантаження, процес його заряджання може бути частково перенесений у

часі. Це створює можливість для інтелектуального планування заряджання з урахуванням прогнозованої PV-генерації, поточного споживання будинку та стану акумуляторного накопичувача.

Таким чином, сонячна фотоелектрична система в побутовому секторі є не лише джерелом відновлюваної електроенергії, але й важливим елементом домашньої енергосистеми з електромобілем. Її ефективне використання залежить від здатності системи узгоджувати генерацію, побутове споживання, стан накопичувача та потребу електромобіля в енергії.

1.3 Особливості заряджання електромобіля в домашніх умовах

Заряджання електромобіля в домашніх умовах є одним із найбільш зручних способів поповнення енергії тягової батареї, оскільки воно може виконуватися під час тривалої стоянки автомобіля, наприклад у нічний час або в періоди перебування користувача вдома. На відміну від публічних зарядних станцій, домашнє заряджання зазвичай не потребує спеціального планування поїздки до зарядної інфраструктури, однак воно безпосередньо впливає на електричне навантаження будинку. Тому для домашньої енергосистеми важливим є не лише сам факт підключення електромобіля до зарядного пристрою, а й вибір часу, потужності та джерела енергії для заряджання.

Розвиток зарядної інфраструктури відбувається одночасно з поширенням електромобілів. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, що на понад 30 % більше порівняно з попереднім роком [1]. Водночас для власників приватних будинків або домогосподарств із власним місцем паркування домашнє заряджання залишається важливою частиною повсякденної експлуатації електромобіля, оскільки забезпечує можливість регулярного поповнення заряду без додаткових витрат часу на пошук зарядної станції.

Особливістю електромобіля як побутового споживача є відносно велика енергоємність його батареї. Якщо звичайні побутові прилади мають порівняно

короткі або циклічні режими роботи, то заряджання електромобіля може тривати декілька годин і формувати значну частку добового електроспоживання будинку. Наприклад, якщо для наступної поїздки необхідно поповнити батарею на $E_{EV,need}$, то час заряджання можна приблизно визначити як:

$$t_{ch} = \frac{E_{EV, need}}{P_{ch} \cdot \eta_{ch}} \quad (1.6)$$

де t_{ch} – тривалість заряджання, год; $E_{EV,need}$ – необхідна енергія для поповнення батареї, кВт·год; P_{ch} – потужність зарядного пристрою, кВт; η_{ch} – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання.

Необхідна енергія для заряджання може бути визначена через зміну стану заряду батареї:

$$E_{EV, need} = C_{bat} \cdot \frac{SOC_{target} - SOC_{current}}{100} \quad (1.7)$$

де C_{bat} – корисна ємність тягової батареї електромобіля, кВт·год; $SOC_{current}$ – поточний стан заряду батареї, %; SOC_{target} – бажаний стан заряду батареї, %. Ця залежність є базовою для програмної підсистеми, оскільки дозволяє оцінити, яку кількість енергії необхідно подати до електромобіля до заданого часу від'їзду.

У домашніх умовах можна виділити декілька типових режимів заряджання. Найпростішим є некероване заряджання, коли електромобіль починає заряджатися одразу після підключення до зарядного пристрою. Такий режим є зручним для користувача, але не враховує ані поточне навантаження будинку, ані вартість електроенергії, ані наявність сонячної генерації. Через це некероване заряджання може збільшувати пікове навантаження, особливо у вечірні години, коли одночасно працюють побутові прилади.

Емпіричні дослідження підтверджують, що домашнє заряджання може суттєво змінювати профіль електроспоживання. Зокрема, аналіз даних інтелектуального лічильнику приблизно 1600 домогосподарств з електромобілями показав, що в літні пікові години з 18:00 до 20:00 попит на електроенергію в середньому домогосподарстві з домашнім заряджанням може збільшуватися на 7–14 % [5]. Це означає, що навіть на рівні окремого будинку заряджання електромобіля слід розглядати як кероване навантаження, а не як звичайний неконтрольований споживач.

Більш ефективним є заряджання з урахуванням тарифів або обмежень навантаження. У цьому випадку система може переносити заряджання на нічні або інші періоди нижчої вартості електроенергії. Такий підхід зменшує витрати користувача, однак не обов'язково забезпечує максимальне використання власної сонячної генерації. Для домогосподарств із фотоелектричною системою більш доцільними є режими, у яких заряджання електромобіля узгоджується з наявним або прогнозованим сонячним надлишком.

У практичних рішеннях для домашнього заряджання виділяють, зокрема, заряджання за сонячним надлишком, заряджання на основі прогнозу сонячної генерації та заряджання з урахуванням динамічних тарифів. Заряджання за сонячним надлишком спрямовує до електромобіля ту частину PV-генерації, яка не використовується поточними навантаженнями будинку. Заряджання на основі прогнозу використовує дані про очікувану сонячну генерацію для попереднього формування графіка заряджання, а ціново-оптимізоване заряджання враховує зміну тарифів на електроенергію [3].

При цьому потужність заряджання має обмежуватися технічними характеристиками зарядного пристрою та електромобіля, і заряджання можливе лише в ті години, коли автомобіль фізично підключений до зарядного пристрою. Основні режими домашнього заряджання електромобіля можна узагальнити в таблиці 1.2.

Як видно з таблиці 1.2, найпростішим з погляду реалізації є некероване заряджання, однак воно не відповідає задачі ефективного використання власної сонячної генерації. Найбільш доцільним для домашньої енергосистеми з PV-системою є прогнозне інтелектуальне заряджання, оскільки воно дозволяє враховувати не лише поточний стан системи, але й очікувані зміни сонячної генерації та потреби користувача.

Таблиця 1.2 – Основні режими заряджання електромобіля в домашній енергосистемі [1, 3, 5, 6]

| Режим заряджання | Принцип роботи | Перевага | Обмеження |
|-------------------------------------|--|---|---|
| Некероване заряджання | Заряджання починається одразу після підключення EV | Простота використання | Може збільшувати пікове навантаження |
| Заряджання за тарифом | Заряджання переноситься на години нижчої вартості електроенергії | Зменшення витрат користувача | Не завжди збігається з періодами PV-генерації |
| Заряджання за сонячним надлишком | EV заряджається від надлишку PV-енергії після покриття навантаження будинку | Підвищення власного споживання сонячної енергії | Залежить від погоди та присутності EV вдома |
| Прогнозне інтелектуальне заряджання | Графік заряджання формується за прогнозом PV-генерації, потребою EV та обмеженнями користувача | Найбільша гнучкість планування | Потребує програмної підсистеми та вхідних даних |

Тому заряджання електромобіля краще розглядати як задачу планування керованого навантаження. Вхідними даними для такої задачі є прогноз PV-генерації, профіль побутового споживання, поточний і бажаний стан заряду електромобіля, максимальна потужність заряджання, час підключення автомобіля та бажаний час завершення заряджання. На виході підсистема повинна сформувати погодинний графік заряджання, який забезпечує необхідний рівень заряду та водночас максимально використовує доступну сонячну енергію.

Таким чином, домашнє заряджання електромобіля є важливим елементом побутової енергосистеми, який може як збільшувати навантаження на мережу, так і підвищувати ефективність використання власної сонячної генерації. Результат залежить від того, чи використовується заряджання як некерований процес, чи як кероване навантаження, інтегроване в систему енергоменеджменту. Саме тому подальший розгляд у роботі зосереджується на прогнозуванні доступної сонячної енергії та формуванні графіка заряджання електромобіля в межах домашньої енергосистеми.

1.4 Домашні системи енергоменеджменту та керування навантаженням

Домашня система енергоменеджменту є важливим елементом сучасної побутової енергосистеми, у якій поєднуються електромережа, відновлювана генерація, акумуляторний накопичувач, побутові навантаження та електромобіль. Її основне призначення полягає в моніторингу, аналізі та керуванні енергетичними потоками з метою підвищення ефективності використання локально виробленої електроенергії, зменшення пікових навантажень і забезпечення комфортних умов для користувача.

У науковій літературі домашня система енергоменеджменту, або HEMS, визначається як система оптимального керування, що контролює роботу електричного накопичувача, електромобіля, відновлюваної генерації та побутових приладів у будинку [4]. У роботі Kallio and Siroux підкреслюється,

що HEMS є одним із ключових застосувань smart grid, оскільки дозволяє споживачу не тільки отримувати електроенергію з мережі, але й виробляти, накопичувати та раціонально використовувати власну енергію. У цій же роботі наведено узагальнену архітектуру HEMS, яка включає відновлювану генерацію, накопичувачі, електромобіль, побутові навантаження, сенсори та центральну платформу керування [4].

Необхідність використання HEMS пов'язана з тим, що сучасне домогосподарство поступово перетворюється з пасивного споживача електроенергії на активного учасника енергосистеми. Якщо в традиційній схемі будинок лише споживає електроенергію з мережі, то в системі з фотоелектричними модулями, акумулятором і електромобілем виникає необхідність постійно приймати рішення: яку частину енергії використати для поточного навантаження, яку спрямувати на заряджання електромобіля, яку накопичити в батареї, а яку отримати з мережі або передати до неї.

У загальному вигляді задача керування енергетичними потоками в домашній системі може бути описана через баланс енергії, що показує, що заряджання електромобіля не можна розглядати ізольовано від інших елементів будинку. Якщо електромобіль заряджається в період високого побутового споживання, імпорт енергії з мережі може значно зрости. Якщо ж заряджання переноситься на період доступної сонячної генерації, частина потреби електромобіля може бути покрита власною PV-енергією. Саме тому електромобіль доцільно розглядати як кероване навантаження, для якого час і потужність заряджання можуть змінюватися залежно від стану домашньої енергосистеми.

Керування навантаженням у побутовому секторі пов'язане з концепцією керування попитом (demand side management). У роботі Bakare et al. зазначено, що DSM передбачає моніторинг енергоспоживання та керування графіком роботи навантажень для зменшення витрат, пікових навантажень і пов'язаних із ними негативних наслідків для енергосистеми [10]. DSM

охоплює керування попитом, попитову реакцію, розподілені енергетичні ресурси, енергоефективність і використання накопичувачів енергії [10].

У домашній енергосистемі навантаження можна умовно поділити на некеровані, частково керовані та керовані. Некеровані навантаження мають працювати тоді, коли вони потрібні користувачу, наприклад освітлення або частина побутової техніки. Частково керовані навантаження можуть мати обмежений діапазон зміщення в часі, наприклад пральна машина або посудомийна машина. Керовані навантаження можуть змінювати графік роботи без значної втрати комфорту. До таких навантажень у контексті даної роботи належить заряджання електромобіля, оскільки воно часто має заданий кінцевий термін, але не обов'язково повинно виконуватися одразу після підключення автомобіля.

Основні типи навантажень у домашній енергосистемі можна узагальнити в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Типи навантажень у домашній енергосистемі з електромобілем [4, 10, 11]

| Тип навантаження | Приклади | Особливість керування |
|--------------------------------|--|--|
| Некероване навантаження | Освітлення, холодильник, частина побутових приладів | Працює відповідно до потреб користувача |
| Частково кероване навантаження | Пральна машина, посудомийна машина, бойлер | Може бути перенесене в межах допустимого часу |
| Кероване навантаження | Заряджання електромобіля, заряджання домашньої батареї | Може плануватися за прогнозом генерації, тарифом і обмеженнями користувача |

Як видно з таблиці 1.3, заряджання електромобіля має найбільший потенціал для керування, оскільки воно може бути узгоджене з прогнозом

сонячної генерації, поточним навантаженням будинку та часом наступного використання автомобіля. Для цього HEMS або окрема програмна підсистема повинна отримувати вхідні дані про стан заряду електромобіля, доступність автомобіля для заряджання, прогноз PV-генерації та профіль побутового споживання.

У системах енергоменеджменту з відновлюваною генерацією важливо враховувати невизначеність сонячної енергії. На відміну від електроенергії з мережі, PV-генерація змінюється протягом доби та залежить від погодних умов. Тому HEMS повинна не лише фіксувати поточні значення генерації, але й використовувати прогнози дані. У роботі [9] зазначено, що прогноз PV-потужності є важливим вхідним параметром для роботи інтелектуальної домашньої системи енергоменеджменту (smart home energy management system), оскільки він використовується для планування навантажень, керування накопичувачем і заряджання електромобіля.

Для оцінювання ефективності керування навантаженням у системі з PV-генерацією можна використовувати показник власного споживання сонячної енергії. У контексті заряджання електромобіля важливим є також показник частки сонячної енергії в заряджанні.

Крім енергетичних показників, HEMS може враховувати також економічні критерії. Якщо в системі застосовуються змінні тарифи на електроенергію, то загальні витрати на енергоспоживання за період можуть бути оцінені як:

$$C_{\text{grid}} = \sum_{h=1}^n E_{\text{grid}}(h) \cdot c(h) \quad (1.8)$$

де C_{grid} – витрати на електроенергію з мережі; $E_{\text{grid}}(h)$ – імпорт електроенергії з мережі в годину h ; $c(h)$ – тариф на електроенергію в годину h ; n – кількість часових інтервалів у періоді планування. Такий підхід використовується в системах керування попитом, де графік роботи навантажень може зміщуватися для зменшення вартості електроенергії.

У контексті даної роботи домашня система енергоменеджменту розглядається як середовище, у межах якого працює підсистема прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля. Така підсистема повинна використовувати дані про прогнозовану PV-генерацію, побутове навантаження, стан заряду електромобіля, часові обмеження користувача та, за наявності, стан домашнього акумуляторного накопичувача. На основі цих даних формується графік заряджання, спрямований на підвищення частки використання власної сонячної енергії.

Таким чином, домашня система енергоменеджменту є основою для реалізації інтелектуального заряджання електромобіля в будинку з фотоелектричною генерацією. Вона дозволяє поєднати дані про генерацію, споживання, накопичення енергії та потреби користувача в єдину систему прийняття рішень. Для теми даної роботи це означає, що підсистема прогнозування доступної сонячної енергії повинна розглядатися як функціональний модуль HEMS, спрямований на раціональне планування заряджання електромобіля.

1.5 Методи прогнозування сонячної генерації для задач енергоменеджменту

Прогнозування сонячної генерації є важливою складовою роботи домашньої енергосистеми з фотоелектричною установкою, оскільки виробіток PV-системи має змінний і частково випадковий характер. На відміну від електроенергії, що надходить із зовнішньої мережі, сонячна енергія залежить від часу доби, сезону, хмарності, температури повітря, орієнтації та нахилу панелей, а також від технічних параметрів самої фотоелектричної системи. Тому для ефективного планування заряджання електромобіля важливо не тільки вимірювати поточну PV-генерацію, але й оцінювати її очікувані значення на декілька годин наперед.

У задачах домашнього енергоменеджменту прогноз сонячної генерації використовується як вхідний параметр для прийняття рішень щодо розподілу енергії між побутовими навантаженнями, акумуляторним накопичувачем, зарядним пристроєм електромобіля та електромережею. У роботі [9] підкреслюється, що інтелектуальна HEMS може використовувати прогноз PV-генерації, прогноз стану накопичувача, динамічні тарифи та графіки навантаження для формування більш обґрунтованих рішень щодо енергоспоживання будинку. У цій роботі також зазначено, що прогноз PV-потужності є функцією сонячної радіації та температури, а метеорологічні дані можуть надходити з погодних API-сервісів.

У загальному вигляді прогнозування PV-генерації може виконуватися за двома основними підходами. Перший підхід полягає у прогнозуванні сонячної іррадіації з подальшим перерахунком її у потужність фотоелектричної системи. Другий підхід передбачає безпосереднє прогнозування вихідної потужності PV-системи на основі історичних даних генерації, погодних параметрів або їх поєднання. Для задачі планування заряджання електромобіля обидва підходи можуть бути корисними, однак важливими є не лише точність, а й простота реалізації, швидкість розрахунку та доступність вхідних даних.

У роботі [6] розглянуто пряме прогнозування сонячної іррадіації для схеми інтелектуального заряджання електромобіля вдома. Автори зазначають, що точний прогноз PV-генерації та інтелектуальне заряджання є важливими чинниками для покращення взаємодії між PV-системою та заряджанням електромобіля. У цій роботі використано deterministic direct forecast для прогнозування сонячної іррадіації на горизонті від 1 до 24 годин, після чого прогноз іррадіації перетворювався у прогноз PV-генерації та використовувався як вхідний параметр для алгоритму заряджання електромобіля.

Прямий прогноз відрізняється від покрокового підходу тим, що модель окремо оцінює зв'язок між поточним моментом прогнозування та конкретним

горизонтом прогнозу. Наприклад, для прогнозу на 1 годину вперед, 6 годин вперед або 24 години вперед можуть використовуватися окремі залежності. Такий підхід є зручним для задачі заряджання електромобіля, оскільки період планування зазвичай поділяється на часові інтервали, для кожного з яких потрібно оцінити очікувану доступну сонячну енергію.

У літературі також використовуються інші методи прогнозування PV-генерації. Зокрема, для задач інтелектуального заряджання застосовувалися моделі ARIMA [6], радіально-базисні нейронні мережі, підходи з використанням історичних даних, погодних даних і супутникової інформації. У роботі [6] наведено огляд таких підходів у контексті заряджання електромобілів: ARIMA застосовувалася для прогнозування PV-генерації у схемі заряджання на робочому місці, RBF-NN – для прогнозування PV-генерації в домашній системі з метою мінімізації вартості, а короткострокове прогнозування PV-генерації використовувалося для оптимального заряджання парку електромобілів.

Основні підходи до прогнозування сонячної генерації для задач домашнього енергоменеджменту можна узагальнити в таблиці 1.4.

Для побутових систем важливо враховувати горизонт прогнозування. Короткостроковий прогноз на 1–3 години вперед може бути корисним для оперативного керування потужністю заряджання, тоді як прогноз на 12–24 години вперед потрібний для попереднього планування заряджання електромобіля до заданого часу від'їзду. У роботі [6] показано, що зі збільшенням горизонту прогнозування точність зазвичай знижується: прогноз на 1 годину вперед був ближчим до ідеального прогнозу, тоді як прогноз на 24 години вперед наближався до persistence forecast. Це є важливим для практичного використання, оскільки система планування заряджання повинна враховувати невизначеність прогнозу.

У роботі [9] для оцінювання точності прогнозної моделі PV-генерації в інтелектуальній HEMS використовувалися саме показники RMSE та MAPE. Отримані авторами значення похибок становили 13,45-23,16 % для RMSE та

4,06-11,27 % для MAPE, що дозволило зробити висновок про придатність запропонованої моделі для задач прогнозування PV-виробітку в системі енергоменеджменту.

Таблиця 1.4 – Підходи до прогнозування сонячної генерації в домашніх енергосистемах [6, 9]

| Підхід | Вхідні дані | Особливість застосування |
|-------------------------------|--|--|
| Прогноз за історичними даними | Попередні значення PV-генерації або іррадіації | Простий для реалізації, але менш точний за різких змін погоди |
| Інерційний прогноз | Значення попереднього дня або попереднього інтервалу | Використовується як базовий підхід для порівняння точності |
| Пряме прогнозування | Історичні дані та окремий горизонт прогнозу | Дає змогу окремо прогнозувати PV-генерацію на 1–24 години вперед |
| Прогноз за погодними даними | Іррадіація, хмарність, температура, швидкість вітру | Враховує метеорологічні умови, придатний для добового планування |
| Методи машинного навчання | Історичні дані, погода, календарні ознаки | Дозволяють враховувати складні нелінійні залежності, але потребують навчальних даних |

Крім абсолютної похибки прогнозу, для порівняння різних методів може застосовуватися показник “forecast skill”, який оцінює, наскільки запропонований метод кращий за базовий прогноз. У роботі [6] як базовий варіант використовувався persistence forecast, а показник skill визначався на основі RMSE. Якщо значення forecast skill більше нуля, запропонований метод є кращим за базовий прогноз; якщо дорівнює одиниці, прогноз відповідає ідеальному випадку.

У контексті домашніх енергосистем важливим є визначення обсягу сонячної енергії, який може бути використаний для заряджання електромобіля

без збільшення навантаження на електричну мережу. Для цього необхідно враховувати співвідношення між прогнозованою генерацією фотоелектричної системи, побутовим споживанням, часовими параметрами використання електромобіля та можливістю застосування накопичувача енергії.

Особливість задачі полягає в тому, що для користувача важлива не лише точність прогнозу PV-генерації, а й практичний результат у вигляді зручного графіка заряджання. Навіть прогноз із певною похибкою може бути корисним, якщо він дозволяє перенести заряджання на години очікуваної високої сонячної генерації та зменшити імпорт електроенергії з мережі. У роботі [6] показано, що інтелектуальне заряджання з прямим прогнозом і погодинним оновленням оптимізації працював краще, ніж схема з persistence forecast, і досягав до 89 % показника власного споживання порівняно зі схемою з ідеальним прогнозом.

Таким чином, прогнозування сонячної генерації є необхідною умовою ефективного планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі. Доцільним є використання відносно простого та зрозумілого підходу, який спирається на погодинні значення прогнозованої PV-генерації та побутового навантаження. Це дозволяє перейти від загального аналізу методів прогнозування до практичної задачі: визначення сонячного надлишку та формування графіка заряджання електромобіля, що буде детально розглянуто в розділі 2.

1.6 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показує, що поєднання фотоелектричної генерації, домашнього енергоспоживання та заряджання електромобіля формує новий тип побутової енергосистеми, у якій важливим стає не лише виробництво електроенергії, але й її раціональний розподіл у часі. Електромобіль у такій системі виступає як значне, але потенційно кероване навантаження. Це означає, що процес заряджання може бути перенесений на більш доцільний

часовий інтервал, якщо при цьому зберігається вимога користувача щодо необхідного рівня заряду батареї до моменту наступної поїздки.

У роботах, присвячених домашнім системам енергоменеджменту, зазначається, що HEMS забезпечує моніторинг і керування потоками енергії між відновлюваною генерацією, накопичувачем, електромобілем і побутовими навантаженнями [4]. Такі системи є складовою smart grid, оскільки дають змогу домогосподарству не тільки споживати енергію з мережі, але й виробляти, накопичувати та оптимально використовувати власну електроенергію.

Разом із тим, ефективність використання фотоелектричної системи залежить від того, наскільки добре узгоджені в часі генерація та споживання. Сонячна генерація змінюється протягом доби та залежить від погодних умов, тому без прогнозування її доступної величини планування заряджання електромобіля може бути неефективним. У дослідженнях інтелектуального заряджання підкреслюється, що прогноз PV-генерації є важливим вхідним параметром для підвищення власного споживання сонячної енергії та зменшення коливань сумарного навантаження будинку [8].

Отже, виникає задача створення програмної підсистеми, яка на основі вхідних даних про прогнозовану сонячну генерацію, побутове споживання та параметри електромобіля визначає доступну сонячну енергію і формує графік заряджання. Така підсистема повинна працювати як інформаційно-керуючий модуль домашньої енергосистеми та підтримувати прийняття рішення щодо того, коли доцільно заряджати електромобіль: одразу після підключення, у години прогнозованого сонячного надлишку або з частковим використанням електроенергії з мережі.

У межах даної роботи розглядається домашня енергосистема, до складу якої входять фотоелектрична система, побутове навантаження, електромережа, зарядний пристрій електромобіля, електромобіль і, за потреби, акумуляторний накопичувач. Основна увага приділяється саме програмній

підсистемі прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля.

Основними функціями розроблюваної підсистеми є:

- обробка вхідних даних про PV-генерацію, побутове навантаження, електромобіль і зарядний пристрій;
- визначення потреби електромобіля в енергії;
- розрахунок доступного сонячного надлишку для заряджання;
- формування рекомендованого графіка заряджання з урахуванням прогнозу PV-генерації та часових обмежень користувача;
- оцінювання частки сонячної енергії в заряджанні та необхідного імпорту електроенергії з мережі;
- подання результатів розрахунку у зручній для користувача формі.

Таким чином, задача дослідження полягає у розробці алгоритмічного та програмного забезпечення для прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі. Результатом роботи має стати програмна підсистема, яка дозволяє на основі підготовлених або розрахункових даних про PV-генерацію, побутове навантаження та параметри електромобіля визначати доцільні часові інтервали заряджання, оцінювати частку використання власної сонячної енергії та обсяг електроенергії, необхідний для імпорту з мережі.

Об'єктом дослідження є процес заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією. Предметом дослідження є методи та алгоритми прогнозування доступної сонячної енергії і планування заряджання електромобіля з урахуванням побутового навантаження, параметрів фотоелектричної системи, стану заряду батареї електромобіля та часових обмежень користувача.

Метою розробки підсистеми є формування такого графіка заряджання електромобіля, який дозволяє максимально використати доступну сонячну енергію та зменшити потребу в імпорті електроенергії з мережі за умови досягнення необхідного рівня заряду батареї до заданого користувачем часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити склад і структуру домашньої енергосистеми з фотоелектричною генерацією та електромобілем;
- проаналізувати вхідні дані, необхідні для прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання;
- сформулювати підхід до визначення сонячного надлишку після покриття побутового навантаження;
- розробити алгоритм вибору часових інтервалів заряджання електромобіля;
- врахувати поточний і бажаний стан заряду батареї електромобіля, максимальну потужність заряджання та часові обмеження користувача;
- реалізувати програмну підсистему для обробки вхідних даних і формування рекомендованого графіка заряджання;
- оцінити роботу підсистеми за показниками використання сонячної енергії та зменшення імпорту електроенергії з мережі;
- провести розрахунки стосовно охорони праці.

Вхідними даними для розроблюваної підсистеми є прогноз або розрахунковий профіль PV-генерації, профіль побутового споживання, параметри зарядного пристрою, поточний стан заряду батареї електромобіля, бажаний рівень заряду, доступний часовий інтервал заряджання та, за наявності, параметри домашнього акумуляторного накопичувача. Вихідними даними є погодинний графік заряджання електромобіля, очікувана частка сонячної енергії в заряджанні та обсяг енергії, який необхідно отримати з мережі.

З практичної точки зору така підсистема може бути використана власником будинку з фотоелектричною системою та електромобілем для планування заряджання відповідно до прогнозованої генерації. На відміну від простого некерованого заряджання, запропонований підхід дозволяє враховувати змінність сонячної енергії, побутове навантаження та вимоги користувача до готовності автомобіля. У подальших розділах роботи буде

розглянуто математичну модель визначення доступної сонячної енергії, алгоритм планування заряджання та програмну реалізацію підсистеми.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто передумови створення підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі. Показано, що зростання кількості електромобілів і поширення домашнього заряджання підвищують вимоги до керування побутовим електроспоживанням.

Проаналізовано роль фотоелектричних систем у побутовому секторі. Встановлено, що PV-система може частково покривати навантаження будинку та використовуватися для заряджання електромобіля, однак через змінний характер сонячної генерації необхідним є її прогнозування.

Розглянуто основні режими домашнього заряджання електромобіля та показано, що найбільш доцільним для системи з PV-генерацією є інтелектуальне заряджання. Такий підхід дозволяє розглядати електромобіль як кероване навантаження, графік якого може формуватися з урахуванням прогнозу сонячної енергії, побутового споживання та часових обмежень користувача.

Визначено, що розроблювана підсистема має виконувати функції обробки вхідних даних, розрахунку доступного сонячного надлишку, визначення потреби електромобіля в енергії та формування рекомендованого графіка заряджання.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОСТУПНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

2.1 Постановка задачі моделювання домашньої енергосистеми

У другому розділі розглядається математична основа побудови підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля. Об'єктом моделювання є домашня енергосистема з фотоелектричною генерацією, побутовим навантаженням, електромобілем, зарядним пристроєм, електромережею та, за потреби, акумуляторним накопичувачем. Загальна структура системи наведена на рис. 1.1, а перетворення та розподіл енергії PV-системи – на рис. 1.2. У межах цієї роботи електромобіль розглядається як кероване навантаження, оскільки заряджання не обов'язково має починатися одразу після підключення автомобіля, а може бути перенесене на період більшої доступності сонячної енергії.

Вибір такої постановки задачі обґрунтовується тим, що домашні системи енергоменеджменту забезпечують узгоджене керування фотоелектричною генерацією, накопичувачами, побутовими навантаженнями та електромобілем [4]. Крім того, для інтелектуального заряджання електромобіля важливим є використання прогнозу сонячної генерації, оскільки це дозволяє підвищити частку власного споживання PV-енергії та зменшити імпорт електроенергії з мережі [6]. Тому в роботі обрано підхід, за якого спочатку визначається доступний сонячний надлишок, а потім на його основі формується графік заряджання електромобіля.

Моделювання виконується в дискретному часі. Розрахунковий період поділяється на окремі часові інтервали однакової тривалості. Для побутових енергосистем доцільним є погодинний крок розрахунку, оскільки профілі PV-генерації, споживання будинку та заряджання електромобіля зручно подавати у вигляді погодинних значень. Такий підхід також відповідає задачам

короткострокового прогнозування сонячної генерації, де прогноз може формуватися на горизонті від кількох годин до однієї доби [6].

Розрахунковий період подається у вигляді множини часових інтервалів $H = \{1, 2, \dots, n\}$, де H – множина часових інтервалів моделювання; n – кількість інтервалів у розрахунковому періоді. Якщо моделювання виконується для однієї доби з погодинним кроком, то $n = 24$, а тривалість одного інтервалу становить $\Delta t = 1$ год.

Для кожного інтервалу $h \in H$ розглядаються такі основні енергетичні величини: прогнозована енергія фотоелектричної системи $E_{PV}(h)$, побутове споживання $E_{house}(h)$, енергія заряджання електромобіля $E_{EV}(h)$, енергія, що імпортується з мережі $E_{grid}(h)$, енергія заряджання домашнього накопичувача $E_{bat,ch}(h)$ та енергія, що віддається накопичувачем $E_{bat,dis}(h)$. На основі цих величин для кожного часового інтервалу може бути записаний енергетичний баланс домашньої системи:

$$E_{PV}(h) + E_{grid}(h) + E_{bat,dis}(h) = E_{house}(h) + E_{EV}(h) + E_{bat,ch}(h). \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) відображає рівність між джерелами енергії та напрямками її використання в межах домашньої енергосистеми. У лівій частині рівняння наведено енергію, яка надходить від фотоелектричної системи, електромережі та акумуляторного накопичувача. У правій частині враховано енергію, що споживається побутовими навантаженнями, використовується для заряджання електромобіля або спрямовується на заряджання домашньої батареї.

У межах даної роботи баланс використовується як основа для визначення доступної сонячної енергії. Якщо прогнозована PV-генерація перевищує поточне або прогнозоване побутове споживання, утворюється сонячний надлишок, який може бути використаний для заряджання електромобіля або накопичення в батареї. Якщо ж сонячної генерації недостатньо, нестача покривається за рахунок електромережі або попередньо накопиченої енергії.

Ключовою величиною для планування заряджання є доступний сонячний надлишок $E_{\text{surplus}}(h)$, визначений у формулі (1.2). Він показує, яка частина прогнозованої PV-генерації залишається після покриття побутового навантаження та може бути використана для заряджання електромобіля або накопичення в батареї. Саме ця величина є основним розрахунковим параметром для формування графіка заряджання.

Задача планування полягає у визначенні погодинного графіка заряджання $P_{\text{EV}}(h)$ для всіх $h \in H$. Цей графік повинен забезпечити досягнення бажаного рівня заряду батареї до заданого користувачем часу завершення заряджання та водночас максимально використати доступну сонячну енергію.

У загальному вигляді мета моделювання може бути сформульована як зменшення частки електроенергії, що надходить із зовнішньої мережі $E_{\text{grid,EV}}$ для заряджання електромобіля.

Однак задача не може зводитися лише до мінімізації імпорту електроенергії з мережі, оскільки користувач має практичну вимогу – отримати необхідний рівень заряду батареї до моменту наступної поїздки. Тому під час планування необхідно забезпечити виконання умови достатності заряджання:

$$\sum_{h \in H_{\text{avail}}} P_{\text{EV}}(h) \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}} \geq E_{\text{EV, need}} \quad (2.2)$$

де H_{avail} – множина часових інтервалів, у яких електромобіль підключений до зарядного пристрою; η_{ch} – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання; $E_{\text{EV, need}}$ – енергія, необхідна для досягнення заданого рівня заряду батареї. Розрахунок $E_{\text{EV, need}}$ виконується на основі поточного та бажаного стану заряду електромобіля, як було показано у формулі (1.7), і детальніше розглядається в підрозділі 2.4.

Таким чином, модель повинна одночасно враховувати два аспекти. Перший аспект є енергетичним і пов'язаний із визначенням доступної

сонячної енергії після покриття побутового навантаження. Другий аспект є алгоритмічним і полягає у виборі таких часових інтервалів заряджання, які дозволяють максимально використати сонячний надлишок та забезпечити необхідний рівень заряду електромобіля до встановленого часу.

Для даної роботи обрано детермінований розрахунковий підхід на основі погодинних профілів. Його перевага полягає в простоті реалізації, прозорості розрахунків і можливості використання підготовлених вхідних даних без необхідності навчання складних прогнозних моделей. Більш складні методи, зокрема моделі машинного навчання або стохастична оптимізація, можуть забезпечувати вищу точність за наявності великого масиву даних, однак для поставленої задачі доцільним є простий алгоритмічний підхід, який дозволяє наочно показати зв'язок між PV-генерацією, навантаженням будинку та заряджанням електромобіля. Узагальнену постановку задачі моделювання доцільно подано на рис. 2.1.

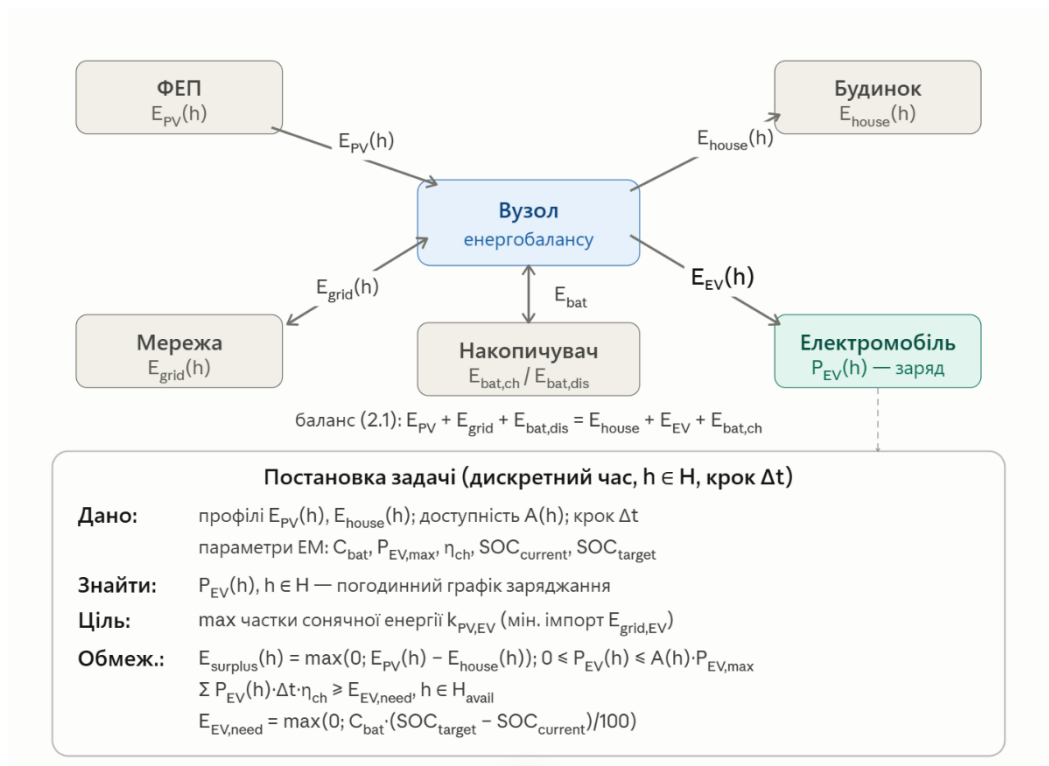


Рисунок 2.1 – Узагальнена постановка задачі моделювання домашньої енергосистеми для планування заряджання електромобіля

Як видно з рис. 2.1, підсистема працює з двома основними групами вхідних даних: енергетичними та користувацькими. До енергетичних даних належать прогноз PV-генерації та профіль побутового навантаження. До користувацьких і технічних даних належать параметри електромобіля, поточний і бажаний стан заряду, максимальна потужність зарядного пристрою та час доступності автомобіля. На основі цих даних формується графік заряджання, який надалі оцінюється за показниками використання сонячної енергії та імпорту електроенергії з мережі.

Отже, у даній роботі задача моделювання домашньої енергосистеми формулюється як задача визначення доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля в дискретному часі. Така постановка дозволяє перейти від загальної структури системи до конкретних вхідних параметрів, математичних залежностей і алгоритму, які розглядаються в наступних підрозділах.

2.2 Вхідні дані та параметри моделі

Для побудови моделі прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля необхідно визначити набір вхідних даних, які описують роботу домашньої енергосистеми в кожному часовому інтервалі. Як було показано в розділі 1, ефективність заряджання електромобіля в системі з фотоелектричною генерацією залежить від співвідношення між PV-генерацією, побутовим навантаженням, потребою електромобіля в енергії та часом його доступності для заряджання. Тому модель повинна враховувати як енергетичні параметри системи, так і параметри, пов'язані з експлуатацією електромобіля.

Вибір саме таких вхідних даних обґрунтовується структурою домашньої енергосистеми, наведеною на рис. 1.1, та логікою розподілу енергії фотоелектричної системи, показаною на рис. 1.2. Крім того, у роботах з домашнього енергоменеджменту зазначається, що HEMS повинна отримувати дані про генерацію, навантаження, накопичувачі та електромобіль для

формування обґрунтованих керуючих рішень [4]. Для задач інтелектуального заряджання електромобіля окремо підкреслюється важливість прогнозу PV-генерації, оскільки саме він дозволяє заздалегідь визначити періоди, у які заряджання може бути виконане з переважним використанням сонячної енергії [6].

У межах даної роботи основними вхідними даними є погодинні профілі PV-генерації та побутового споживання. Погодинні профілі PV-генерації $E_{PV}(h)$ та побутового споживання $E_{house}(h)$ задаються для всіх часових інтервалів $h \in H$. Таке подання даних у вигляді погодинних профілів є зручним для програмної реалізації, оскільки кожному часовому інтервалу відповідає окреме значення генерації та споживання. Це дозволяє для кожної години визначати, чи існує сонячний надлишок, і чи може він бути використаний для заряджання електромобіля.

Для опису електромобіля в моделі використовуються технічні та експлуатаційні параметри. До технічних параметрів належать корисна ємність тягової батареї C_{bat} , максимальна потужність заряджання $P_{EV,max}$ та коефіцієнт корисної дії заряджання η_{ch} . До експлуатаційних параметрів належать поточний стан заряду батареї $SOC_{current}$, бажаний стан заряду SOC_{target} , час підключення електромобіля до зарядного пристрою та бажаний час завершення заряджання.

Для врахування факту фізичної доступності електромобіля вводиться бінарна змінна:

$$A(h) = \begin{cases} 1, & \text{якщо EV підключений до зарядного пристрою в інтервалі } h \\ 0, & \text{якщо EV не підключений у цьому інтервалі} \end{cases} \quad (2.3)$$

На основі цієї змінної формується множина доступних для заряджання часових інтервалів:

$$H_{\text{avail}} = \{h \in H \mid A(h) = 1\}. \quad (2.4)$$

Введення змінної $A(h)$ є важливим, оскільки навіть за наявності високої сонячної генерації заряджання електромобіля неможливе, якщо автомобіль фізично не підключений до зарядного пристрою. Тому модель повинна одночасно враховувати енергетичну доступність сонячного надлишку та часову доступність електромобіля.

Якщо в домашній енергосистемі передбачено акумуляторний накопичувач, до моделі також вводяться його параметри: ємність батареї C_{home} , поточний стан заряду $SOC_{\text{home}}(h)$, максимально допустима потужність заряджання та розряджання, а також коефіцієнти ефективності. У межах базової моделі акумулятор розглядається як додатковий буфер, який може накопичувати надлишкову PV-енергію та використовувати її пізніше, наприклад у вечірні години, коли електромобіль доступний для заряджання, але сонячна генерація вже зменшилася.

Основні вхідні дані та параметри моделі наведено в таблиці 2.1.

Вхідні дані в таблиці 2.1 можна умовно поділити на три групи. Перша група – енергетичні дані, які описують генерацію та споживання в будинку. До неї належать $E_{\text{PV}}(h)$ і $E_{\text{house}}(h)$. Саме їх співвідношення визначає доступний сонячний надлишок. Друга група – параметри електромобіля та зарядного пристрою, які визначають потребу в енергії та технічні межі заряджання. Третя група – часові та експлуатаційні параметри, які визначають, коли електромобіль може бути заряджений і до якого моменту має бути досягнутий бажаний рівень заряду.

Для програмної підсистеми важливо, щоб усі вхідні дані були приведені до одного часового кроку. Якщо PV-генерація, побутове споживання або дані про доступність електромобіля мають різну дискретність, вони повинні бути попередньо перетворені до єдиного інтервалу Δt . У даній роботі як базовий приймається погодинний крок, що дозволяє зручно зіставляти генерацію, споживання та заряджання в межах однієї доби.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані та параметри моделі планування заряджання електромобіля

| Група даних | Позначення | Опис | Одиниця вимірювання |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------|
| Прогноз PV-генерації | $E_{PV}(h)$ | Енергія, вироблена фотоелектричною системою в інтервалі h | кВт·год |
| Побутове навантаження | $E_{house}(h)$ | Енергоспоживання будинку в інтервалі (h) | кВт·год |
| Доступність електромобіля | $A(h)$ | Ознака підключення електромобіля до зарядного пристрою | 0 або 1 |
| Ємність батареї EV | C_{bat} | Корисна ємність тягової батареї електромобіля | кВт·год |
| Поточний заряд EV | $SOC_{current}$, SOC_{target} | Поточний і бажаний стан заряду батареї електромобіля | % |
| Максимальна потужність заряджання | $P_{EV,max}$ | Гранична потужність зарядного пристрою або електромобіля | кВт |
| Часовий крок | Δt | Тривалість одного розрахункового інтервалу | год |

З урахуванням наведених вхідних даних задача моделювання може бути сформульована як перетворення початкових профілів $E_{PV}(h)$, $E_{house}(h)$, параметрів електромобіля та часових обмежень у вихідний графік заряджання $P_{EV}(h)$. При цьому графік заряджання має відповідати технічним обмеженням зарядного пристрою, враховувати доступність автомобіля та забезпечувати пріоритетне використання власної сонячної енергії.

2.3 Модель визначення доступного сонячного надлишку

Основним енергетичним параметром, який використовується для планування заряджання електромобіля, є доступний сонячний надлишок. У

межах даної роботи під сонячним надлишком розуміється частина прогнозованої енергії фотоелектричної системи, яка залишається після покриття поточного або прогнозованого побутового навантаження будинку. Саме ця енергія може бути використана для заряджання електромобіля без додаткового імпорту електроенергії з мережі.

Вибір моделі на основі сонячного надлишку обґрунтовується тим, що в домашній енергосистемі фотоелектрична генерація спочатку має забезпечувати поточні потреби будинку, а вже після цього може спрямовуватися на інші цілі: заряджання електромобіля, заряджання домашнього акумулятора або передачу енергії до мережі. Такий підхід відповідає логіці домашніх систем енергоменеджменту, у яких PV-система, побутове навантаження, накопичувач і електромобіль розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної системи керування [4, 9].

Для кожного часового інтервалу h відомими або прогнозованими є два основні енергетичні профілі: $E_{PV}(h)$ – енергія, вироблена фотоелектричною системою, та $E_{house}(h)$ – енергія, спожита побутовими навантаженнями. Якщо $E_{PV}(h) > E_{house}(h)$, у системі виникає надлишок сонячної енергії. Якщо ж $E_{PV}(h) \leq E_{house}(h)$, уся сонячна енергія використовується для покриття навантаження будинку, а додаткова енергія має надходити з мережі або з акумуляторного накопичувача.

Доступний сонячний надлишок визначається за формулою:

$$E_{surplus}(h) = \max(0; E_{PV}(h) - E_{house}(h)), \quad (2.5)$$

де $E_{surplus}(h)$ – доступна надлишкова сонячна енергія в часовому інтервалі h , кВт·год; $E_{PV}(h)$ – прогнозована енергія фотоелектричної системи, кВт·год; $E_{house}(h)$ – побутове споживання будинку, кВт·год.

Формула (2.5) є базовою для подальшого планування заряджання, оскільки вона дозволяє визначити, у які години сонячна генерація перевищує споживання будинку. Використання функції $\max(0; \dots)$ потрібне для того,

щоб уникнути від'ємних значень надлишку. Якщо фотоелектрична генерація менша за побутове навантаження, доступний сонячний надлишок приймається рівним нулю. Якщо PV-генерація є меншою за побутове навантаження, у відповідному інтервалі сонячний надлишок відсутній, а нестача енергії покривається мережею або накопичувачем.

Для задачі планування заряджання важливо враховувати не лише факт наявності сонячного надлишку, але й можливість його використання саме електромобілем. Навіть якщо $E_{\text{surplus}}(h) > 0$, заряджання можливе лише тоді, коли електромобіль підключений до зарядного пристрою. Тому доступний для електромобіля сонячний надлишок можна визначити з урахуванням змінної доступності $A(h)$, введеної у формулі (2.3):

$$E_{\text{surplus, EV}}(h) = A(h) \cdot E_{\text{surplus}}(h). \quad (2.6)$$

де $E_{\text{surplus, EV}}(h)$ – частина сонячного надлишку, яка може бути використана для заряджання електромобіля в інтервалі h , кВт·год; $A(h)$ – бінарна змінна доступності електромобіля. Якщо $A(h) = 1$, електромобіль підключений і може використовувати сонячний надлишок. Якщо $A(h) = 0$, заряджання в цьому інтервалі неможливе, навіть якщо сонячний надлишок існує.

Крім доступності електромобіля, необхідно враховувати технічне обмеження зарядного пристрою. Максимальна кількість енергії, яку можна передати до електромобіля за один часовий інтервал, визначається максимальною потужністю заряджання:

$$E_{\text{EV, max}}(h) = P_{\text{EV, max}} \cdot \Delta t, \quad (2.7)$$

де $E_{EV,max}(h)$ – максимально можлива енергія заряджання в інтервалі h , кВт·год; $P_{EV,max}$ – максимально допустима потужність заряджання, кВт; Δt – тривалість одного розрахункового інтервалу, год.

Тоді максимальна кількість сонячної енергії, яка може бути фактично використана для заряджання електромобіля в інтервалі h , визначається як:

$$E_{PV,EV}^{max}(h) = \min(E_{surplus, EV}(h); E_{EV,max}(h)). \quad (2.8)$$

Формула (2.8) показує, що фактичне використання сонячної енергії для заряджання обмежується двома чинниками: обсягом доступного сонячного надлишку та максимальною енергією, яку зарядний пристрій може передати до батареї електромобіля за один часовий інтервал. Якщо сонячного надлишку більше, ніж може прийняти зарядний пристрій, частина енергії може бути спрямована до домашнього накопичувача або передана в мережу. Якщо ж сонячного надлишку менше, ніж допустима потужність заряджання, заряджання може виконуватися лише на рівні доступної сонячної енергії або доповнюватися енергією з мережі.

За наявності домашнього акумуляторного накопичувача невикористаний сонячний надлишок може бути збережений і використаний пізніше. У даній роботі акумулятор розглядається як додатковий сценарій, тоді як основна модель зосереджується на використанні прямого сонячного надлишку для заряджання електромобіля.

У межах розроблюваної підсистеми модель сонячного надлишку використовується як основа для вибору часових інтервалів заряджання. Інтервали з найбільшим значенням $E_{surplus, EV}(h)$ є найбільш доцільними для заряджання, оскільки в них електромобіль може отримати більшу частину енергії від власної фотоелектричної системи. Якщо таких інтервалів недостатньо для повного заряджання до заданого рівня, підсистема може доповнити графік заряджання інтервалами з меншим сонячним надлишком або передбачити частковий імпорт електроенергії з мережі.

Таким чином, модель визначення доступного сонячного надлишку є центральним елементом підсистеми планування заряджання. Вона поєднує прогноз PV-генерації, профіль побутового споживання, доступність електромобіля та технічні обмеження зарядного пристрою. Обраний підхід є достатньо простим для програмної реалізації, але водночас дозволяє врахувати головну особливість домашньої енергосистеми з PV-генерацією – нерівномірність у часі між виробництвом сонячної енергії, споживанням будинку та потребою електромобіля в заряджанні.

2.4 Розрахунок потреби електромобіля в енергії

Після визначення доступного сонячного надлишку необхідно оцінити, яку кількість енергії потрібно передати до батареї електромобіля. Цей етап є важливим для планування заряджання, оскільки графік заряджання має формуватися не лише за наявності сонячної енергії, але й за фактичною потребою електромобіля в енергії. Якщо така потреба не визначена, підсистема не може оцінити тривалість заряджання, достатність доступного сонячного надлишку та необхідність використання електроенергії з мережі.

У межах даної роботи потреба електромобіля в енергії визначається через різницю між поточним і бажаним станом заряду тягової батареї. Такий підхід обрано тому, що стан заряду батареї SOC є зрозумілим для користувача параметром і широко використовується в системах моніторингу електромобілів. Крім того, саме бажаний рівень SOC_{target} і час наступної поїздки є основними обмеженнями з боку користувача під час планування заряджання.

Необхідна енергія для заряджання електромобіля визначається за логікою, що якщо $SOC_{target} > SOC_{current}$, електромобіль потребує додаткового заряджання, а якщо ж $SOC_{target} \leq SOC_{current}$, потреба в заряджанні відсутня, і значення $E_{EV,need}$ може бути прийняте рівним нулю. Тому використовується наступна формула:

$$E_{EV, need} = \max \left(0; C_{bat} \cdot \frac{SOC_{target} - SOC_{current}}{100} \right). \quad (2.9)$$

де $E_{EV, need}$ – енергія, яку необхідно подати до батареї електромобіля, кВт·год; C_{bat} – корисна ємність тягової батареї електромобіля, кВт·год; $SOC_{current}$ – поточний стан заряду батареї, %; SOC_{target} – бажаний стан заряду батареї, %.

Після визначення необхідної енергії розраховується мінімальний час заряджання за умови роботи зарядного пристрою на максимальній потужності. Цей показник дає змогу оцінити, чи достатньо часу залишається до моменту від'їзду користувача:

$$t_{ch, min} = \frac{E_{EV, need}}{P_{EV, max} \cdot \eta_{ch}}, \quad (2.10)$$

де $t_{ch, min}$ – мінімальна тривалість заряджання, год; $P_{EV, max}$ – максимальна потужність заряджання, кВт; η_{ch} – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання.

Формула (2.10) показує, що мінімальний час заряджання залежить не лише від потреби електромобіля в енергії, але й від технічних можливостей зарядного пристрою. Наприклад, за однакової потреби в енергії зарядний пристрій більшої потужності дозволяє швидше досягти бажаного стану заряду. Водночас у задачі використання сонячної енергії найшвидше заряджання не завжди є найкращим, оскільки заряджання на максимальній потужності може потребувати імпорту електроенергії з мережі, якщо сонячний надлишок у цей момент є недостатнім.

Для планування заряджання важливо також визначити часовий інтервал, у межах якого автомобіль доступний для заряджання. Якщо t_{start} – час підключення електромобіля до зарядного пристрою, а t_{dep} – бажаний час від'їзду, то доступна тривалість заряджання визначається як $t_{avail} = t_{dep} - t_{start}$, де t_{avail} – загальний час доступності електромобіля для заряджання, год.

Якщо виконується умова $t_{ch,min} \leq t_{avail}$, то технічно можливо зарядити електромобіль до бажаного рівня у доступний проміжок часу. Якщо ця умова не виконується, підсистема повинна показати, що досягнення заданого рівня заряду до часу від'їзду є неможливим за наявної потужності зарядного пристрою. У такому випадку користувач може зменшити бажаний рівень заряду, збільшити доступний час заряджання або використати зарядний пристрій більшої потужності.

Технічне обмеження потужності заряджання записується так:

$$0 \leq P_{EV}(h) \leq P_{EV,max}, h \in H. \quad (2.11)$$

Крім того, заряджання можливе лише в тих інтервалах, коли електромобіль підключений до зарядного пристрою. З використанням змінної доступності $A(h)$, введеної у формулі (2.3), це обмеження можна записати так:

$$0 \leq P_{EV}(h) \leq A(h) \cdot P_{EV,max}, h \in H. \quad (2.12)$$

Якщо $A(h) = 0$, заряджання в цьому інтервалі неможливе. Якщо $A(h) = 1$, заряджання може виконуватися в межах допустимої потужності зарядного пристрою.

У спрощеній моделі вважається, що заряджання припиняється після досягнення SOC_{target} . За потреби в подальших дослідженнях може бути додатково врахована технічна верхня межа заряду батареї SOC_{max} , якщо вона відрізняється від бажаного рівня, заданого користувачем.

Розрахунок потреби електромобіля в енергії є другим ключовим етапом моделі після визначення доступного сонячного надлишку. Якщо модель сонячного надлишку відповідає на питання, скільки енергії може бути отримано від фотоелектричної системи, то модель потреби електромобіля визначає, скільки енергії необхідно для досягнення бажаного рівня заряду.

2.5 Алгоритм планування заряджання електромобіля

Після визначення сонячного надлишку та потреби електромобіля в енергії формується графік заряджання. У даній роботі використовується детермінований алгоритм, який працює з погодинними профілями та надає пріоритет інтервалам із найбільшим доступним сонячним надлишком. Такий підхід є достатньо простим для програмної реалізації та відповідає меті підсистеми – підвищити частку PV-енергії в заряджанні електромобіля. Послідовність планування домашнього заряджання електромобіля з урахуванням прогнозу сонячної генерації представлено на рис. 2.2.

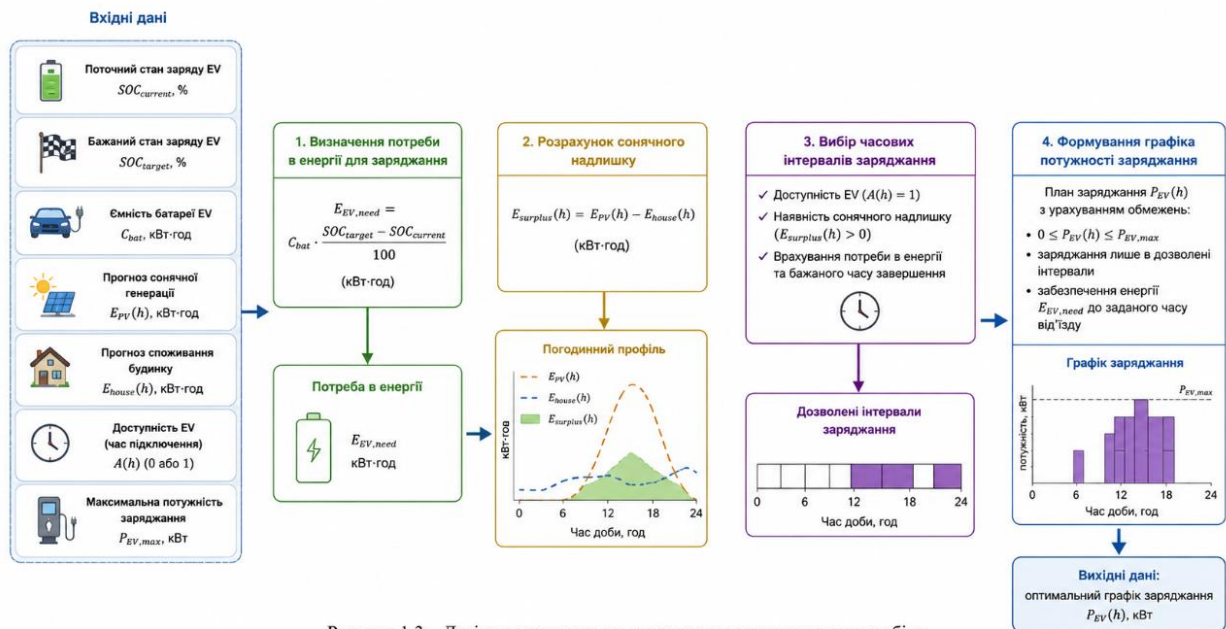


Рисунок 2.2 – Послідовність планування заряджання електромобіля з урахуванням прогнозу сонячної генерації

Як видно з рис. 2.2, планування заряджання починається з аналізу вхідних даних про стан заряду електромобіля, прогноз PV-генерації, побутове навантаження, доступність автомобіля та максимальну потужність заряджання. Далі підсистема визначає потребу електромобіля в енергії та

доступний сонячний надлишок. На основі цих даних обираються часові інтервали, у яких заряджання є технічно можливим і енергетично доцільним, після чого формується графік потужності заряджання.

Обраний алгоритм є детермінованим і працює з погодинними профілями. Такий підхід був обраний через його простоту, прозорість і придатність для бакалаврської роботи. На відміну від складних оптимізаційних або машинно-навчальних моделей, детермінований алгоритм не потребує великого набору навчальних даних, але дозволяє показати основну логіку роботи підсистеми: визначення сонячного надлишку, вибір найкращих інтервалів для заряджання та оцінювання результату.

Основна ідея алгоритму полягає в тому, що заряджання електромобіля спочатку планується в ті часові інтервали, у яких одночасно виконуються дві умови: електромобіль підключений до зарядного пристрою, а прогнозований сонячний надлишок є додатним. Якщо доступного сонячного надлишку недостатньо для досягнення бажаного рівня заряду, графік може бути доповнений заряджанням із мережі в межах доступного часу.

Алгоритм використовує такі основні вхідні дані:

- $E_{PV}(h)$: прогнозована PV-генерація;
- $E_{house}(h)$: побутове навантаження;
- $E_{surplus}(h)$: доступний сонячний надлишок;
- $A(h)$: ознака доступності електромобіля;
- $E_{EV,need}$: потреба електромобіля в енергії;
- $P_{EV,max}$: максимальна потужність заряджання;
- Δt : часовий крок моделювання;
- η_{ch} : коефіцієнт корисної дії заряджання.

Вихідним результатом алгоритму є погодинний графік заряджання електромобіля $P_{EV}(h)$, $h \in H$.

На початку роботи алгоритму для всіх часових інтервалів задається нульова потужність заряджання $P_{EV}(h) = 0, h \in H$. Далі визначається

залишкова потреба електромобіля в енергії $E_{rem}^{(0)} = E_{EV, need}$, де $E_{rem}^{(0)}$ – початкова залишкова потреба в енергії до початку планування заряджання.

На першому етапі алгоритм формує множину часових інтервалів, у яких електромобіль підключений до зарядного пристрою. Ця множина була визначена у формулі (2.4) як $H_{avail} = \{h \in H \mid A(h) = 1\}$. Після цього для кожного доступного інтервалу визначається кількість сонячної енергії, яка може бути використана для заряджання електромобіля за інтервал. Вона обмежується як величиною сонячного надлишку, так і максимальною потужністю зарядного пристрою:

$$E_{PV,EV}^{max}(h) = \min(E_{surplus}(h); P_{EV,max} \cdot \Delta t), h \in H_{avail}. \quad (2.13)$$

Формула (2.13) показує, що електромобіль не може прийняти більше енергії, ніж дозволяє зарядний пристрій за один часовий інтервал. Якщо ж сонячного надлишку мало, заряджання в цьому інтервалі обмежується саме доступною PV-енергією.

На другому етапі доступні інтервали впорядковуються за спаданням величини $E_{PV,EV}^{max}(h)$. Це означає, що пріоритет надається тим годинам, у яких очікується найбільший сонячний надлишок. Такий принцип є доцільним, оскільки метою підсистеми є пріоритетне використання власної сонячної енергії. У спрощеному вигляді послідовність пріоритетних інтервалів можна подати так:

$$E_{PV,EV}^{max}(h_1) \geq E_{PV,EV}^{max}(h_2) \geq \dots \geq E_{PV,EV}^{max}(h_m), \quad (2.14)$$

де h_1, h_2, \dots, h_m – доступні інтервали заряджання, впорядковані за спаданням прогнозованого сонячного надлишку; m – кількість доступних інтервалів.

На третьому етапі алгоритм послідовно призначає заряджання в обраних інтервалах. Для кожного інтервалу h_i визначається енергія, яка буде подана до електромобіля:

$$E_{EV}(h_i) = \min \left(E_{PV,EV}^{max}(h_i); E_{rem}^{(i-1)} \right), \quad (2.15)$$

де $E_{rem}^{(i-1)}$ – залишкова потреба електромобіля в енергії перед розглядом інтервалу h_i .

Після призначення заряджання залишкова потреба оновлюється:

$$E_{rem}^{(i)} = E_{rem}^{(i-1)} - E_{EV}(h_i). \quad (2.16)$$

Якщо після чергового кроку виконується умова $E_{rem}^{(i)} = 0$, алгоритм завершує формування графіка, оскільки потреба електромобіля в енергії вже покрита.

Потужність заряджання в кожному обраному інтервалі визначається через енергію, подану до електромобіля:

$$P_{EV}(h_i) = \frac{E_{EV}(h_i)}{\Delta t}. \quad (2.17)$$

У програмній реалізації за погодинного кроку значення графіка заряджання фактично відповідає енергії, що передається до електромобіля протягом відповідної години.

Якщо після використання всіх доступних інтервалів із сонячним надлишком залишкова потреба електромобіля залишається додатною, $E_{rem} > 0$, алгоритм переходить до четвертого етапу. На цьому етапі можливі два варіанти. Перший варіант – сформулювати повідомлення про те, що повне заряджання від сонячної енергії неможливе. Другий варіант – доповнити

графік заряджання енергією з мережі у доступні часові інтервали, щоб забезпечити досягнення бажаного рівня заряду. У даній роботі використовується другий підхід, оскільки практично важливим є не лише максимальне використання сонячної енергії, але й готовність електромобіля до поїздки.

Енергія, яку необхідно отримати з мережі для завершення заряджання, визначається як залишкова потреба після використання сонячного надлишку $E_{\text{grid,EV}} = E_{\text{rem}}$. У разі використання домашнього акумуляторного накопичувача частина цієї енергії може бути покрита з батареї. Тоді енергія з мережі визначається з урахуванням енергії, переданої з домашнього накопичувача:

$$E_{\text{grid,EV}} = \max(0; E_{\text{rem}} - E_{\text{bat,EV}}), \quad (2.18)$$

де $E_{\text{bat,EV}}$ – енергія, передана від домашнього акумулятора до електромобіля. У базовій моделі домашній акумулятор розглядається як додатковий буфер, а основний пріоритет надається використанню прямого сонячного надлишку.

Загальну послідовність роботи алгоритму представлено на рис. 2.3, і можна подати у вигляді таких етапів:

1. Зчитування вхідних профілів $E_{\text{PV}}(h)$, $E_{\text{house}}(h)$, параметрів електромобіля та даних про доступність $A(h)$.
2. Розрахунок потреби електромобіля в енергії $E_{\text{EV,need}}$.
3. Визначення доступного сонячного надлишку $E_{\text{surplus}}(h)$.
4. Вибір інтервалів, у яких електромобіль підключений до зарядного пристрою.
5. Впорядкування доступних інтервалів за величиною сонячного надлишку.

6. Формування графіка заряджання з пріоритетним використанням PV-енергії.
7. Додавання заряджання з мережі або домашньої батареї, якщо сонячного надлишку недостатньо.
8. Розрахунок показників ефективності: частки сонячної енергії та імпорту електроенергії з мережі.

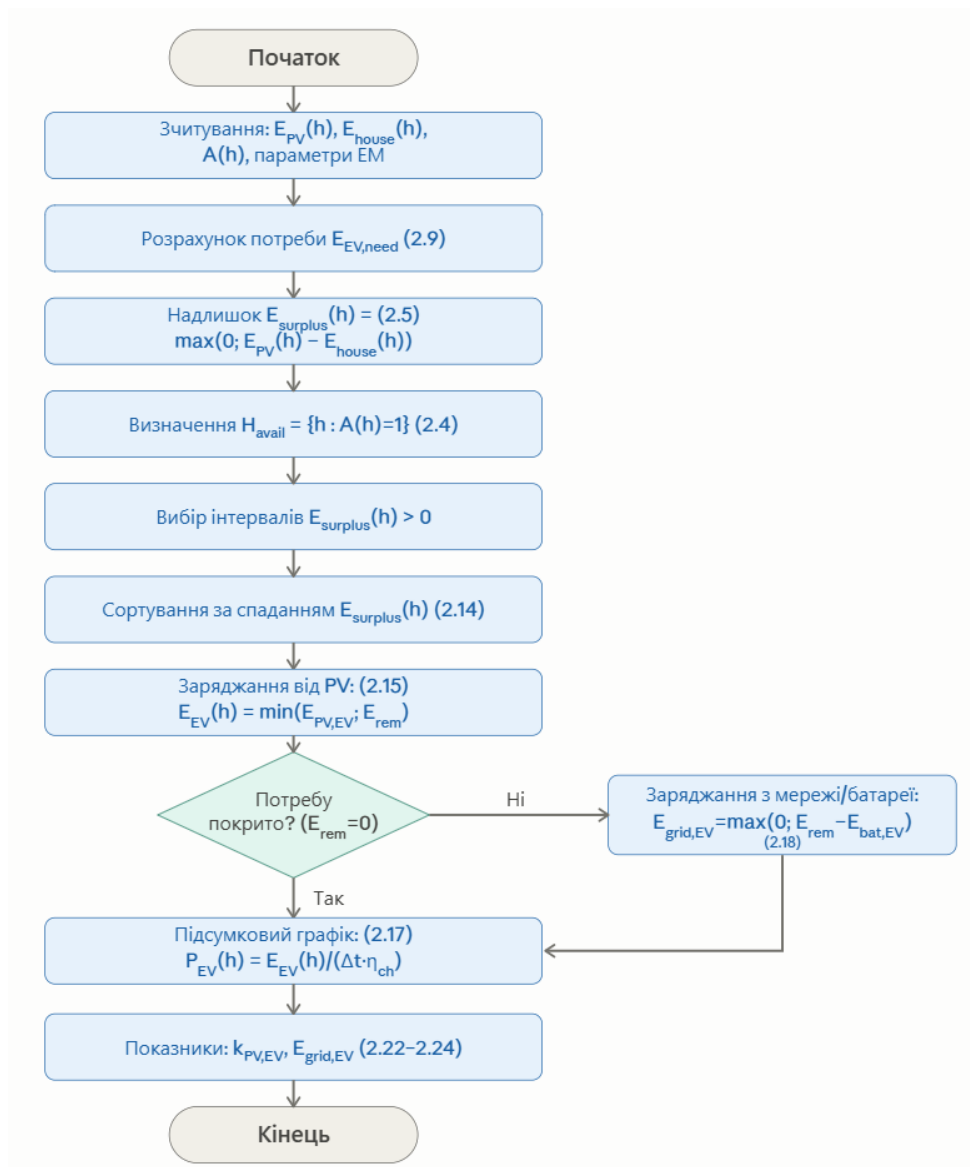


Рисунок 2.3 – Алгоритм планування заряджання електромобіля з урахуванням доступного сонячного надлишку

Запропонований алгоритм має декілька переваг для поставленої задачі. По-перше, він безпосередньо використовує прогноз доступного сонячного надлишку, тобто орієнтований саме на підвищення використання власної PV-генерації. По-друге, він враховує часову доступність електромобіля, що є важливим для домашнього заряджання. По-третє, алгоритм є достатньо простим для реалізації в програмній підсистемі та зрозумілим для подальшого аналізу результатів.

Разом із тим, алгоритм має певні спрощення. Він не виконує складної економічної оптимізації за тарифами та не враховує стохастичну невизначеність прогнозу. Однак для задачі бакалаврської роботи це є прийнятним, оскільки основна мета полягає у створенні програмної підсистеми, яка демонструє принцип прогнозного планування заряджання електромобіля на основі доступної сонячної енергії. Більш складні моделі можуть бути використані в подальших дослідженнях для врахування динамічних тарифів, імовірного прогнозу погоди або оптимізації роботи домашнього акумуляторного накопичувача.

Таким чином, алгоритм планування заряджання електромобіля поєднує результати двох попередніх етапів моделювання: визначення доступного сонячного надлишку та розрахунок потреби електромобіля в енергії. На основі цих даних формується погодинний графік заряджання, який забезпечує досягнення заданого рівня заряду та водночас надає пріоритет використанню власної сонячної генерації.

2.6 Показники оцінювання ефективності роботи підсистеми

Після формування графіка заряджання електромобіля необхідно оцінити ефективність роботи розроблюваної підсистеми. У даній роботі для цього використовуються показники, що відповідають підходам, поширеним у дослідженнях домашніх систем енергоменеджменту, інтелектуального заряджання електромобілів і використання фотоелектричної генерації. У таких системах зазвичай оцінюють обсяг енергії, переданої до електромобіля, частку

власної PV-енергії в заряджанні, імпорт електроенергії з мережі та якість прогнозування сонячної генерації [4, 6, 9–11].

Вибір саме цих показників обґрунтовується метою роботи: підсистема повинна не лише сформувати графік заряджання, але й показати, наскільки цей графік дозволяє використати доступну сонячну енергію та зменшити залежність заряджання від зовнішньої електромережі. Такий підхід узгоджується з дослідженнями інтелектуального заряджання, у яких ефективність алгоритму оцінюється через підвищення власного використання PV-енергії та зниження імпорту енергії з мережі [6]. Крім того, у роботах з HEMS підкреслюється необхідність аналізу енергетичного балансу між локальною генерацією, побутовим навантаженням, накопичувачем та електромережею [4, 9, 11].

Першим показником є загальна енергія, передана до електромобіля за період планування. У програмній реалізації графік заряджання розглядається як послідовність значень енергії, що передається до електромобіля в кожному часовому інтервалі. Тому загальна енергія заряджання визначається як [4, 9]:

$$E_{EV, total} = \sum_{h \in H} E_{EV}(h), \quad (2.19)$$

де $E_{EV, total}$ – загальна енергія, передана до електромобіля за період планування, кВт·год; $E_{EV}(h)$ – енергія, передана до електромобіля в часовому інтервалі h , кВт·год.

Для перевірки виконання вимоги користувача щодо бажаного рівня заряду використовується умова достатності заряджання [6]:

$$E_{EV, total} \geq E_{EV, need} \quad (2.20)$$

де $E_{EV, need}$ – необхідна енергія для досягнення заданого стану заряду батареї електромобіля. Якщо умова (2.20) виконується, сформований графік заряджання забезпечує потребу користувача. Якщо ні, підсистема повинна

показати, що за заданих обмежень досягнення бажаного рівня заряду неможливе або потребує зміни умов планування.

Одним із основних показників ефективності є енергія фотоелектричної системи, фактично використана для заряджання електромобіля. Вона визначається з урахуванням того, що в кожному часовому інтервалі заряджання від сонця не може перевищувати ні заплановану енергію заряджання, ні доступний сонячний надлишок [6, 9]:

$$E_{PV,EV} = \sum_{h \in H} \min(E_{EV}(h); E_{surplus}(h)), \quad (2.21)$$

де $E_{PV,EV}$ – сумарна енергія PV-системи, використана для заряджання електромобіля, кВт·год; $E_{surplus}(h)$ – доступний сонячний надлишок у часовому інтервалі h , кВт·год.

На основі цього показника визначається частка сонячної енергії в заряджанні електромобіля [6]:

$$k_{PV,EV} = \frac{E_{PV,EV}}{E_{EV, total}}, \quad (2.22)$$

де $k_{PV,EV}$ – частка PV-енергії в заряджанні електромобіля. Якщо $k_{PV,EV}$ наближається до 1, це означає, що більша частина заряджання забезпечується власною сонячною генерацією. Якщо значення показника є низьким, заряджання значною мірою залежить від мережі або час доступності електромобіля не збігається з періодами високої PV-генерації.

Наступним показником є обсяг електроенергії з мережі, використаної для заряджання електромобіля. Для базового сценарію без урахування домашньої батареї він визначається як різниця між загальною енергією заряджання та енергією, отриманою від PV-системи [4, 10, 11]:

$$E_{grid,EV} = E_{EV, total} - E_{PV,EV}, \quad (2.23)$$

де $E_{\text{grid,EV}}$ – енергія з мережі, використана для заряджання електромобіля, кВт·год. Цей показник відповідає логіці HEMS і DSM, де одним із завдань керування навантаженням є зменшення небажаного навантаження на електромережу та підвищення використання локальних джерел енергії [4, 10, 11].

Для наочнішої оцінки залежності заряджання від мережі використовується частка мережевої енергії [10, 11]:

$$k_{\text{grid,EV}} = \frac{E_{\text{grid,EV}}}{E_{\text{EV, total}}} \quad (2.24)$$

де $k_{\text{grid,EV}}$ – частка електроенергії з мережі в загальній енергії заряджання електромобіля. Для системи без домашньої батареї за відсутності інших джерел енергії виконується співвідношення $k_{\text{PV,EV}} + k_{\text{grid,EV}} = 1$.

Для порівняння різних стратегій заряджання доцільно використовувати показник економії імпорту електроенергії з мережі [6]. Він показує, наскільки запропонований алгоритм зменшує потребу в мережевій енергії порівняно з базовим сценарієм, наприклад некерованим або вечірнім заряджанням:

$$\Delta E_{\text{grid}} = E_{\text{grid,base}} - E_{\text{grid,plan}} \quad (2.25)$$

де ΔE_{grid} – зменшення імпорту електроенергії з мережі, кВт·год; $E_{\text{grid,base}}$ – імпорт електроенергії з мережі в базовому сценарії; $E_{\text{grid,plan}}$ – імпорт електроенергії з мережі після застосування алгоритму планування. Додатне значення ΔE_{grid} свідчить про те, що запропонований графік заряджання зменшує залежність від мережі.

Якщо в моделі враховується домашній акумуляторний накопичувач, енергію з мережі для заряджання електромобіля доцільно оцінювати не лише прямою різницею між енергією заряджання та PV-енергією, а як додатковий,

або маржинальний, імпорт, спричинений зарядженням електромобіля. У цьому випадку порівнюються два режими роботи домашньої енергосистеми: без зарядження електромобіля та з його зарядженням [4, 9]. Тоді:

$$E_{\text{grid,EV}} = \max(0; G_1 - G_0), \quad (2.26)$$

де G_0 — імпорт електроенергії з мережі без урахування зарядження електромобіля, кВт·год; G_1 — імпорт електроенергії з мережі при заряджанні електромобіля, кВт·год. Такий підхід дозволяє оцінити саме додатковий вплив зарядження електромобіля на споживання з мережі. Відповідно, частина енергії зарядження, забезпечена PV-системою та/або домашнім накопичувачем, може бути визначена як [6, 9]:

$$E_{\text{PV/bat,EV}} = E_{\text{EV, total}} - E_{\text{grid,EV}} \quad (2.27)$$

де $E_{\text{PV/bat,EV}}$ — частина енергії зарядження, забезпечена власними джерелами домашньої енергосистеми, тобто PV-генерацією та акумуляторним накопичувачем.

Окремо може оцінюватися якість прогнозу PV-генерації. У літературі для цього використовуються різні статистичні показники, зокрема RMSE та MAPE [9]. У межах програмної реалізації доцільно використовувати нормовану середньоквадратичну похибку, оскільки вона дозволяє порівнювати відхилення прогнозу від фактичної або контрольної генерації у відносному вигляді:

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{d=1}^N (E_{\text{PV, actual}}(d) - E_{\text{PV, forecast}}(d))^2}}{\bar{E}_{\text{PV, actual}}}, \quad (2.28)$$

де $nRMSE$ — нормована середньоквадратична похибка прогнозу; $E_{\text{PV, actual}}(d)$ — фактична або контрольна добова PV-генерація для дня d ,

кВт·год; $E_{PV,forecast}(d)$ – прогнозована добова PV-генерація; $\bar{E}_{PV,actual}$ – середнє значення фактичної або контрольної PV-генерації; N – кількість днів у вибірці.

Для аналізу зв'язку між метеорологічними параметрами та PV-генерацією можуть використовуватися коефіцієнт кореляції, коефіцієнт детермінації R^2 і середня абсолютна похибка MAE . Ці показники не є основними для оцінювання графіка заряджання, але можуть бути корисними для перевірки якості прогнозованої частини підсистеми.

Висновки до розділу 2

У другому розділі сформовано математичну модель і алгоритмічну основу підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля. Розглянуто домашню енергосистему як сукупність фотоелектричної генерації, побутового навантаження, електромобіля, зарядного пристрою, електромережі та, за потреби, акумуляторного накопичувача.

Визначено основні вхідні дані моделі: погодинний прогноз PV-генерації, профіль побутового споживання, параметри електромобіля, поточний і бажаний стан заряду батареї, максимальну потужність заряджання та часову доступність електромобіля. Такий набір даних дозволяє врахувати як енергетичний стан системи, так і вимоги користувача.

Запропоновано модель визначення доступного сонячного надлишку як різниці між прогнозованою PV-генерацією та побутовим навантаженням. Показано, що саме ця величина є основою для вибору часових інтервалів, у яких заряджання електромобіля може виконуватися з пріоритетним використанням власної сонячної енергії.

Розглянуто розрахунок потреби електромобіля в енергії на основі ємності батареї та різниці між поточним і бажаним станом заряду. Також визначено основні технічні обмеження заряджання, зокрема максимальну

потужність зарядного пристрою та доступність автомобіля в задані часові інтервали.

Сформовано алгоритм планування заряджання, який передбачає вибір інтервалів із найбільшим сонячним надлишком, формування погодинного графіка заряджання та, за потреби, доповнення його енергією з мережі або домашньої батареї. Обраний алгоритм є детермінованим, прозорим і придатним для реалізації в програмній підсистемі.

Для оцінювання роботи підсистеми визначено основні показники ефективності: загальну енергію заряджання, частку PV-енергії в заряджанні електромобіля, імпорт електроенергії з мережі, частку мережевої енергії та економію імпорту порівняно з базовим сценарієм. Отримані залежності та алгоритм є основою для подальшої програмної реалізації, яка розглядається в розділі 3.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ПІДСИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДЖАННЯ

3.1 Вибір програмного середовища для реалізації підсистеми

Для реалізації програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля необхідно обрати програмне середовище, яке забезпечує зручну роботу з часовими рядами, виконання математичних розрахунків, обробку табличних даних і побудову графічних результатів. Оскільки в розділі 2 модель підсистеми подано у вигляді погодинних профілів PV-генерації, побутового споживання та графіка заряджання електромобіля, програмне середовище повинно підтримувати ефективну обробку масивів даних і наочне подання результатів моделювання.

Для виконання цих завдань у роботі обрано мову програмування Python. Її використання є доцільним через відкритість, доступність, простоту синтаксису та наявність розвиненої екосистеми бібліотек для наукових і прикладних розрахунків. Python має офіційну документацію, широкий набір стандартних засобів і активно використовується для задач аналізу даних, моделювання та автоматизації обчислень [12]. Для бакалаврської роботи важливо також те, що програмний код на Python є відносно простим для читання, перевірки та подальшого вдосконалення.

Особливістю поставленої задачі є робота з погодинними профілями, тобто з послідовностями значень, що змінюються в часі. Такі дані зручно подавати у вигляді таблиць, де кожному часовому інтервалу відповідають значення PV-генерації, побутового навантаження, доступності електромобіля та запланованої енергії заряджання. Для обробки таких даних доцільно використовувати бібліотеку `pandas`, яка призначена для роботи з табличними структурами даних і широко застосовується для аналізу даних у середовищі Python [13]. У межах розроблюваної підсистеми `pandas` може використовуватися для зчитування вхідних файлів, формування добових профілів, об'єднання часових рядів і збереження результатів розрахунку.

Для виконання числових операцій над масивами даних використовується бібліотека NumPy. Вона забезпечує роботу з багатовимірними масивами, математичними операціями, статистичними розрахунками та векторизованою обробкою числових даних [14]. У задачі планування заряджання NumPy є зручним для розрахунку сонячного надлишку, порівняння прогнозованої генерації з побутовим навантаженням, визначення мінімальних і максимальних значень, а також обчислення показників ефективності.

Для візуалізації результатів моделювання доцільно використовувати бібліотеку Matplotlib. Вона дає змогу створювати статичні графіки, які можуть бути використані для відображення погодинних профілів PV-генерації, побутового навантаження, графіка заряджання електромобіля та порівняння енергії, отриманої від PV-системи й електромережі [15]. Графічне представлення результатів є важливою частиною програмної підсистеми, оскільки дозволяє користувачу швидко оцінити, у які години заряджання виконується переважно за рахунок сонячної енергії, а коли виникає потреба в імпорті з мережі.

Для оцінювання якості прогнозу та розрахунку статистичних показників може використовуватися бібліотека scikit-learn. Вона містить інструменти для аналізу даних, побудови моделей машинного навчання та оцінювання якості прогнозів [16]. У межах даної роботи основний алгоритм планування є детермінованим і не потребує навчання складної моделі, однак окремі функції оцінювання, зокрема визначення похибок прогнозу або коефіцієнтів відповідності між прогнозними та фактичними даними, можуть бути реалізовані із застосуванням засобів scikit-learn.

Таким чином, вибір Python як програмного середовища є обґрунтованим для поставленої задачі. Він забезпечує поєднання простоти реалізації, можливості роботи з часовими рядами, підтримки математичних розрахунків і побудови графіків. Для розроблюваної підсистеми це дозволяє реалізувати всі основні етапи: зчитування вхідних даних, розрахунок доступного

сонячного надлишку, визначення потреби електромобіля в енергії, формування графіка заряджання, оцінювання показників ефективності та візуалізацію результатів.

Щоб користувачу було зручніше аналізувати результати не тільки у вигляді числових таблиць або файлів, а й через інтерактивні графіки, візуальні показники та порівняння сценаріїв заряджання, було обрано подавати результати моделювання у вигляді dashboard-сторінки, яка відкривається у звичайному веббраузері. Браузерний інтерфейс не потребує встановлення спеціального програмного забезпечення для перегляду результатів і може бути відкритий на різних пристроях.

Для реалізації dashboard використано стандартні вебтехнології: HTML, CSS і JavaScript. HTML застосовується для формування структури сторінки та розміщення основних блоків інтерфейсу, CSS – для оформлення зовнішнього вигляду, кольорового подання показників і адаптації елементів сторінки, а JavaScript – для обробки вбудованих даних, оновлення показників і побудови інтерактивних графіків. Такий підхід відповідає загальній практиці створення клієнтських вебзастосунків, де структура, оформлення та поведінка інтерфейсу розділяються між HTML, CSS і JavaScript [17].

Для графічного подання результатів у dashboard використано бібліотеку Chart.js. Вона призначена для створення графіків у вебзастосунках і підтримує побудову різних типів діаграм, зокрема лінійних, стовпчикових і кругових графіків на основі HTML5 Canvas [18]. У межах даної підсистеми Chart.js доцільно використовувати для відображення погодинних профілів PV-генерації, побутового навантаження, заряджання електромобіля, а також для порівняння частки сонячної енергії та імпорту з мережі в різних сценаріях.

Особливістю реалізованого dashboard є те, що він працює як автономна HTML-сторінка. Результати, сформовані розрахунковими модулями Python, попередньо експортуються у формат JSON і вбудовуються або підключаються до вебсторінки. Завдяки цьому користувач може переглядати результати без повторного запуску розрахункових скриптів.

Основні програмні засоби, використані для реалізації підсистеми, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Програмні засоби, використані для реалізації підсистеми

| Програмний засіб | Призначення в роботі |
|-------------------------|--|
| Python | Основна мова програмування для реалізації розрахункових модулів і алгоритмів |
| pandas | Зчитування, обробка та структурування табличних даних і часових профілів |
| NumPy | Виконання числових розрахунків і операцій над масивами даних |
| Matplotlib | Побудова графіків для аналізу результатів моделювання |
| scikit-learn | Оцінювання якості прогнозу та розрахунок статистичних показників |
| HTML | Формування структури браузерної dashboard-сторінки |
| CSS | Оформлення інтерфейсу, блоків показників і графічних елементів |
| JavaScript | Динамічне оновлення даних, обробка сценаріїв і керування елементами інтерфейсу |
| Chart.js | Побудова інтерактивних графіків у браузерному інтерфейсі |
| JSON | Передавання результатів розрахункових модулів Python до dashboard |

Прийнятий поділ платформи на дві технологічні складові – обчислювальне ядро мовою Python та вебінтерфейс – відображає різну природу відповідних задач. Трудомісткі розрахунки й попереднє оброблення даних виконуються мовою, оптимізованою для наукових обчислень, тоді як інтерактивна взаємодія реалізується технологією, оптимізованою для подання. Обмін даними між складовими уніфіковано через відкритий текстовий формат, що зберігає слабку зв'язність модулів і дозволяє замінювати чи розширювати окремі складові без перероблення інших. Таке рішення

узгоджується з вимогами модульності, продуктивності та переносності й є типовим для систем подібного класу.

Метеорологічні дані отримуються від відкритого вебсервісу через стандартний програмний інтерфейс, що не потребує платних ключів доступу. Доцільність такого рішення полягає у відтворюваності (дані доступні за тими самими координатами й датами будь-якому досліднику), відсутності ліцензійних обмежень та уніфікованості формату обміну. Використання комерційних метеосервісів забезпечило б ширший набір параметрів, проте суперечило б вимогам відкритості й відтворюваності, тоді як власні метеовимірювання потребували б додаткового обладнання, відсутнього в межах роботи.

3.2 Вимоги до програмної підсистеми

Програмна підсистема прогнозування доступної сонячної енергії та планування заряджання електромобіля повинна забезпечувати виконання розрахунків, описаних у розділі 2, а також надавати користувачу результати у зручній для аналізу формі. Основне призначення підсистеми полягає у визначенні періодів, коли заряджання електромобіля може виконуватися з пріоритетним використанням власної фотоелектричної генерації, та у порівнянні такого підходу з базовими сценаріями заряджання на основі даних енергосистеми з платформи Victron та даних діагностики електромобіля OBD.

Вимоги до підсистеми поділено на функціональні, що визначають перелік реалізованих функцій, та нефункціональні, що задають якісні характеристики програмного забезпечення. Перелік функціональних вимог наведено в таблиці 3.2.

Нефункціональні вимоги, що визначають якість і експлуатаційні характеристики підсистеми, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Функціональні вимоги до програмної підсистеми

| Група вимог | Зміст функціональної вимоги |
|-------------|---|
| ФВ1 | Збирати історичні та прогнозні метеодані (сонячна радіація, температура) за географічними координатами будинку через відкритий метеосервіс. |
| ФВ2 | Зчитувати дані системи Victron, реконструювати генерацію ФЕП і споживання будинку, зводити їх до спільної погодинної сітки. |
| ФВ3 | Обчислювати погодинний доступний надлишок сонячної енергії як різницю генерації та базового навантаження. |
| ФВ4 | Обробляти діагностичні логи OBD: визначати корисну ємність, питоме споживання та добову потребу електромобіля в заряді. |
| ФВ5 | Моделювати енергобаланс домашньої системи з накопичувачем, у тому числі режим буферування для вечірнього заряджання. |
| ФВ6 | Формувати погодинний розклад заряджання за кількома стратегіями (негайна, сонячно-орієнтована, з буферуванням). |
| ФВ7 | Оцінювати ефективність розкладу (частка сонячної енергії, імпорт з мережі) за принципом «план за прогнозом – оцінка за фактом». |
| ФВ8 | Візуалізувати вхідні дані та результати у вигляді графіків і таблиць з інтерактивною зміною параметрів планування. |

Таким чином, програмна підсистема повинна забезпечувати повний цикл роботи з даними: від зчитування вхідних профілів до формування графіка заряджання та оцінювання його ефективності. Вимоги до підсистеми узгоджені з математичною моделлю, наведеною в розділі 2, і спрямовані на практичну реалізацію задачі прогнозного планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією.

Таблиця 3.3 – Нефункціональні вимоги до програмної підсистеми

| Група вимог | Зміст нефункціональної вимоги |
|-------------|---|
| НВ1 | Продуктивність: перерахунок результатів і графіків у відповідь на зміну параметрів виконується практично миттєво. |
| НВ2 | Зручність використання: світла тема оформлення, зрозумілий інтерфейс, наочне графічне подання даних. |
| НВ3 | Модульність та розширюваність: джерело прогнозу замінюється без зміни інших модулів (єдиний інтерфейс «день × година»). |
| НВ4 | Переносність: інтерфейс працює у веб-браузері без встановлення, обчислювальні модулі – кросплатформні. |
| НВ5 | Відтворюваність: обчислення детерміновані; для стохастичних моделей використано фіксоване початкове значення генератора випадкових чисел. |
| НВ6 | Достовірність даних: контроль сум за контрольними значеннями та обробка пропусків у вхідних рядах. |

3.3 Функціональна модель підсистеми в нотації IDEF0

Для формалізації функцій підсистеми та зв'язків між ними застосовано методологію структурного аналізу й проектування IDEF0. Вибір цієї нотації зумовлено тим, що вона дозволяє однозначно відобразити не лише перелік виконуваних функцій, а й характер даних, якими вони обмінюються, а також умови та засоби їх виконання. Кожна функція подається прямокутником, а дуги класифікуються за чотирма ролями (ICOM): дуга, що входить ліворуч, позначає вхід – дані, які функція перетворює; дуга зверху позначає керування – параметри й обмеження, що регламентують виконання, але не зазнають перетворення; дуга праворуч позначає вихід – результат функції; дуга знизу позначає механізм – програмний чи апаратний засіб, яким функція реалізується.

Загальну ієрархію функцій підсистеми відображає дерево вузлів, представлене на рис. 3.1. На його вершині розташована головна функція A0, що декомпозується на чотири підфункції першого рівня: збір і прогнозування сонячної генерації (A1), обробку телеметрії електромобіля (A2), моделювання енергетичного балансу з накопичувачем (A3) та планування заряджання (A4). Кожну з підфункцій, своєю чергою, розкрито до другого рівня деталізації. Таке подання дає цілісне уявлення про структуру моделі ще до розгляду окремих діаграм та визначає глибину декомпозиції, прийняту в роботі.

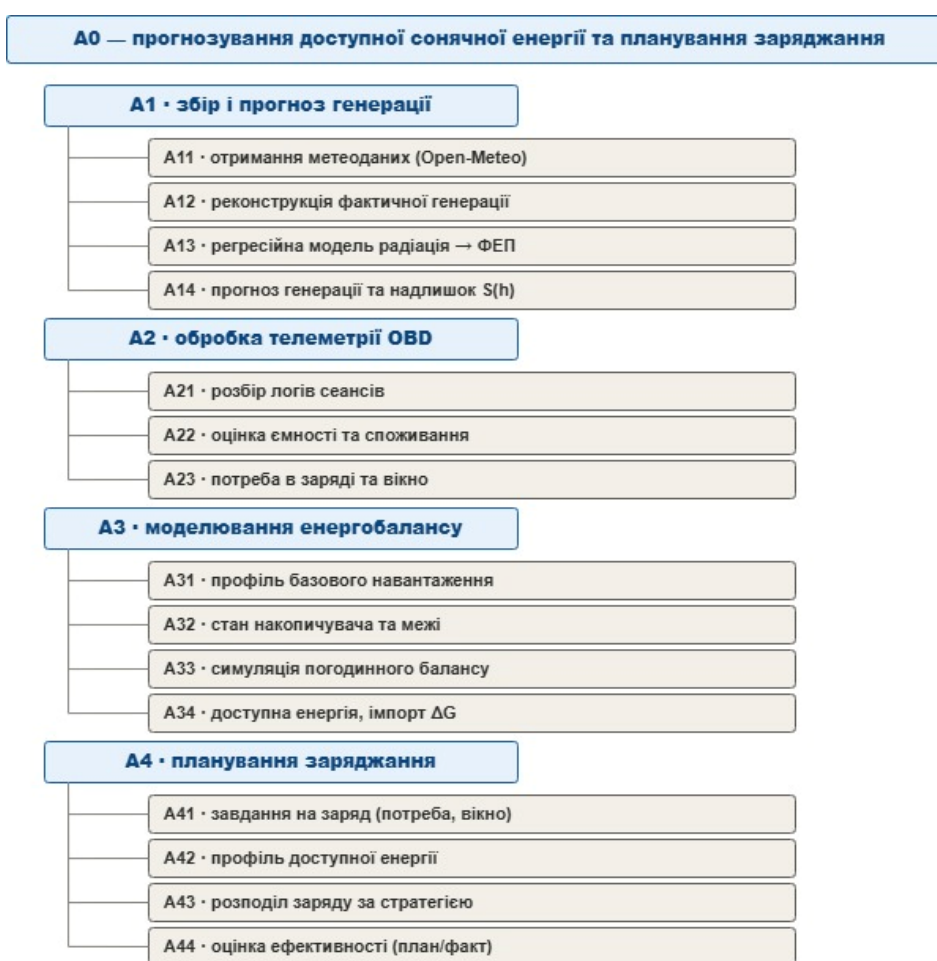


Рисунок 3.1 – Дерево вузлів підсистеми прогнозного планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією

Контекстна діаграма A-0 (рис. 3.2). Контекстна діаграма подає підсистему як єдину функцію, що взаємодіє із зовнішнім середовищем.

Входами слугують часові ряди системи моніторингу Victron, діагностичні логи бортової системи електромобіля та звіт зарядної станції; вони є первинними даними, які підсистема опрацьовує. Керування утворюють географічні координати об'єкта, параметри фотоелектричної установки, накопичувача й автомобіля, а також цільовий рівень заряду та вікно доступності – ці величини задають рамки, у межах яких формується розв'язок, але не перетворюються на результат. Виходами є погодинний розклад заряджання, показники його ефективності та засоби візуалізації. Механізмами, що забезпечують виконання функції, є зовнішній метеорологічний сервіс, обчислювальне ядро та веб-інтерфейс. Контекстна діаграма фіксує межі підсистеми й перелік її зовнішніх взаємодій, не розкриваючи внутрішньої будови.



Рисунок 3.2 – Контекстна діаграма А-0

Діаграма декомпозиції А0 (рис. 3.3). Декомпозиція головної функції розкриває внутрішню організацію підсистеми та інформаційні потоки між підфункціями. Функція А1 опрацьовує метеодані й телеметрію генерації та передає далі прогноз вироблення фотоелектричних панелей разом із погодинним профілем доступного надлишку. Функція А2 за діагностичними

логами визначає потребу автомобіля в енергії. Обидва ці результати спрямовуються до подальших функцій: профіль надлишку надходить до А3, де моделюється енергетичний баланс будинку з урахуванням накопичувача, а потреба автомобіля – до А4. Функція А3 передає до А4 величину фактично доступної для заряджання енергії. На основі цих даних функція А4 формує погодинний розклад заряджання та обчислює показники ефективності. Така послідовність відображає логіку роботи підсистеми: спершу оцінюється наявна сонячна енергія, далі – потреба споживача, після чого виконується їх узгодження з урахуванням можливостей накопичувача.

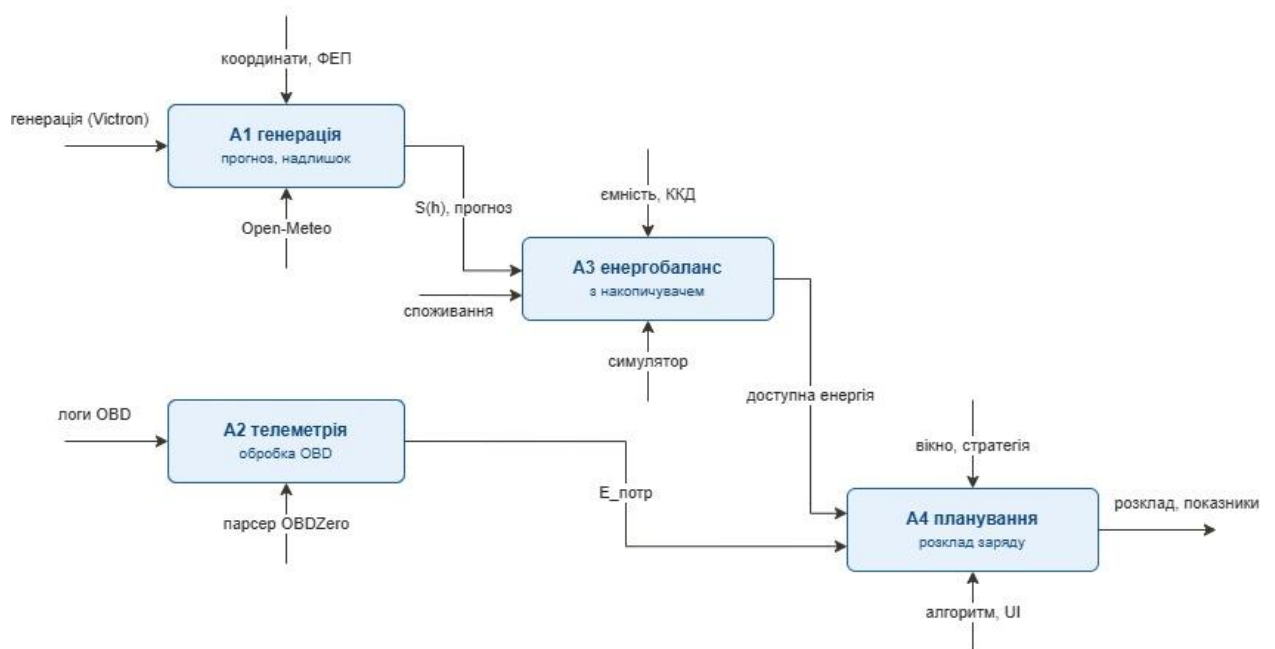


Рисунок 3.3 – Діаграма декомпозиції А0

Декомпозиція функції А1 (збір і прогнозування генерації), рис. 3.4. Деталізація функції А1 показує, що прогноз генерації будується на основі статистичної моделі, а не апіорних припущень. Підфункція А11 отримує історичні та прогнозні дані сонячної радіації за координатами об'єкта; підфункція А12 реконструює фактичну генерацію фотоелектричних панелей із зафіксованих потоків енергії. Пари «радіація – фактична генерація» використовує підфункція А13 для побудови регресійної моделі залежності

вироблення від радіації. Отримані коефіцієнти моделі разом із прогнозом радіації подаються до підфункції A14, яка формує прогноз генерації та погодинний профіль доступного надлишку. Така організація забезпечує узгодженість між даними, на яких модель навчається, і даними, які вона використовує під час роботи.

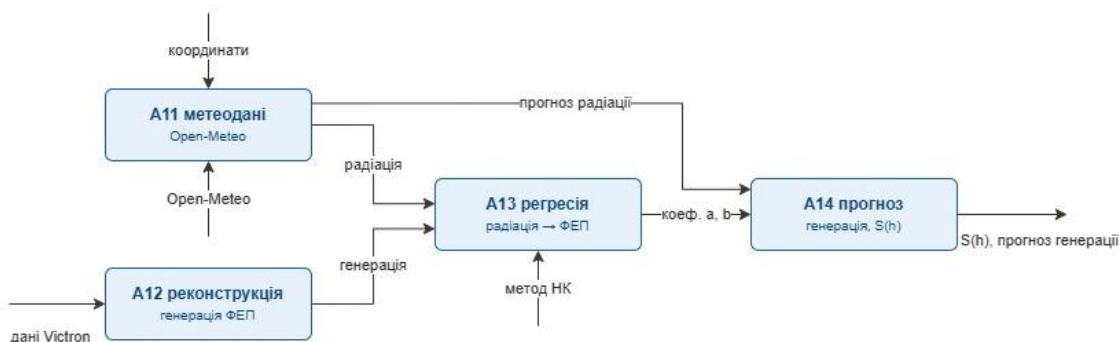


Рисунок 3.4 – Декомпозиція функції A1 - збір і прогнозування генерації

Декомпозиція функції A2 (обробка телеметрії), рис. 3.5. Функція A2 перетворює неструктуровані діагностичні логи на кількісні параметри споживача. Підфункція A21 виконує розбір логів за окремими сеансами руху. Підфункція A22 за результатами розбору оцінює корисну ємність тягового акумулятора та питоме споживання енергії. На підставі цих параметрів підфункція A23 визначає добову потребу автомобіля в заряді та інтервал його доступності. Вихідні дані функції A2 є вхідними для функції планування.



Рисунок 3.5 – Декомпозиція функції A2 - обробка телеметрії

Декомпозиція функції А3 (моделювання енергобалансу), рис. 3.6. Функція А3 відтворює погодинну динаміку енергетичного балансу будинку. Підфункція А31 формує профіль базового навантаження, відокремлюючи власне споживання будинку від керованого навантаження. Підфункція А32 визначає початковий стан накопичувача та допустимі межі його заряду. Центральною є підфункція А33, що виконує погодинну симуляцію балансу з урахуванням генерації, навантаження та обмежень накопичувача; результатом є траєкторія стану заряду й величина імпорту з мережі. Підфункція А34 на підставі результатів симуляції обчислює обсяг енергії, фактично доступної для заряджання автомобіля. Така декомпозиція дозволяє коректно врахувати буферувальну роль накопичувача у вечірньому сценарії заряджання.



Рисунок 3.6 – Декомпозиція функції А3 - моделювання енергобалансу

Декомпозиція функції А4 (планування заряджання), рис. 3.7. Функція А4 реалізує власне планування та оцінювання його якості. Підфункція А41 за потребою автомобіля та заданими обмеженнями формує завдання на заряд. Підфункція А42 готує погодинний профіль доступної енергії. Підфункція А43 розподіляє потребу в межах вікна доступності згідно з обраною стратегією, формуючи погодинний розклад. Підфункція А44 оцінює ефективність сформованого розкладу за принципом «планування за прогнозом – оцінювання за фактом», порівнюючи запланований заряд із фактично доступною генерацією та обчислюючи частку сонячної енергії й обсяг імпорту

з мережі. Замикання контуру «прогноз – план – фактична оцінка» є ключовою особливістю запропонованої функціональної моделі.

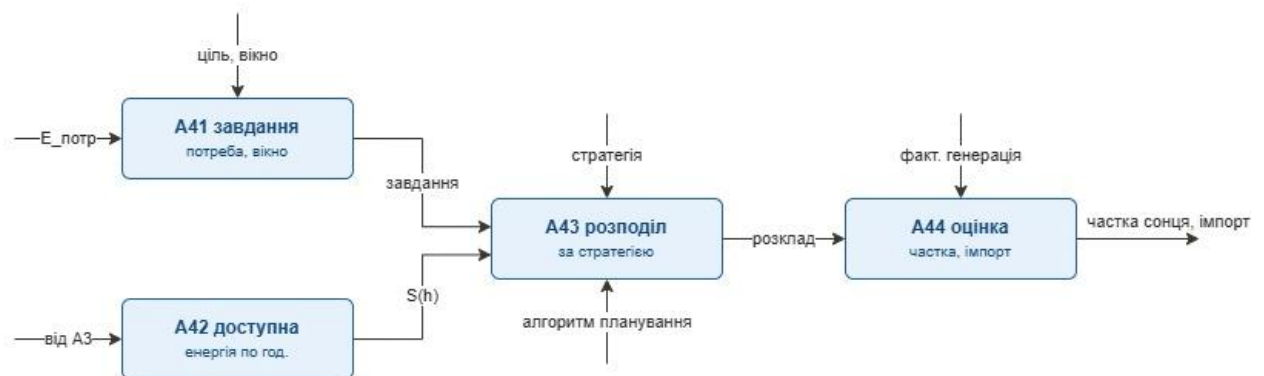


Рисунок 3.7 – Декомпозиція функції А4 - планування заряджання

Таким чином, функціональна модель у нотації IDEF0 дозволяє подати розроблювану підсистему як послідовність взаємопов'язаних процесів: отримання та прогнозування даних сонячної генерації, обробка параметрів електромобіля, моделювання енергетичного балансу домашньої системи та формування графіка заряджання. Такий підхід є доцільним, оскільки дає змогу відокремити вхідні дані, керуючі умови, механізми реалізації та вихідні результати. Завдяки цьому стає зрозуміло, які саме дані необхідні для роботи підсистеми, які розрахункові блоки забезпечують прийняття рішення та які результати отримує користувач після виконання моделювання.

Декомпозиція основної функції показує, що планування заряджання електромобіля не є окремою ізольованою дією, а залежить від прогнозу PV-генерації, побутового навантаження, стану накопичувача, параметрів електромобіля та заданого користувачем часового вікна заряджання. Отже, побудована IDEF0-модель підтверджує логіку, покладену в основу математичної моделі розділу 2, і слугує проміжною ланкою між теоретичним описом алгоритму та його програмною реалізацією. Вона також спрощує подальший опис структури програмних модулів, оскільки кожен

функціональний блок може бути пов'язаний з окремими етапами обробки даних, розрахунку показників і візуалізації результатів.

3.4 Структура програми та опис основних модулів

Структурно програмна підсистема складається з трьох основних частин: каталогу з вихідними даними, каталогу з обробленими даними та каталогу з програмними модулями. Вихідні дані зберігаються в каталозі data/raw і містять експортовані дані PV-генерації та споживання, дані заряджання електромобіля, а також, за потреби, OBD-дані. Оброблені дані зберігаються в каталозі data/processed і використовуються як проміжні або підсумкові результати для подальшого аналізу. Основна розрахункова логіка реалізована в каталозі src, а візуальне подання результатів виконується за допомогою HTML-файлу dashboard-інтерфейсу. Загальну структуру каталогів і файлів програмної підсистеми наведено на рис. 3.8.

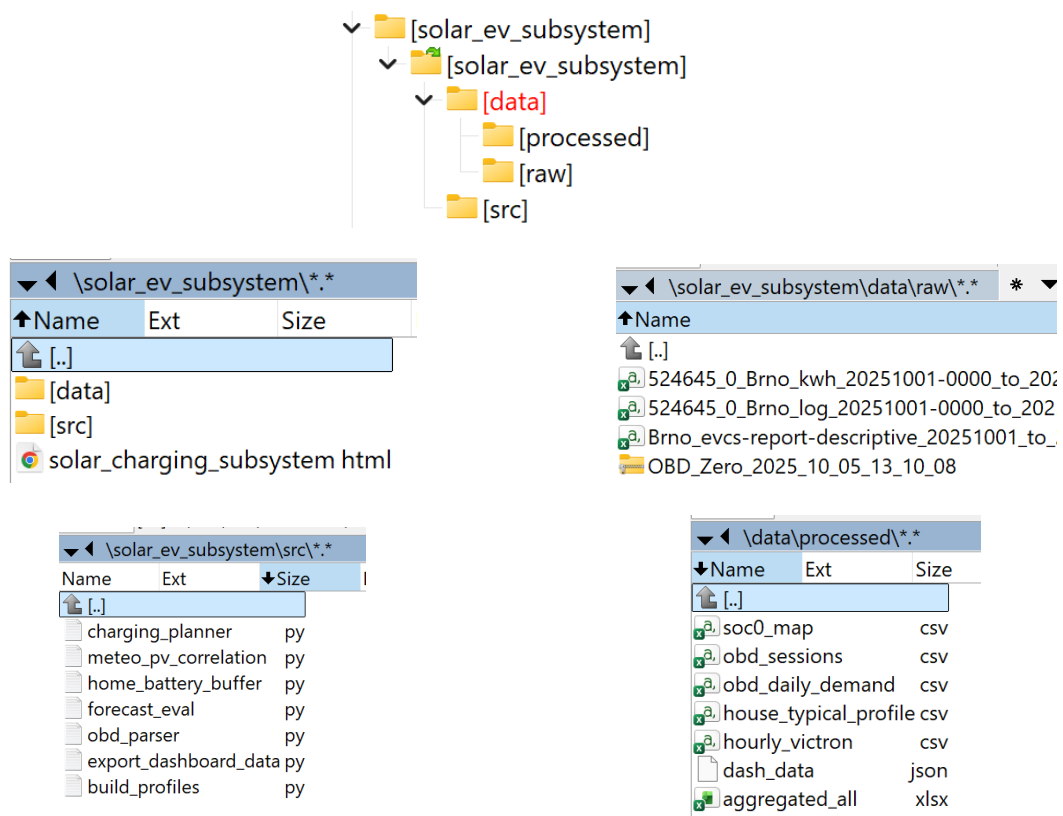


Рисунок 3.8 – Загальна структура каталогів і файлів програмної підсистеми

Як видно з рис. 3.8, кореневий каталог `solar_ev_subsystem` містить два основні підкаталоги – `data` та `src`, а також HTML-файл `solar_charging_subsystem.html`, який використовується для відкриття `dashboard`-інтерфейсу у браузері. Каталог `data` призначений для зберігання даних і поділений на два підкаталоги: `raw` та `processed`. Такий поділ дозволяє відокремити початкові файли, отримані з зовнішніх джерел, від результатів попередньої обробки та розрахунків.

У підкаталозі `data/raw` зберігаються вихідні файли, які не змінюються безпосередньо під час роботи програми. До них належать експортовані дані домашньої енергосистеми, журнали роботи системи, звіти щодо заряджання електромобіля та OBD-дані. Ці файли використовуються як первинне джерело інформації для побудови погодинних профілів PV-генерації, побутового споживання та потреби електромобіля в енергії.

Підкаталог `data/processed` містить файли, сформовані після обробки початкових даних. Зокрема, тут зберігаються `hourly_victron.csv`, `house_typical_profile.csv`, `obd_sessions.csv`, `obd_daily_demand.csv`, `soc0_map.csv`, підсумковий файл `aggregated_all.xlsx` та файл `dash_data.json`, який використовується для передавання результатів до браузерного `dashboard`. Розміщення цих файлів в окремому каталозі дає змогу не змішувати вихідні дані з результатами розрахунків і спрощує повторне тестування підсистеми.

Каталог `src` містить програмні модулі, які реалізують основну розрахункову логіку підсистеми. У ньому розміщено файли `build_profiles.py`, `charging_planner.py`, `forecast_eval.py`, `home_battery_buffer.py`, `meteo_pv_correlation.py`, `obd_parser.py` та `export_dashboard_data.py`. Кожен із цих модулів відповідає за окремий етап роботи: підготовку профілів, планування заряджання, оцінювання прогнозу, моделювання сценарію з домашнім накопичувачем, аналіз метеорологічних даних, обробку OBD-даних або формування даних для інтерфейсу. Основні програмні модулі підсистеми наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні модулі програмної підсистеми

| Модуль / файл | Призначення |
|-------------------------------|---|
| build_profiles.py | Виконує підготовку даних домашньої енергосистеми. Він зчитує експорт системи Victron, обчислює погодинні ряди генерації фотоелектричних панелей і споживання та формує усереднений профіль базового навантаження будинку за добами без заряджання електромобіля. Результатом є уніфіковані погодинні профілі. |
| charging_planner.py | Формує погодинний розклад заряджання. Він реалізує дві стратегії: жадібне сонячно-орієнтоване заряджання та базове негайне заряджання у межах заданих вікна доступності й потужності, після чого обчислює частки сонячної та мережевої енергії. Модуль є центральним у ланцюзі прийняття рішень. |
| forecast_eval.py | Оцінює якість прогнозного керування за принципом «планування за прогнозом – оцінювання за фактом». Він формує еталонні варіанти прогнозу та аналізує чутливість частки сонячної енергії до похибки прогнозу, що дозволяє оцінити очікувану ефективність системи в реальних умовах. |
| home_battery_buffer.py | Реалізує модель енергетичного балансу з домашнім накопичувачем. Ввиконує безперервну погодинну симуляцію з урахуванням ємності, коефіцієнта корисної дії, резерву та обмежень потужності накопичувача, а частку сонячної енергії в заряджанні визначає методом імпорту з мережі. Модуль обслуговує вечірній сценарій заряджання. |
| meteo_pv_correlation.py | Відповідає за метеорологічну складову й прогнозування генерації. За географічними координатами об'єкта він отримує дані сонячної радіації, реконструює фактичне вироблення панелей і будує лінійну регресійну модель залежності генерації від радіації, оцінюючи її якість коефіцієнтами кореляції та детермінації. Виходом модуля є прогноз генерації та погодинний профіль доступного надлишку. |
| obd_parser.py | Опрацьовує телеметрію електромобіля. Він розбирає діагностичні логи за сеансами, енергетичним методом оцінює корисну ємність тягового акумулятора, обчислює питоме споживання на одиницю пробігу та визначає добову потребу автомобіля в заряді. Результати використовуються як параметри споживача в задачі планування. |
| export_dashboard_data.py | Формування JSON-файлу з підсумковими даними для dashboard-інтерфейсу |
| solar_charging_subsystem.html | Браузерний інтерфейс для перегляду результатів моделювання. Він отримує підготовлені дані у форматі JSON, відтворює обчислювальну логіку засобами клієнтського сценарію для інтерактивного перерахунку та відображає результати у вигляді взаємопов'язаних графіків і таблиць. |

Такий підхід спрощує розробку та перевірку програми, оскільки розрахунок профілів, планування заряджання, оцінювання прогнозу, моделювання домашнього акумулятора та формування dashboard-інтерфейсу

виконуються окремими програмними компонентами. Це також відповідає функціональній декомпозиції, наведеної в підрозділі 3.3: вхідні дані спочатку проходять етап підготовки, далі використовуються в розрахункових модулях, після чого результати передаються до блоку візуалізації.

Послідовність виклику модулів і їх взаємозв'язки за даними показано на рис. 3.9.

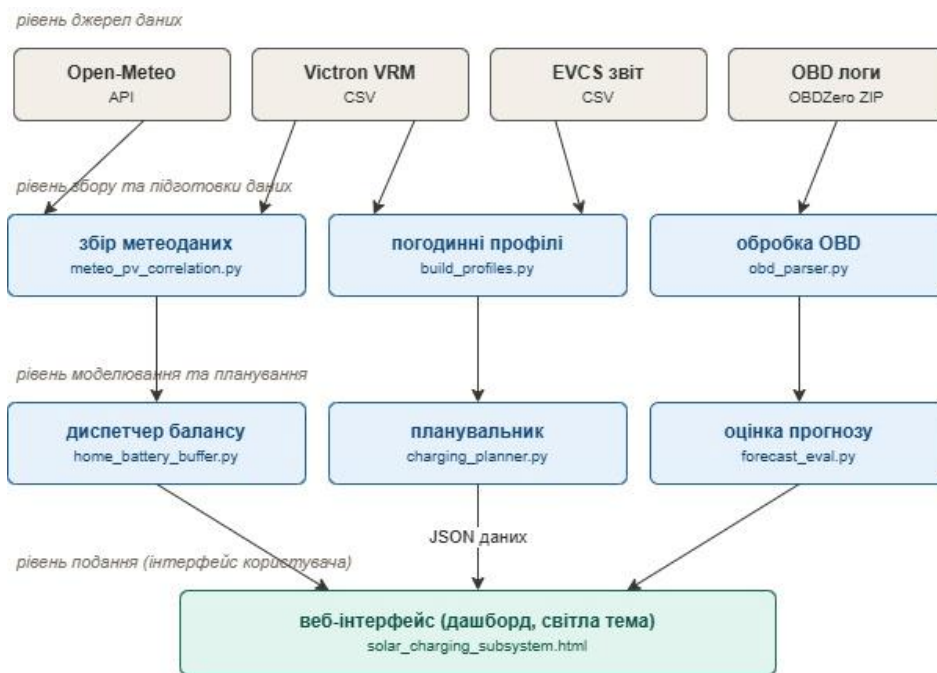


Рисунок 3.9 – Архітектура послідовність виклику модулів і їх взаємозв'язки

Схема архітектури, представлена на рис. 3.8 показує підсистему як чотири горизонтальні рівні з потоком даних згори вниз:

- Верхній рівень – джерела даних: метеосервіс Open-Meteo (через API) та три набори файлів – експорт Victron, звіт EVCS і архів логів OBD. Це первинні дані, які підсистема лише зчитує.
- Другий рівень – збір і підготовка: модуль `meteo_pv_correlation.py` отримує метеодані й будує/валідує прогноз генерації, `build_profiles.py` зводить дані Victron до погодинних профілів і виділяє базове

навантаження, `obd_parser.py` опрацьовує логи електромобіля. На виході рівня – уніфіковані часові ряди.

- Третій рівень – моделювання та планування: `home_battery_buffer.py` виконує симуляцію енергобалансу з накопичувачем, `charging_planner.py` формує розклад заряджання, `forecast_eval.py` оцінює якість прогнозного керування. Нижній рівень – подання: самодостатня веб-сторінка `solar_charging_subsystem.html`, що отримує результати у форматі JSON і відображає їх інтерактивно.

Структура програми відповідає задачам, сформульованим у розділах 2 і 3.2. Модулі підсистеми забезпечують повний цикл роботи: від підготовки вхідних даних і розрахунку сонячного надлишку до планування заряджання, оцінювання показників ефективності та подання результатів у браузерному dashboard. Така модульна організація є зручною для перевірки, подальшого розширення та адаптації підсистеми до інших наборів даних або сценаріїв роботи домашньої енергосистеми.

3.5 Інтерфейс програми та подання результатів

Для подання результатів роботи програмної підсистеми розроблено браузерний dashboard-інтерфейс (рис. 3.10). Його призначення полягає в тому, щоб надати користувачу не лише числові результати розрахунків, але й наочне графічне представлення роботи підсистеми. Такий формат є зручним для аналізу погодинних профілів PV-генерації, побутового навантаження, графіка заряджання електромобіля, а також для порівняння різних сценаріїв планування заряджання.

Інтерфейс реалізовано у файлі `solar_charging_subsystem.html` як автономну HTML-сторінку українською мовою. У коді сторінки передбачено підключення бібліотеки Chart.js для побудови графіків, використання HTML для структурування сторінки, CSS для оформлення елементів dashboard та JavaScript для обробки даних, зміни параметрів і оновлення результатів у

браузері. У HTML-файлі також вбудовано дані для моделювання, зокрема масиви дат, погодинної PV-генерації, споживання, типового навантаження будинку, добових значень генерації та споживання, а також параметри електромобіля й заряджання.

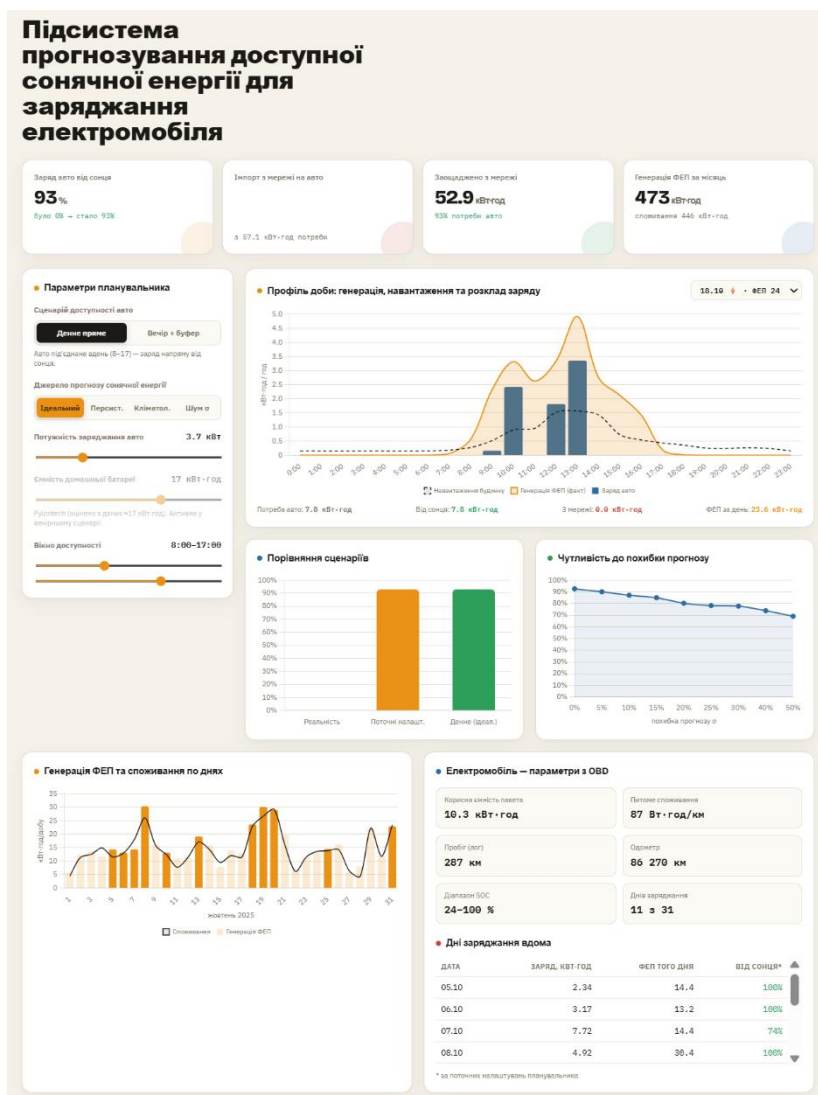


Рисунок 3.10 – Dashboard-інтерфейс програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для заряджання електромобіля

У верхній частині dashboard розміщено назву підсистеми та основні узагальнені показники. До них належать частка заряджання електромобіля від сонячної енергії, імпорт електроенергії з мережі для заряджання, економія імпорту з мережі та сумарна генерація фотоелектричної системи за місяць.

Наприклад, у представленому варіанті інтерфейсу показано, що частка заряджання автомобіля від сонячної енергії становить 93 %, заощадження імпорту з мережі – 52,9 кВт·год, а генерація ФЕП за місяць – 473 кВт·год. Таке подання дозволяє швидко оцінити загальний результат роботи планувальника без детального перегляду всіх графіків.

Ліва частина інтерфейсу містить панель параметрів планувальника (рис. 3.11). У ній користувач може змінювати сценарій доступності електромобіля, джерело прогнозу сонячної енергії, потужність заряджання, ємність домашньої батареї та часовий інтервал доступності автомобіля. Передбачено два основні сценарії доступності: денне пряме заряджання та вечірнє заряджання з використанням буфера. Денний сценарій відповідає ситуації, коли електромобіль підключений у години сонячної генерації та може заряджатися безпосередньо від доступного PV-надлишку. Вечірній сценарій передбачає, що сонячна енергія може бути попередньо накопичена в домашній батареї та використана пізніше.

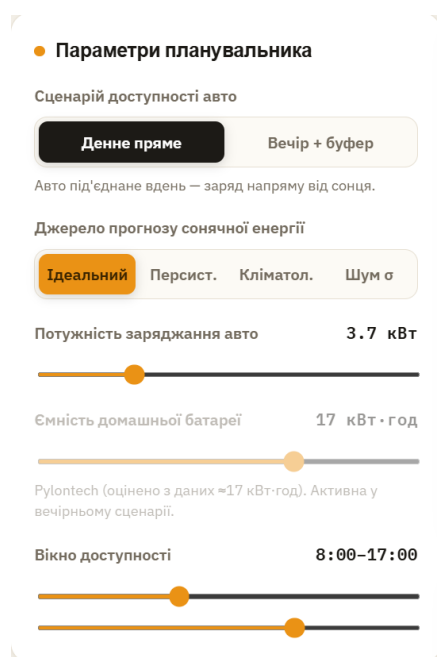


Рисунок 3.11 – Панель параметрів планувальника заряджання

Окремо в інтерфейсі реалізовано вибір джерела прогнозу сонячної енергії. Користувач може обрати ідеальний прогноз, персистентний прогноз, кліматологічний прогноз або прогноз із випадковою похибкою. Це відповідає моделі оцінювання прогнозу, описаній у розділі 2, і дозволяє проаналізувати, як зниження якості прогнозу впливає на частку заряджання електромобіля від сонця. Для сценарію з похибкою прогнозу передбачено регулятор значення σ , що дає змогу змінювати рівень відносної похибки.

Центральним елементом dashboard є графік добового профілю (рис. 3.12), на якому одночасно відображаються генерація ФЕП, побутове навантаження та запланований заряд електромобіля. Такий графік дозволяє візуально перевірити, чи збігається заряджання з годинами наявності сонячного надлишку. У верхній частині цього блоку передбачено вибір конкретного дня жовтня 2025 року. Для кожного дня відображаються погодинні значення генерації, навантаження та заряджання, а під графіком подаються підсумкові значення: потреба електромобіля в енергії, енергія від сонця, енергія з мережі та добова генерація ФЕП.



Рисунок 3.12 – Добовий графік генерації, навантаження та заряджання електромобіля

Нижче розміщено блок порівняння сценаріїв. Він показує, як змінюється частка сонячної енергії в заряджанні для різних варіантів: фактичної поведінки системи, поточних налаштувань планувальника та денного ідеального сценарію. Це дає змогу оцінити ефект від застосування розробленого алгоритму порівняно з базовим режимом заряджання. Поруч наведено графік чутливості до похибки прогнозу, який показує зменшення частки заряджання від сонця при збільшенні відносної похибки прогнозу. Такий блок є важливим для аналізу стійкості підсистеми до неточності прогнозних даних.

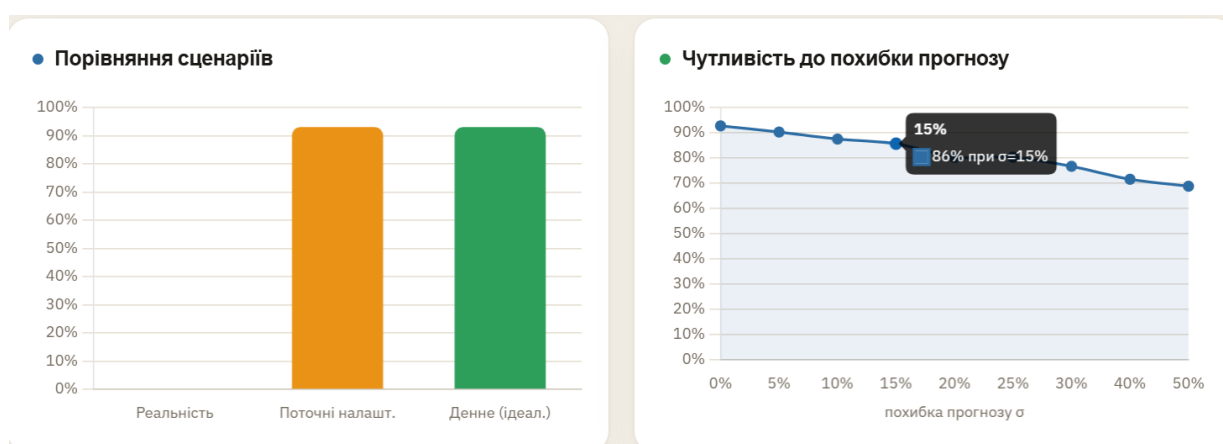


Рисунок 3.13 – Порівняння сценаріїв заряджання та чутливість до похибки прогнозу

У нижній частині інтерфейсу подано графік добової генерації ФЕП і споживання за місяць (рис. 3.14). На ньому можна порівняти добові значення сонячної генерації та загального споживання будинку, а також побачити дні, у які відбувалося заряджання електромобіля. Це дозволяє оцінити загальний енергетичний контекст роботи системи протягом розрахункового періоду.

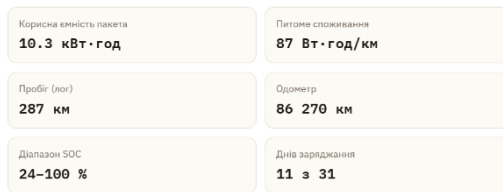
● Генерация ФЕП та споживання по днях



Рисунок 3.14 – Місячні профілі генерації ФЕП та споживання

Окремий блок dashboard присвячено параметрам електромобіля, отриманим або підготовленим на основі OBD-даних (рис. 3.15). У ньому наведено корисну ємність батарейного пакета, питоме споживання, пробіг, одометр, діапазон SOC та кількість днів заряджання. Також відображається таблиця днів заряджання вдома із зазначенням дати, енергії заряджання, генерації ФЕП у відповідний день і частки енергії, отриманої від сонця. Це дає змогу пов'язати результати планування не лише з PV-генерацією, але й з фактичною потребою електромобіля в заряджанні.

● Електромобіль — параметри з OBD



● Дні заряджання вдома

| | | | |
|-------|------|------|------|
| 08.10 | 4.92 | 30.4 | 100% |
| 10.10 | 5.27 | 13.1 | 86% |
| 13.10 | 4.05 | 19.2 | 100% |
| 18.10 | 7.75 | 23.6 | 100% |
| 19.10 | 2.90 | 30.1 | 100% |

* за поточних налаштувань планувальника

Рисунок 3.15 – Місячні дані заряджання електромобіля

Для кращого розуміння функцій інтерфейсу основні його елементи узагальнено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні елементи dashboard-інтерфейсу програмної підсистеми

| Елемент інтерфейсу | Призначення |
|---|---|
| Панель основних показників | Відображення частки заряджання від сонця, імпорту з мережі, економії імпорту та місячної генерації ФЕП |
| Панель параметрів планувальника | Вибір сценарію доступності EV, джерела прогнозу, потужності заряджання, ємності батареї та часового вікна |
| Добовий графік профілів | Порівняння PV-генерації, побутового навантаження та графіка заряджання в межах обраної доби |
| Порівняння сценаріїв | Оцінювання ефективності поточного сценарію відносно базового та ідеального варіантів |
| Графік чутливості до похибки прогнозу | Аналіз впливу похибки прогнозу PV-генерації на частку заряджання від сонця |
| Місячний графік генерації та споживання | Порівняння добових значень PV-генерації та споживання за розрахунковий місяць |
| Блок параметрів електромобіля | Подання характеристик EV, пробігу, SOC і кількості днів заряджання |
| Таблиця днів заряджання | Відображення дат заряджання, потреби в енергії, добової PV-генерації та частки енергії від сонця |

Особливістю реалізованого інтерфейсу є те, що всі основні розрахунки та оновлення графіків виконуються безпосередньо в браузері. У JavaScript-кодї сторінки реалізовано функції для формування прогнозу PV-генерації, розрахунку сонячного надлишку, побудови денного графіка заряджання, моделювання вечірнього сценарію з домашньою батареєю, порівняння сценаріїв та розрахунку узагальнених показників. Зміна параметрів у панелі керування автоматично оновлює відповідні графіки й числові індикатори, що робить інтерфейс придатним для аналізу різних варіантів роботи підсистеми.

Розроблений dashboard-інтерфейс забезпечує наочне подання результатів моделювання та дозволяє користувачу оцінити ефективність запропонованого планування заряджання. Він поєднує числові показники, добові та місячні графіки, порівняння сценаріїв і параметри електромобіля. Завдяки цьому користувач може не лише побачити підсумкову частку сонячної енергії в заряджанні, але й зрозуміти, у які часові інтервали та за яких умов досягається цей результат.

3.6 Тестування програми та аналіз результатів

Тестування програмної підсистеми виконувалося з метою перевірки правильності реалізації алгоритму планування заряджання електромобіля, відповідності програмних розрахунків математичній моделі, а також оцінювання ефективності запропонованого підходу порівняно з базовим сценарієм заряджання. Основна увага приділялася тому, чи здатна підсистема визначати доступний сонячний надлишок, формувати погодинний графік заряджання та розраховувати показники використання PV-енергії й імпорту електроенергії з мережі.

Для перевірки працездатності програмної підсистеми було використано підготовлений набір даних, який містить погодинні профілі роботи домашньої енергосистеми за жовтень 2025 року. До складу даних входять значення генерації фотоелектричної системи, побутового споживання, добової потреби електромобіля в заряджанні, а також параметри електромобіля, отримані або підготовлені на основі OBD-даних. У dashboard-інтерфейсі зазначено, що всі обчислення виконуються на основі погодинних даних Victron за жовтень 2025 року, а базове навантаження будинку визначається як усереднений профіль днів без заряджання електромобіля. Характеристики даних для тестування програмної підсистеми представлені в таблиці 3.6. Наведені дані дозволяють перевірити роботу підсистеми в умовах реального добового та місячного профілю генерації і споживання. Вибір жовтня 2025 року є доцільним для тестування, оскільки в цьому періоді присутні як дні з достатньою PV-

генерацією, так і дні з нижчим рівнем сонячної енергії. Це дає змогу оцінити не лише роботу алгоритму в сприятливих умовах, але й його поведінку при обмеженому сонячному надлишку.

Таблиця 3.6 – Характеристики даних для тестування програмної підсистеми

| Характеристика | Значення / опис |
|---|---|
| Розрахунковий період | Жовтень 2025 року |
| Кількість днів у вибірці | 31 день |
| Часовий крок даних | 1 година |
| Кількість часових інтервалів | 744 інтервали |
| Джерело енергетичних даних | Погодинні дані домашньої енергосистеми Victron |
| Основні енергетичні профілі | PV-генерація, побутове споживання, типовий профіль навантаження будинку |
| Загальна генерація ФЕП за місяць | 473 кВт·год |
| Загальне споживання будинку за місяць | 446 кВт·год |
| Кількість днів із заряджанням електромобіля вдома | 11 днів із 31 |
| Загальна потреба EV в енергії за місяць | 57,1 кВт·год |
| Корисна ємність батарейного пакета EV | 10,3 кВт·год |
| Питоме споживання EV | 87 Вт·год/км |
| Пробіг за OBD-логом | 287 км |
| Діапазон SOC за даними EV | 24–100 % |
| Одометр | 86 270 км |
| Базова частка заряджання від сонця | 0 % |
| Основний сценарій перевірки | Перенесення заряджання на години з найбільшим сонячним надлишком |
| Формат подання результатів | Браузерний dashboard з графіками, KPI-блоками та таблицею днів заряджання |

Розрахунки виконуються на основі погодинних даних Victron за жовтень 2025 року, а базове навантаження будинку визначено як усереднений профіль днів без заряджання електромобіля. Реальна поведінка системи за цей період характеризується 57,1 кВт·год енергії, використаної для заряджання електромобіля, при цьому фактична частка заряджання від сонця становила 0%. Екранна форма с прикладом тестування системи представлено на рис. 3.16.

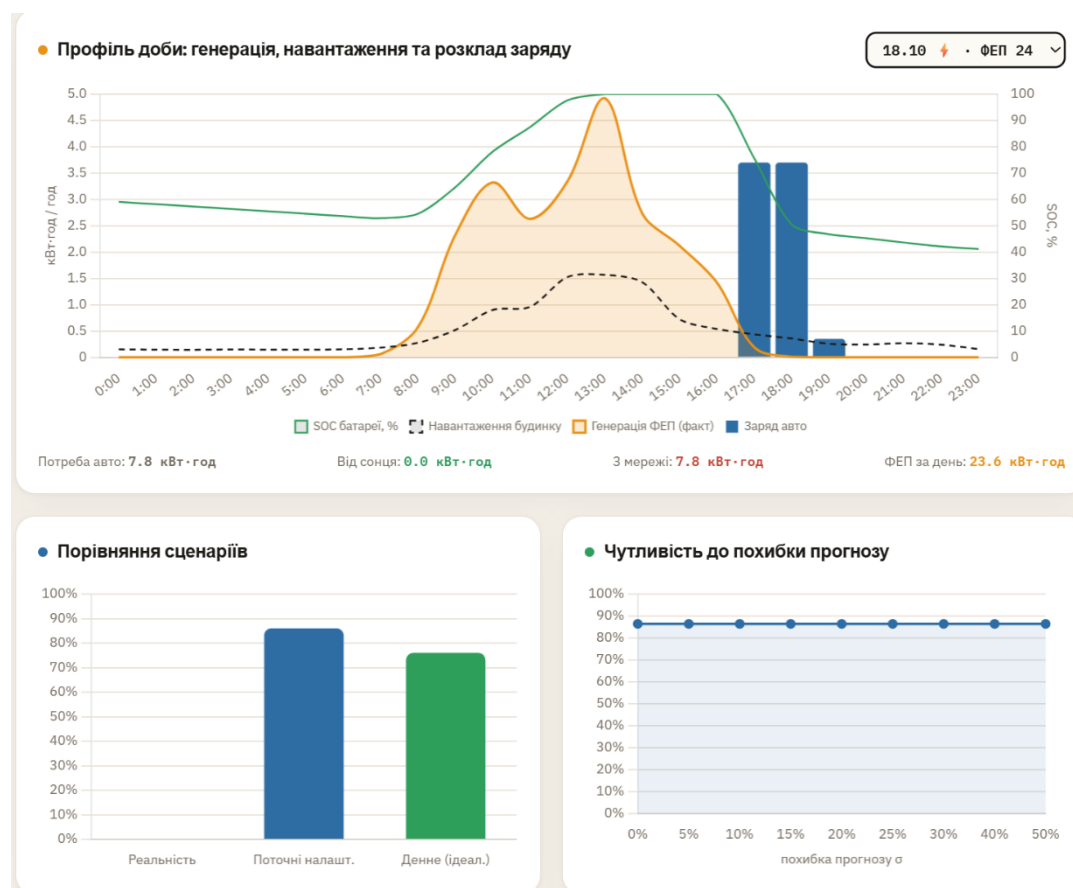


Рисунок 3.16 – Добові профілі PV-генерації, побутового навантаження та заряджання електромобіля для вибраного дня (18.10.2025) з порівнянням сценаріїв

Тестування виконувалося за кількома напрямками. По-перше, перевірялася коректність обробки вхідних даних і формування погодинних профілів PV-генерації, побутового навантаження та заряджання. По-друге,

аналізувалася робота алгоритму планування в денному сценарії, коли електромобіль доступний у період сонячної генерації. По-третє, перевірявся сценарій вечірнього заряджання з використанням домашнього акумуляторного накопичувача. По-четверте, оцінювався вплив якості прогнозу сонячної генерації на частку заряджання від PV-енергії.

Першим етапом тестування було порівняння базової поведінки системи із запропонованим алгоритмом планування. За розрахунковий період фотоелектрична система виробила 473 кВт·год, споживання будинку склало 446 кВт·год, а на заряджання електромобіля було витрачено 57,1 кВт·год протягом одинадцяти діб. Аналіз фактичних даних зарядної станції показав, що в наявній некерованій конфігурації заряджання повністю забезпечувалося електромережею: частка сонячної енергії становила 0 %. Цей результат відображає типову неузгодженість у часі між періодом сонячної генерації та фактичним підключенням автомобіля і слугує базою для оцінювання ефективності керування.

Застосування алгоритму планування з пріоритетним використанням сонячного надлишку істотно підвищує частку власної генерації. За доступності автомобіля в денному вікні (8:00–17:00) частка сонячної енергії зросла з 0 % до 93 %: із 57,1 кВт·год потреби 52,9 кВт·год покрито власною генерацією, а імпорт з мережі для заряджання скоротився приблизно до 4,2 кВт·год. Для випадку вечірньої доступності досліджено сценарій із домашнім накопичувачем (17 кВт·год), що запасає денний надлишок і живить автомобіль після заходу сонця; у цьому режимі частка сонячної енергії склала 86 %. Порівняння сценаріїв наведено на рис. 3.17. Результати порівняння базового та запропонованого сценаріїв наведено в таблиці 3.7.

Отримані значення свідчать, що основний резерв підвищення ефективності полягає не в збільшенні генерації, а в перенесенні заряджання на години сонячного надлишку. Додатково встановлено вплив часового вікна доступності: денне вікно забезпечує 93 %, звужене опівденне (11:00–15:00) –

79 %, а суто вечірнє без буферування – 0 %, що підтверджує визначальну роль часової доступності автомобіля.

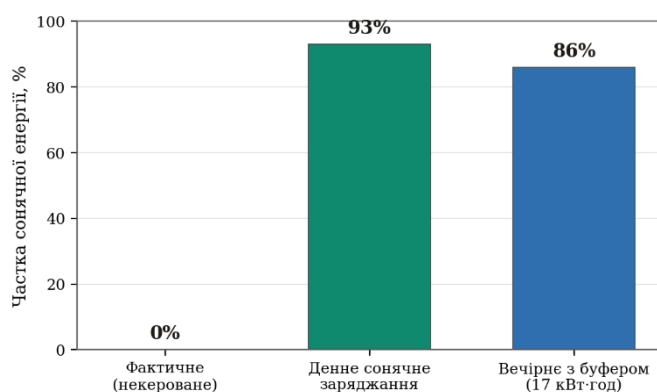


Рисунок 3.17 – Частка сонячної енергії за сценаріями заряджання

Таблиця 3.7 – Порівняння базового та solar-aware сценаріїв заряджання

| Показник | Базове заряджання | Solar-aware планування |
|--|-------------------|------------------------|
| Загальна потреба EV в енергії, кВт·год | 57,1 | 57,1 |
| Енергія від PV-системи, кВт·год | 0,0 | 52,9 |
| Енергія з мережі, кВт·год | 57,1 | 4,2 |
| Частка PV-енергії в заряджанні, % | 0 | 93 |
| Економія імпорту з мережі, кВт·год | – | 52,9 |

Для вечірнього сценарію досліджено залежність частки сонячної енергії від корисної ємності домашнього накопичувача. Зі збільшенням ємності показник монотонно зростає: 22 % за 5 кВт·год, 72 % за 10 кВт·год та 86 % за 17 кВт·год (рис. 3.18).

Характер залежності виявляє насичення: приріст ефективності сповільнюється зі збільшенням ємності. Це означає, що накопичувач здатний майже повністю компенсувати часову неузгодженість, проте подальше нарощування його ємності понад певний рівень дає дедалі менший вигравш.

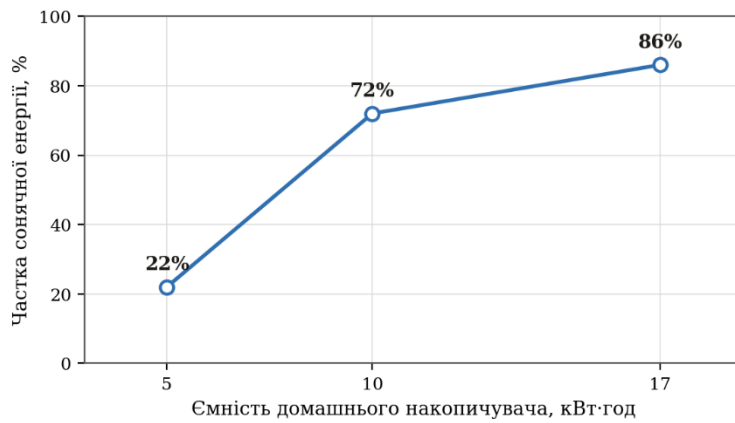


Рисунок 3.18 – Залежність частки сонячної енергії від ємності накопичувача

Роботу підсистеми в режимі прогнозного керування оцінено за принципом «планування за прогнозом – оцінювання за фактом». За ідеального прогнозу частка сонячної енергії досягає 93 %, за кліматологічного прогнозу – 77 %, за прогнозу на основі персистентності – 64 %. Дослідження чутливості до випадкової похибки прогнозу показало поступове зниження показника зі зростанням невизначеності: 88 % за $\sigma = 10 \%$, 83 % за $\sigma = 20 \%$, 76 % за $\sigma = 30 \%$ та 69 % за $\sigma = 50 \%$ (рис. 3.19).

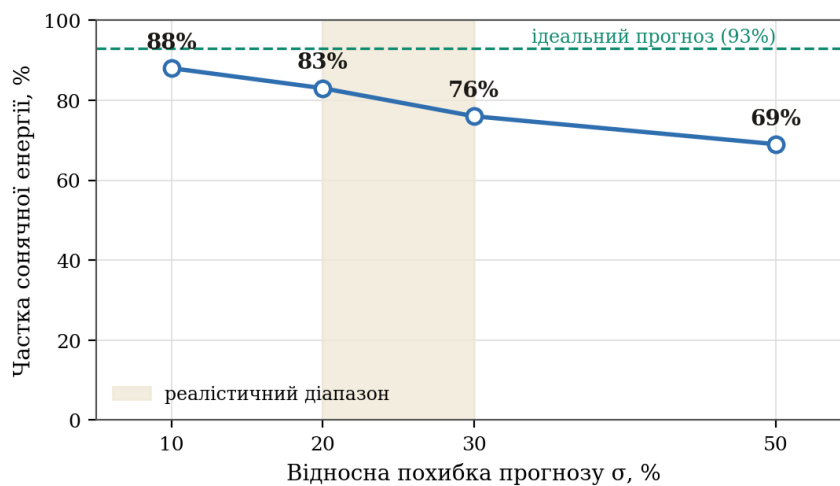


Рисунок 3.19 – Стійкість частки сонячної енергії до похибки прогнозу

З урахуванням того, що реальна похибка добового метеопрогнозу зазвичай лежить у межах 20–30 %, очікувана ефективність підсистеми в практичних умовах становить приблизно 76–83 %. Помірне зниження показника навіть за значної невизначеності свідчить про стійкість запропонованого алгоритму до неточності прогнозу.

Оброблення діагностичних логів електромобіля енергетичним методом дало змогу визначити корисну ємність тягової батареї (близько 10,3 кВт·год) та питоме споживання (близько 87 Вт·год/км за пробігу 287 км і діапазону стану заряду 24–100 %). Для домашнього накопичувача за тим самим методом оцінено корисну ємність близько 17 кВт·год. Ці параметри, отримані безпосередньо з реальних даних, забезпечили коректність розрахунку потреби автомобіля в енергії та моделювання роботи буфера.

Сукупні результати підтверджують працездатність та ефективність розробленої підсистеми. Перехід від некерованого заряджання до прогнозного планування підвищує частку власної сонячної енергії з 0 % до 93 % у разі денної доступності автомобіля та до 86 % у разі вечірнього заряджання з буферуванням, а за реалістичної невизначеності прогнозу очікуваний рівень становить 76–83 %. Відповідно, імпорт електроенергії з мережі для заряджання зменшується в кілька разів. Отримані результати кількісно демонструють, що основним джерелом підвищення ефективності є узгодження моменту заряджання з періодом сонячної генерації, а домашній накопичувач є дієвим, хоча й не безмежним, засобом подолання часової неузгодженості.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано програмну реалізацію підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля. Обґрунтовано вибір Python для розрахункової частини та браузерного dashboard, реалізованого за допомогою HTML, CSS, JavaScript і Chart.js, для наочного подання результатів.

Сформульовано вимоги до підсистеми, побудовано її функціональну модель у нотації IDEF0, описано структуру програми, порядок зберігання файлів та призначення основних модулів. Модульна організація забезпечує підготовку вхідних профілів, планування заряджання, оцінювання прогнозу, аналіз сценарію з домашньою батареєю та формування даних для dashboard.

Розроблений інтерфейс дозволяє переглядати основні показники, добові профілі генерації, навантаження і заряджання, порівняння сценаріїв та вплив похибки прогнозу. Це дає змогу користувачу оцінити, у які періоди заряджання електромобіля може виконуватися переважно за рахунок сонячної енергії.

Тестування на погодинних даних за жовтень 2025 року показало, що при загальній потребі електромобіля 57,1 кВт·год застосування solar-aware планування дозволило забезпечити 52,9 кВт·год від PV-системи, зменшити імпорт з мережі до 4,2 кВт·год і підвищити частку заряджання від сонця з 0 % до 93 %. Отримані результати підтверджують працездатність підсистеми та доцільність прогнозного планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі з фотоелектричною генерацією.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організаційно-правові основи забезпечення охорони праці

Охорона праці є невід'ємною складовою виробничої діяльності та спрямована на забезпечення безпечних і здорових умов праці, збереження життя та здоров'я працівників, попередження виробничого травматизму й професійних захворювань. В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій особливого значення набуває створення безпечних умов праці для спеціалістів, діяльність яких пов'язана з використанням персональних комп'ютерів та сучасних інформаційних систем.

Основними нормативно-правовими документами, що регулюють питання охорони праці в Україні, є Конституція України [19], Закон України «Про охорону праці» [20], Кодекс цивільного захисту України [21], Кодекс законів про працю України, Закон України «Про пожежну безпеку», а також державні стандарти та санітарні норми [22-25].

Закон України «Про охорону праці» визначає основні принципи державної політики у сфері безпеки праці, права та обов'язки працівників і роботодавців, а також порядок організації системи управління охороною праці на підприємствах.

Під час виконання робіт із розробки програмного забезпечення особливу увагу приділяють організації робочого місця, правильному розташуванню комп'ютерної техніки, дотриманню норм освітлення, температурного режиму, вологості повітря, рівня шуму та електромагнітного випромінювання.

Сучасне робоче місце програміста повинно відповідати ергономічним вимогам, забезпечувати правильне положення тіла працівника та мінімізувати статичне навантаження на опорно-руховий апарат. Раціональна організація праці дозволяє підвищити продуктивність роботи та знизити ризик виникнення професійних захворювань.

Для працівників, діяльність яких пов'язана з постійною роботою за комп'ютером, рекомендується робити короткочасні перерви через кожні 50–60

хвилин роботи. Це дозволяє знизити навантаження на органи зору, нервову систему та опорно-руховий апарат.

Важливим напрямком охорони праці є також проведення інструктажів з техніки безпеки, пожежної безпеки та цивільного захисту, а також постійний контроль технічного стану електрообладнання.

4.2 Виявлення потенційних небезпек стосовно об'єкта проектування

Об'єктом проектування є програмна підсистема прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі.

Розробка виконується на персональному комп'ютері в офісному приміщенні. Робота має інтелектуальний характер та характеризується тривалим перебуванням у сидячому положенні, використанням комп'ютерної техніки та постійною концентрацією уваги.

Під час виконання роботи можливий вплив небезпечних та шкідливих виробничих факторів, представлених в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

| № | Небезпека | Джерело | Можливі наслідки |
|---|------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1 | Ураження електричним струмом | Комп'ютер та електромережа | Електротравми |
| 2 | Перевтома органів зору | Монітор | Погіршення зору |
| 3 | Порушення постави | Тривале сидіння | Захворювання хребта |
| 4 | Психоемоційне перенапруження | Високе інтелектуальне навантаження | Стрес |
| 5 | Пожежа | Коротке замикання | Матеріальні збитки |
| 6 | Відключення електроживлення | Аварії мережі | Втрата інформації |
| 7 | Повітряна тривога | Воєнні дії | Загроза життю |

Найбільш характерними небезпеками є статичне навантаження на організм, перевтома очей, психологічне напруження та ризики, пов'язані з використанням електрообладнання.

Особливу увагу необхідно приділяти організації робочого місця. Висота столу та крісла повинна відповідати антропометричним параметрам працівника, а монітор повинен знаходитися на відстані 60–70 см від очей.

Освітлення робочого місця повинно бути рівномірним і не створювати відблисків на поверхні екрана монітора. Оптимальна температура повітря повинна становити 20–24 °С, а відносна вологість – 40–60 %.

4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек та розробка заходів щодо їх попередження

Для оцінювання виробничих ризиків використовується метод якісного аналізу, який враховує ймовірність виникнення небезпечної події та тяжкість її наслідків.

Теоретичні основи оцінювання професійних ризиків представлено в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Оцінка ризиків

| Небезпека | Ймовірність | Наслідки | Рівень ризику |
|----------------------|-------------|-------------|---------------|
| Електротравма | Низька | Високі | Середній |
| Перевтома очей | Висока | Середні | Високий |
| Порушення постави | Висока | Середні | Високий |
| Стрес | Середня | Середні | Середній |
| Пожежа | Низька | Високі | Середній |
| Відключення живлення | Середня | Низькі | Низький |
| Повітряна тривога | Низька | Дуже високі | Середній |

Одним із ключових елементів сучасної системи управління охороною праці є оцінка професійних ризиків. Вона являє собою систематичний процес

виявлення небезпек, аналізу умов праці, визначення ймовірності виникнення небезпечних подій та оцінювання тяжкості можливих наслідків для здоров'я і життя працівників.

Основною метою оцінювання ризиків є своєчасне виявлення факторів, які можуть спричинити виробничий травматизм, професійні захворювання, аварії або інші небажані події, а також розроблення ефективних заходів щодо їх запобігання. Проведення оцінки ризиків дозволяє роботодавцю не лише виконувати вимоги законодавства у сфері охорони праці, а й підвищувати рівень безпеки праці, зменшувати економічні втрати від нещасних випадків та забезпечувати стабільність виробничих процесів.

Відповідно до сучасних підходів управління охороною праці, оцінювання ризиків повинно проводитися на всіх робочих місцях незалежно від виду діяльності підприємства. В Україні необхідність управління професійними ризиками передбачена Законом України «Про охорону праці», а також міжнародними стандартами серії ISO 45001, які регламентують функціонування систем менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці.

Організація та проведення оцінки ризиків покладається на роботодавця. До виконання відповідних робіт можуть залучатися служба охорони праці підприємства, керівники структурних підрозділів, фахівці з охорони праці, технічні експерти, а також безпосередні працівники, які найкраще обізнані з особливостями виконання робіт. Участь працівників у процесі оцінювання ризиків є важливою складовою, оскільки дозволяє врахувати практичний досвід та виявити небезпеки, які можуть бути непомітними під час формального аналізу.

Процедура оцінювання ризиків зазвичай включає декілька послідовних етапів:

- Виявлення небезпек та потенційно небезпечних факторів.
- Визначення працівників або груп працівників, які можуть зазнати негативного впливу.
- Аналіз імовірності виникнення небезпечної події.

- Оцінювання можливих наслідків та їх тяжкості.
- Визначення рівня ризику.
- Розроблення та впровадження заходів щодо зниження ризиків.
- Контроль ефективності впроваджених заходів та періодичний перегляд результатів оцінювання.

Для проведення оцінки ризиків використовуються різні методи. Вибір конкретного методу залежить від складності виробничого процесу, кількості небезпечних факторів, наявності статистичних даних та необхідного рівня деталізації аналізу. Найбільш поширеними є якісні, кількісні та комбіновані методи оцінювання ризиків.

Якісні методи базуються на експертній оцінці ймовірності та наслідків небезпечних подій. Вони є простими у застосуванні та широко використовуються для оцінювання ризиків на офісних робочих місцях і під час виконання робіт, що не пов'язані зі значною техногенною небезпекою. До таких методів належать контрольні листи (Check Lists), метод «Що буде, якщо?» (What-If Analysis), матриця ризиків та експертне оцінювання.

Кількісні методи передбачають використання статистичних даних, математичних моделей та розрахунків частоти виникнення небезпечних подій. Вони застосовуються переважно на складних виробництвах, у транспортній галузі, енергетиці та хімічній промисловості.

Комбіновані методи поєднують переваги якісного та кількісного аналізу і дозволяють отримати більш об'єктивні результати оцінювання.

Для робочого місця розробника програмного забезпечення найбільш доцільним є використання якісного методу оцінювання ризиків із застосуванням матриці ризику. Це пояснюється тим, що діяльність програміста характеризується відносно невеликою кількістю небезпечних виробничих факторів, а основні ризики пов'язані з ергономічними, психофізіологічними та електротехнічними чинниками. Метод матриці ризику дозволяє швидко визначити пріоритетність небезпек та обрати необхідні профілактичні заходи.

Під час оцінювання ризику враховуються два основні показники: ймовірність виникнення небезпечної події та тяжкість її можливих наслідків. Рівень ризику визначається шляхом поєднання цих показників у спеціальній матриці. Чим вищою є ймовірність події та серйознішими її наслідки, тим вищим буде рівень ризику і тим більшої уваги потребуватиме його зниження.

Для мінімізації ризиків рекомендується реалізувати комплекс організаційних та технічних заходів, представлених в Таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Заходи щодо зниження ризиків

| Небезпека | Заходи |
|-------------------|---|
| Електротравма | Перевірка електромережі та заземлення |
| Перевтома очей | Перерви кожні 60 хвилин |
| Порушення постави | Ергономічне крісло та правильна посадка |
| Стрес | Раціональний режим праці |
| Пожежа | Наявність вогнегасника та автоматичного захисту |
| Втрата даних | Використання ДБЖ та резервного копіювання |
| Повітряна тривога | Дотримання алгоритму евакуації |

Застосування сучасних ергономічних меблів, використання якісного освітлення, підтримання оптимального мікроклімату, проведення регулярних інструктажів та резервне копіювання даних дозволяють значно підвищити рівень безпеки праці.

Додатково доцільно використовувати джерела безперебійного живлення, сучасні системи автоматичного захисту електромережі та програмні засоби резервного збереження інформації, що особливо актуально під час роботи над програмними комплексами.

Висновки до розділу 4

У розділі проведено аналіз умов праці розробника програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, проведено оцінювання ризиків їх реалізації та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів щодо їх мінімізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено задачу розробки програмної підсистеми прогнозування доступної сонячної енергії для планування заряджання електромобіля в домашній енергосистемі. Актуальність роботи обумовлена зростанням кількості електромобілів, поширенням домашніх фотоелектричних систем та необхідністю підвищення частки власного використання сонячної енергії для побутових потреб і заряджання електротранспорту.

У процесі виконання роботи:

- проаналізовано предметну область, сучасні підходи до інтелектуального заряджання електромобілів та використання PV-генерації;
- визначено основні параметри моделі та сформовано математичну модель розрахунку доступного сонячного надлишку;
- розроблено алгоритм планування заряджання електромобіля з пріоритетним використанням сонячної енергії;
- реалізовано програмну підсистему на Python із dashboard-інтерфейсом для аналізу та візуалізації результатів;
- проведено тестування підсистеми на погодинних даних домашньої енергосистеми за жовтень 2025 року.

Розроблена модель враховує енергетичний баланс домашньої системи, доступний сонячний надлишок, технічні обмеження заряджання та часову доступність електромобіля. Програмна реалізація забезпечує обробку погодинних даних, планування заряджання, оцінювання прогнозу та аналіз різних сценаріїв роботи системи.

Результати тестування показали, що без узгодження заряджання з періодами PV-генерації частка сонячної енергії в заряджанні становила 0 %, тоді як використання запропонованого підходу дозволило збільшити цей показник до 93 %. При загальній потребі електромобіля 57,1 кВт·год від PV-

системи було забезпечено 52,9 кВт·год, а імпорт електроенергії з мережі скоротився до 4,2 кВт·год.

Отримані результати підтверджують, що перенесення заряджання на години з найбільшим сонячним надлишком дозволяє суттєво зменшити залежність від електромережі. Також встановлено, що точність прогнозу PV-генерації безпосередньо впливає на ефективність планування заряджання.

Таким чином, мету роботи досягнуто: створено програмну підсистему, яка дозволяє прогнозувати доступну сонячну енергію, планувати заряджання електромобіля та підвищувати рівень використання власної PV-генерації в домашній енергосистемі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Electric vehicle charging. Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging> (дата звернення: 07.06.2026).
2. International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Trends in electric car markets. Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-electric-car-markets-2> (дата звернення: 07.06.2026).
3. Elli. Charging with the sun: Why combining solar panels, EVs, and smart charging technology is worth it. Elli / Volkswagen Group Charging & Energy. URL: <https://www.elli.eco/en/about-elli/news/newsroom/charging-with-the-sun-why-combining-solar-panels-evs-and-smart-charging-technology-is-worth-it> (дата звернення: 07.06.2026).
4. Kallio S., Siroux M. A Review – Home Renewable Energy Management Systems in Smart Grids. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1050. Article 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/1050/1/012001.
5. Qiu Y. L., Wang Y. D., Iseki H., Shen X., Xing B., Zhang H. Empirical grid impact of in-home electric vehicle charging differs from predictions. Resource and Energy Economics. 2022. Vol. 67. Article 101275. DOI: 10.1016/j.reseneeco.2021.101275.
6. Fachrizal R., van der Meer D., Munkhammar J. Direct forecast of solar irradiance for EV smart charging scheme to improve PV self-consumption at home. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). 2021. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE52324.2021.9640149.
7. Shakeel S. R., Yousaf H., Irfan M., Rajala A. Solar PV adoption at household level: Insights based on a systematic literature review. Energy Strategy Reviews. 2023. Vol. 50. Article 101178. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101178.
8. Masika J. W., Muriithi C. M., Apiyo E. O., Mbura C. M., Mwanza S. K. Energy Management System for Solar and Grid System. 2023.

9. Ameer A., Berrada A., Emrani A. Intelligent energy management system for smart home with grid-connected hybrid photovoltaic/gravity energy storage system. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 72. Article 108525. DOI: 10.1016/j.est.2023.108525.
10. Bakare M. S., Abdulkarim A., Zeeshan M., Shuaibu A. N. A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction. *Energy Informatics*. 2023. Vol. 6. Article 4. DOI: 10.1186/s42162-023-00262-7.
11. Sahu S., Pal S. An Overview of the Home Energy Management Systems Considering Different Types of Power Scheduling Techniques and Strategies. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2023. Vol. 10, Issue 10. P. 741–751.
12. Python Software Foundation. Python 3 Documentation. URL: <https://docs.python.org/3/> (дата звернення: 07.06.2026). Офіційна документація Python описує мову, стандартну бібліотеку та базові засоби роботи з програмами.
13. The pandas development team. pandas documentation. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/> (дата звернення: 07.06.2026). У документації pandas бібліотека визначається як засіб для високопродуктивних і зручних структур даних та інструментів аналізу даних у Python.
14. NumPy Developers. NumPy documentation. URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (дата звернення: 07.06.2026). NumPy подається як базовий пакет для наукових обчислень у Python, що підтримує масиви та швидкі математичні операції над ними.
15. Matplotlib Development Team. Matplotlib documentation. URL: <https://matplotlib.org/stable/> (дата звернення: 07.06.2026). Matplotlib описується як бібліотека для створення статичних, анімованих та інтерактивних візуалізацій у Python.

16. Scikit-learn developers. scikit-learn: Machine Learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/> (дата звернення: 07.06.2026). Офіційна сторінка scikit-learn характеризує бібліотеку як інструмент для прогнозного аналізу даних і машинного навчання в Python.
17. MDN Web Docs. Resources for Developers, by Developers. URL: <https://developer.mozilla.org/> (дата звернення: 07.06.2026).
18. Chart.js. Open source HTML5 Charts for your website. URL: <https://www.chartjs.org/> (дата звернення: 07.06.2026).
19. Закон України «Про охорону праці».
20. Кодекс законів про працю України.
21. Кодекс цивільного захисту України.
22. ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування».
23. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення».
24. ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».
25. НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників».

ДОДАТОК А

ВХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ

ОВД-дані електромобілю

| Дата | Початок | Кінець | Тривал., хв | SoC поч., % | SoC кін., % | Пробіг, км | Спожив., Вт·год/км | Енергія, Вт·год |
|------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------------|-----------------|
| 2025-10-05 | 2025-10-05 12:41:59 | 2025-10-05 12:47:25 | 5.4 | 66.4 | 66.6 | 0 | 87 | -12 |
| 2025-10-05 | 2025-10-05 13:10:16 | 2025-10-05 13:13:22 | 3.1 | 70.5 | 71 | 0 | 87 | -49 |
| 2025-10-05 | 2025-10-05 14:36:15 | 2025-10-05 15:02:03 | 25.8 | 87.6 | 81.3 | 7.4 | 90 | 657 |
| 2025-10-05 | 2025-10-05 17:32:18 | 2025-10-05 17:42:46 | 10.5 | 76.5 | 74.7 | 2.9 | 89 | 185 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 10:18:43 | 2025-10-06 10:24:36 | 5.9 | 64.4 | 64.2 | 0 | 86 | 19 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 13:50:59 | 2025-10-06 14:01:39 | 10.7 | 74.9 | 69.3 | 6.6 | 94 | 599 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 15:33:14 | 2025-10-06 15:50:28 | 17.2 | 67.5 | 59.4 | 5.5 | 90 | 846 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 21:20:11 | 2025-10-06 21:20:51 | 0.7 | 38.5 | 38.4 | 0 | 91 | 11 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 21:23:02 | 2025-10-06 21:31:36 | 8.6 | 38.9 | 38.1 | 4.1 | 80 | 81 |
| 2025-10-06 | 2025-10-06 22:49:44 | 2025-10-06 23:03:52 | 14.1 | 31.7 | 23.7 | 5 | 87 | 775 |
| 2025-10-07 | 2025-10-07 11:43:55 | 2025-10-07 11:44:31 | 0.6 | 24.1 | 24.1 | 0 | 85 | -9 |
| 2025-10-07 | 2025-10-07 13:44:02 | 2025-10-07 14:30:34 | 46.5 | 47.1 | 34.7 | 14 | 83 | 1225 |
| 2025-10-07 | 2025-10-07 16:54:47 | 2025-10-07 16:57:17 | 2.5 | 59.1 | 59.5 | 0 | 84 | -43 |
| 2025-10-07 | 2025-10-07 18:52:43 | 2025-10-07 19:08:19 | 15.6 | 69.4 | 65 | 6.6 | 91 | 459 |
| 2025-10-07 | 2025-10-07 19:59:42 | 2025-10-07 20:12:49 | 13.1 | 63.7 | 56 | 5.1 | 86 | 799 |
| 2025-10-08 | 2025-10-08 09:42:59 | 2025-10-08 09:54:17 | 11.3 | 56.9 | 58.4 | 0 | 83 | -155 |
| 2025-10-08 | 2025-10-08 16:41:16 | 2025-10-08 17:05:15 | 24 | 94.8 | 88.4 | 7.3 | 85 | 677 |
| 2025-10-08 | 2025-10-08 18:12:29 | 2025-10-08 18:14:05 | 1.6 | 84.5 | 84.2 | 0.2 | 90 | 26 |
| 2025-10-08 | 2025-10-08 18:15:04 | 2025-10-08 18:29:23 | 14.3 | 84 | 79.9 | 3.4 | 85 | 421 |
| 2025-10-08 | 2025-10-08 18:59:34 | 2025-10-08 19:13:30 | 13.9 | 80 | 72.3 | 5.7 | 87 | 795 |
| 2025-10-09 | 2025-10-09 19:57:30 | 2025-10-09 20:10:47 | 13.3 | 71.9 | 69.9 | 5.5 | 80 | 200 |
| 2025-10-09 | 2025-10-09 21:09:22 | 2025-10-09 21:21:49 | 12.5 | 69 | 61.2 | 5.1 | 87 | 783 |
| 2025-10-10 | 2025-10-10 10:28:30 | 2025-10-10 10:35:52 | 7.4 | 66.4 | 67 | 0.1 | 89 | -60 |
| 2025-10-10 | 2025-10-10 11:27:56 | 2025-10-10 11:42:43 | 14.8 | 76.5 | 74 | 6.1 | 81 | 253 |
| 2025-10-10 | 2025-10-10 11:48:14 | 2025-10-10 12:04:52 | 16.6 | 74 | 66.9 | 5.4 | 85 | 724 |
| 2025-10-10 | 2025-10-10 20:12:52 | 2025-10-10 20:21:40 | 8.8 | 95 | 92.1 | 3.8 | 83 | 309 |
| 2025-10-10 | 2025-10-10 22:53:54 | 2025-10-10 23:02:12 | 8.3 | 78.4 | 73.5 | 3.2 | 85 | 516 |
| 2025-10-12 | 2025-10-12 14:51:37 | 2025-10-12 14:56:12 | 4.6 | 67.4 | 66.5 | 2.1 | 84 | 91 |
| 2025-10-12 | 2025-10-12 15:31:51 | 2025-10-12 15:36:55 | 5.1 | 66.9 | 63.9 | 2.2 | 88 | 314 |
| 2025-10-13 | 2025-10-13 17:41:54 | 2025-10-13 17:43:24 | 1.5 | 99 | 98.9 | 0.1 | 91 | 10 |
| 2025-10-14 | 2025-10-14 13:35:26 | 2025-10-14 13:52:33 | 17.1 | 93.9 | 83.9 | 11 | 86 | 1095 |
| 2025-10-14 | 2025-10-14 14:45:26 | 2025-10-14 14:48:54 | 3.5 | 83 | 82 | 1 | 83 | 106 |
| 2025-10-14 | 2025-10-14 15:19:36 | 2025-10-14 16:01:04 | 41.5 | 82 | 69.7 | 11 | 89 | 1306 |
| 2025-10-15 | 2025-10-15 14:57:18 | 2025-10-15 15:12:56 | 15.6 | 63 | 57 | 5.1 | 91 | 618 |
| 2025-10-15 | 2025-10-15 15:25:51 | 2025-10-15 15:37:30 | 11.6 | 56.6 | 51.7 | 2.3 | 94 | 498 |
| 2025-10-15 | 2025-10-15 20:44:02 | 2025-10-15 20:54:55 | 10.9 | 57.4 | 55.5 | 5 | 88 | 193 |
| 2025-10-15 | 2025-10-15 21:54:52 | 2025-10-15 22:11:06 | 16.2 | 54.4 | 45.9 | 5.7 | 88 | 866 |
| 2025-10-16 | 2025-10-16 16:41:46 | 2025-10-16 16:49:26 | 7.7 | 46.6 | 43.6 | 2.9 | 92 | 295 |
| 2025-10-17 | 2025-10-17 14:31:19 | 2025-10-17 14:36:17 | 5 | 43.9 | 43.8 | 1.8 | 87 | 12 |
| 2025-10-17 | 2025-10-17 14:44:24 | 2025-10-17 14:49:13 | 4.8 | 44 | 40.5 | 1.8 | 92 | 343 |
| 2025-10-18 | 2025-10-18 11:05:40 | 2025-10-18 11:19:03 | 13.4 | 40.4 | 36.1 | 4.6 | 89 | 423 |
| 2025-10-18 | 2025-10-18 12:18:30 | 2025-10-18 12:34:35 | 16.1 | 36 | 31.6 | 4.4 | 82 | 426 |
| 2025-10-18 | 2025-10-18 14:17:30 | 2025-10-18 14:19:06 | 1.6 | 54 | 54.3 | 0 | 85 | -26 |
| 2025-10-18 | 2025-10-18 17:42:04 | 2025-10-18 17:43:12 | 1.1 | 94.9 | 94.8 | 0 | 88 | 13 |
| 2025-10-18 | 2025-10-18 20:52:28 | 2025-10-18 21:07:18 | 14.8 | 90 | 88 | 5.2 | 86 | 204 |
| 2025-10-19 | 2025-10-19 15:33:33 | 2025-10-19 15:33:50 | 0.3 | 91.1 | 91.1 | 0 | 86 | -4 |
| 2025-10-19 | 2025-10-19 15:34:23 | 2025-10-19 15:46:11 | 11.8 | 91.1 | 86.4 | 5.9 | 86 | 498 |
| 2025-10-19 | 2025-10-19 17:48:40 | 2025-10-19 18:01:14 | 12.6 | 55.5 | 47.6 | 5.7 | 85 | 786 |
| 2025-10-20 | 2025-10-20 10:25:59 | 2025-10-20 10:32:02 | 6.1 | 47.9 | 47.7 | 0.1 | 146 | 19 |
| 2025-10-20 | 2025-10-20 15:41:13 | 2025-10-20 15:43:20 | 2.1 | 99.8 | 99.7 | 0 | 83 | 17 |
| 2025-10-21 | 2025-10-21 13:44:31 | 2025-10-21 13:55:44 | 11.2 | 93.8 | 83.4 | 9.5 | 82 | 1113 |
| 2025-10-21 | 2025-10-21 14:42:09 | 2025-10-21 14:55:23 | 13.2 | 76.4 | 74.5 | 2.7 | 82 | 198 |
| 2025-10-21 | 2025-10-21 15:17:15 | 2025-10-21 15:52:45 | 35.5 | 73.9 | 65.2 | 8.7 | 89 | 896 |

Сеанси заряджання електромобілю

| А | В |
|--------------|----------------|
| Дата | Заряд, кВт·год |
| 2025-10-05 | 2.34 |
| 2025-10-06 | 3.17 |
| 2025-10-07 | 7.72 |
| 2025-10-08 | 4.92 |
| 2025-10-10 | 5.27 |
| 2025-10-13 | 4.05 |
| 2025-10-18 | 7.75 |
| 2025-10-19 | 2.90 |
| 2025-10-20 | 6.11 |
| 2025-10-25 | 7.87 |
| 2025-10-31 | 5.02 |
| Разом | 57.12 |

Дані з системи Victron

Профіль навантаження

| Година | Навантаження, кВт-год |
|----------------|-----------------------|
| 0 | 0.151 |
| 1 | 0.145 |
| 2 | 0.143 |
| 3 | 0.148 |
| 4 | 0.146 |
| 5 | 0.143 |
| 6 | 0.152 |
| 7 | 0.184 |
| 8 | 0.274 |
| 9 | 0.517 |
| 10 | 0.899 |
| 11 | 0.956 |
| 12 | 1.524 |
| 13 | 1.565 |
| 14 | 1.429 |
| 15 | 0.724 |
| 16 | 0.539 |
| 17 | 0.435 |
| 18 | 0.357 |
| 19 | 0.256 |
| 20 | 0.243 |
| 21 | 0.266 |
| 22 | 0.240 |
| 23 | 0.155 |
| За добу | 11.59 |

Денні підсумки

| Дата | Генерація ФЕП, кВт-год | Споживання, кВт-год | Заряд ЕМ, кВт-год |
|--------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| 2025-10-01 | 5.74 | 4.46 | 0.00 |
| 2025-10-02 | 12.30 | 11.39 | 0.00 |
| 2025-10-03 | 13.67 | 12.51 | 0.00 |
| 2025-10-04 | 11.70 | 14.93 | 0.00 |
| 2025-10-05 | 14.36 | 11.54 | 2.34 |
| 2025-10-06 | 13.17 | 13.00 | 3.17 |
| 2025-10-07 | 14.38 | 17.92 | 7.72 |
| 2025-10-08 | 30.41 | 26.08 | 4.92 |
| 2025-10-09 | 16.13 | 15.71 | 0.00 |
| 2025-10-10 | 13.14 | 12.40 | 5.27 |
| 2025-10-11 | 11.14 | 7.70 | 0.00 |
| 2025-10-12 | 11.45 | 11.43 | 0.00 |
| 2025-10-13 | 19.16 | 17.16 | 4.05 |
| 2025-10-14 | 15.86 | 14.24 | 0.00 |
| 2025-10-15 | 7.92 | 9.49 | 0.00 |
| 2025-10-16 | 13.96 | 12.08 | 0.00 |
| 2025-10-17 | 13.12 | 11.44 | 0.00 |
| 2025-10-18 | 23.64 | 23.00 | 7.75 |
| 2025-10-19 | 30.10 | 26.64 | 2.90 |
| 2025-10-20 | 29.04 | 29.24 | 6.11 |
| 2025-10-21 | 19.80 | 16.10 | 0.00 |
| 2025-10-22 | 6.95 | 6.15 | 0.00 |
| 2025-10-23 | 11.41 | 11.54 | 0.00 |
| 2025-10-24 | 13.09 | 13.61 | 0.00 |
| 2025-10-25 | 14.53 | 13.86 | 7.87 |
| 2025-10-26 | 16.20 | 14.32 | 0.00 |
| 2025-10-27 | 5.97 | 6.38 | 0.00 |
| 2025-10-28 | 8.01 | 4.31 | 0.00 |
| 2025-10-29 | 21.86 | 22.28 | 0.00 |
| 2025-10-30 | 11.96 | 11.78 | 0.00 |
| 2025-10-31 | 22.91 | 23.36 | 5.02 |
| Разом | 473.1 | 446.1 | 57.1 |

Погодинні дані

| Час | Генерація ФЕП, кВт-год | Споживання, кВт-год |
|------------------|------------------------|---------------------|
| 2025-10-01 00:00 | 0.000 | 0.120 |
| 2025-10-01 01:00 | 0.000 | 0.150 |
| 2025-10-01 02:00 | 0.000 | 0.130 |
| 2025-10-01 03:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-01 04:00 | 0.000 | 0.160 |
| 2025-10-01 05:00 | 0.000 | 0.150 |
| 2025-10-01 06:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-01 07:00 | 0.300 | 0.180 |
| 2025-10-01 08:00 | 1.150 | 0.200 |
| 2025-10-01 09:00 | 1.290 | 0.170 |
| 2025-10-01 10:00 | 1.120 | 0.130 |
| 2025-10-01 11:00 | 0.410 | 0.160 |
| 2025-10-01 12:00 | 0.570 | 0.560 |
| 2025-10-01 13:00 | 0.180 | 0.180 |
| 2025-10-01 14:00 | 0.170 | 0.180 |
| 2025-10-01 15:00 | 0.150 | 0.160 |
| 2025-10-01 16:00 | 0.180 | 0.150 |
| 2025-10-01 17:00 | 0.160 | 0.140 |
| 2025-10-01 18:00 | 0.060 | 0.160 |
| 2025-10-01 19:00 | 0.000 | 0.220 |
| 2025-10-01 20:00 | 0.000 | 0.190 |
| 2025-10-01 21:00 | 0.000 | 0.190 |
| 2025-10-01 22:00 | 0.000 | 0.380 |
| 2025-10-01 23:00 | 0.000 | 0.120 |
| 2025-10-02 00:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 01:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 02:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 03:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 04:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 05:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-02 06:00 | 0.000 | 0.150 |
| 2025-10-02 07:00 | 0.160 | 0.270 |
| 2025-10-02 08:00 | 0.570 | 0.510 |
| 2025-10-02 09:00 | 1.200 | 0.350 |
| 2025-10-02 10:00 | 1.450 | 0.150 |
| 2025-10-02 11:00 | 0.600 | 0.170 |
| 2025-10-02 12:00 | 1.900 | 1.930 |
| 2025-10-02 13:00 | 2.810 | 4.190 |
| 2025-10-02 14:00 | 2.140 | 0.990 |
| 2025-10-02 15:00 | 1.070 | 0.160 |
| 2025-10-02 16:00 | 0.200 | 0.170 |
| 2025-10-02 17:00 | 0.160 | 0.190 |
| 2025-10-02 18:00 | 0.040 | 0.140 |
| 2025-10-02 19:00 | 0.000 | 0.210 |
| 2025-10-02 20:00 | 0.000 | 0.220 |
| 2025-10-02 21:00 | 0.000 | 0.190 |
| 2025-10-02 22:00 | 0.000 | 0.400 |
| 2025-10-02 23:00 | 0.000 | 0.160 |
| 2025-10-03 00:00 | 0.000 | 0.130 |
| 2025-10-03 01:00 | 0.000 | 0.120 |
| 2025-10-03 02:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-03 03:00 | 0.000 | 0.140 |
| 2025-10-03 04:00 | 0.000 | 0.140 |

Порівняння до та після

| Порівняння «до / після»: сирі фрагменти та результат фільтрації | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|
| 1. Очищення структури: вилучення рядка одиниць виміру | | | | |
| У сирілому експорті Вістрон другий рядок містить одиниці виміру; його вилучають, а значення приводять до числового типу. | | | | |
| До (сирій CSV): | | | | |
| timestamp | Solar Yield (delta) | PV to consumers | Battery to consumers | |
| Европе:Будапешт (+02:00) | kWh | kWh | kWh | |
| 2025-10-01 00:00:00 | | | 0.02 | |
| 2025-10-01 00:15:00 | | | 0.04 | |
| Після: | | | | |
| timestamp | PV to consumers, кВт-год | Battery to consumers, кВт-год | | |
| 2025-10-01 00:00:00 | 0 | 0.02 | | |
| 2025-10-01 00:15:00 | 0 | 0.04 | | |
| 2. Відновлення пропусків і агрегація 15 хв → 1 год | | | | |
| Поле «Solar Yield» порожнє, тому генерацію реконструюють як суму потоків ФЕП; 15-хвилинні значення підсумовують у години. | | | | |
| До (сирій, 15 хв; «Solar Yield» порожнє): | | | | |
| час | Solar Yield | PV to battery | PV to grid | PV to consumers |
| 2025-10-18 11:00 | — | 0.12 | — | 0.51 |
| 2025-10-18 11:15 | — | 0.27 | — | 0.25 |
| 2025-10-18 11:30 | — | 0.35 | — | 0.38 |
| 2025-10-18 11:45 | — | 0.35 | — | 0.4 |
| Після (погодино, реконструйовано): | | | | |
| час | Генерація E_PV(в), кВт-год | Примітка | | |
| 2025-10-18 11:00 | 2.63 | сума потоків ФЕП за годину | | |
| 3. Синхронізація часу: стан заряду 1 хв → 1 год | | | | |
| Хвилиничний рівень стану заряду усереднюють до годинного кроку, стільного з енергетичними профілями. | | | | |
| До (сирій, 1 хв): | | | | |
| час | SOC, % | | | |
| 2025-10-18 12:00 | 81 | | | |
| 2025-10-18 12:01 | 81 | | | |
| 2025-10-18 12:02 | 81 | | | |
| 2025-10-18 12:03 | 81 | | | |
| 2025-10-18 12:04 | 81 | | | |
| 2025-10-18 12:05 | 81 | | | |
| Після (погодино, середнє): | | | | |
| час | SOC (середнє за годину), % | | | |
| 2025-10-18 12:00 | 82.6 | | | |
| 4. Сегментна фільтрація OBD: відокремлення руху від стаціонару | | | | |
| Сполки з нульовими/низькими пробігом (стаціонар, діагностика) вилучають; для оцінювання стаціонарних лишають лише рух (пробіг > 0,5 км). | | | | |
| До (усі сполки, разом зі стаціонарними): | | | | |
| дата | трив., хв | пробіг, км | енергія, Вт-год | Вт-год/км |
| 2025-10-05 | 5.4 | 0 | -12 | 87 |
| 2025-10-05 | 3.1 | 0 | -49 | 87 |
| 2025-10-05 | 25.8 | 7.4 | 657 | 90 |
| 2025-10-05 | 10.5 | 2.9 | 185 | 89 |
| 2025-10-06 | 5.9 | 0 | 19 | 86 |
| Після (лише сполки руху, пробіг > 0,5 км): | | | | |
| дата | трив., хв | пробіг, км | енергія, Вт-год | Вт-год/км |
| 2025-10-05 | 25.8 | 7.4 | 657 | 90 |
| 2025-10-05 | 10.5 | 2.9 | 185 | 89 |

ДОДАТОК Б

КОД РОЗРОБЛЕНОЇ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

Лістинг Б.1 – Код Python-скрипта build_profiles.py

```
import pandas as pd, numpy as np

# --- EV charging days from EVCS report ---
ev_daily = { # date -> kWh charged at home (all from grid in reality)
'2025-10-05':2.34,'2025-10-06':3.17,'2025-10-07':7.72,'2025-10-08':4.92,
'2025-10-10':5.27,'2025-10-13':4.05,'2025-10-18':7.75,'2025-10-19':2.90,
'2025-10-20':6.11,'2025-10-25':7.87,'2025-10-31':5.02}

df = pd.read_csv('data/raw/524645_0_Brno_kwh_20251001-0000_to_20251031-2358.csv', skiprows=[1])
df['timestamp']=pd.to_datetime(df['timestamp'])
df['PV']=df[['PV to battery','PV to grid','PV to consumers']].sum(axis=1)
df['CONS']=df[['PV to consumers','Battery to consumers','Grid to consumers','Genset to consumers']].sum(axis=1)
df=df.set_index('timestamp')

# hourly solar generation & total consumption
solar_h = df['PV'].resample('1h').sum()
cons_h = df['CONS'].resample('1h').sum()
solar_h.name='solar'; cons_h.name='cons'
H = pd.concat([solar_h,cons_h],axis=1)
H['date']=H.index.date.astype(str); H['hour']=H.index.hour

# typical HOUSE-only hourly profile from days WITHOUT EV charging
non_ev = H[~H['date'].isin(ev_daily.keys())]
house_typical = non_ev.groupby('hour')['cons'].mean()

print('Typical house load (kWh/h), non-EV days:')
print(house_typical.round(2).to_string())
print(f'\nTypical daily house load: {house_typical.sum():.1f} kWh')
print(f'Total consumption (month): {cons_h.sum():.0f} kWh | Solar: {solar_h.sum():.0f} kWh')

H.to_csv('data/processed/hourly_victron.csv')
house_typical.to_csv('data/processed/house_typical_profile.csv')
print('saved hourly_victron.csv, house_typical_profile.csv')
```

Лістинг Б.2 – Код планувальника заряджання ЕМ за прогнозом доступної сонячної енергії charging_planner.py

Прототип планувальника заряджання ЕМ за прогнозом доступної сонячної енергії

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметри ЕМ та зарядної станції (з OBD/EVCS) #
PACK_KWH = 10.3 # корисна ємність пакета (енерг. оцінка з OBD)
CHARGE_KW = 3.7 # потужність заряджання, кВт (1-фазне; задається)
EFF = 0.92 # ККД заряджання (втрати AC->DC)

# Стратегії розкладу (24 год, крок 1 год) #
def schedule_immediate(need_kwh, surplus, window):
```

```

"""Одразу від початку вікна на повній потужності – поки не добереться need."""
plan = np.zeros(24)
left = need_kwh
for h in range(window[0], window[1]):
    if left <= 0:
        break
    e = min(CHARGE_KW, left)
    plan[h] = e
    left -= e
return plan

def schedule_solar_aware(need_kwh, surplus, window):
    """Жадібно: спершу години з найбільшим надлишком сонця в межах вікна."""
    plan = np.zeros(24)
    hours = list(range(window[0], window[1]))
    left = need_kwh
    # 1) забрати сонячний надлишок, від найбагатших годин
    for h in sorted(hours, key=lambda x: -surplus[x]):
        if left <= 0:
            break
        e = min(CHARGE_KW, surplus[h], left)
        if e > 0:
            plan[h] += e
            left -= e
    # 2) залишок (якщо сонця не вистачило) – найпізніші вільні години вікна
    for h in sorted(hours):
        if left <= 0:
            break
        e = min(CHARGE_KW - plan[h], left)
        if e > 0:
            plan[h] += e
            left -= e
    return plan

def evaluate(plan, surplus):
    """Скільки енергії плану покрито сонцем, скільки – з мережі."""
    solar_used = np.minimum(plan, surplus).sum()
    grid_used = plan.sum() - solar_used
    frac = solar_used / plan.sum() if plan.sum() > 0 else 0.0
    return dict(total=plan.sum(), solar=solar_used, grid=grid_used, solar_frac=frac)

# Прогін по реальних днях заряджання жовтня #
def run_month(hourly_csv, house_profile_csv, ev_daily, window=(8, 17)):
    H = pd.read_csv(hourly_csv, parse_dates=['timestamp'])
    house = pd.read_csv(house_profile_csv, index_col='hour')['cons']
    H['date'] = H['timestamp'].dt.strftime('%Y-%m-%d')
    H['hour'] = H['timestamp'].dt.hour

    res = []
    per_day_surplus = {}
    for day, need in ev_daily.items():
        d = H[H['date'] == day]
        solar_h = d.set_index('hour')['solar'].reindex(range(24), fill_value=0)
        surplus = np.maximum(0, solar_h.values - house.reindex(range(24)).values)
        per_day_surplus[day] = (solar_h.values, surplus)

        imm = evaluate(schedule_immediate(need, surplus, (17, 24)), surplus) # реальність: ввечері
        sa = evaluate(schedule_solar_aware(need, surplus, window), surplus)
        res.append(dict(date=day, need=need,
            imm_solar=imm['solar'], imm_grid=imm['grid'],
            sa_solar=sa['solar'], sa_grid=sa['grid'],
            sa_frac=sa['solar_frac']))
    R = pd.DataFrame(res)
    return R, per_day_surplus

def plot_day(day, solar_h, surplus, ev_daily, house_profile_csv, window=(8, 17),
    out='planner_day.png'):
    house = pd.read_csv(house_profile_csv, index_col='hour')['cons'].reindex(range(24)).values
    need = ev_daily[day]
    plan_imm = schedule_immediate(need, surplus, (17, 24))
    plan_sa = schedule_solar_aware(need, surplus, window)

```

```

hrs = np.arange(24)

fig, ax = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 4.8), sharey=True)
for a, plan, title in [(ax[0], plan_imm, 'Реальна поведінка: заряд одразу ввечері'),
                      (ax[1], plan_sa, 'Планувальник: заряд під сонячний надлишок')]:
    a.fill_between(hrs, 0, solar_h, step='mid', alpha=.35, color='orange', label='Генерація ФЕП')
    a.plot(hrs, house, 'k-', lw=1, label='Навантаження будинку')
    a.bar(hrs, plan, width=.8, color='tab:blue', alpha=.8, label='Заряд ЕМ')
    ev = evaluate(plan, surplus)
    a.set_title(f'{title}\nвід сонця: {ev["solar"]:.1f} кВт*год ({ev["solar_frac"]*100:.0f}%) | '
               f'з мережі: {ev["grid"]:.1f} кВт*год')
    a.set_xlabel('Година'); a.legend(fontsize=8); a.set_xticks(range(0, 24, 3))
ax[0].set_ylabel('кВт*год / год')
fig.suptitle(f'День {day}: потреба авто {need:.1f} кВт*год', fontweight='bold')
plt.tight_layout(); plt.savefig(out, dpi=130); plt.close()
return out

if __name__ == "__main__":
    EV_DAILY = {
        '2025-10-05':2.34,'2025-10-06':3.17,'2025-10-07':7.72,'2025-10-08':4.92,
        '2025-10-10':5.27,'2025-10-13':4.05,'2025-10-18':7.75,'2025-10-19':2.90,
        '2025-10-20':6.11,'2025-10-25':7.87,'2025-10-31':5.02}

    R, surpl = run_month('data/processed/hourly_victron.csv', 'data/processed/house_typical_profile.csv',
                        EV_DAILY, window=(8, 17))
    pd.set_option('display.width', 120)
    print(R.round(2).to_string(index=False))
    print()
    print(f"Сумарна потреба ЕМ:      {R.need.sum():.1f} кВт*год")
    print(f"РЕАЛЬНІСТЬ (заряд ввечері):  від сонця {R.imm_solar.sum():.1f} "
          f"({R.imm_solar.sum()/R.need.sum()*100:.0f}%), з мережі {R.imm_grid.sum():.1f} кВт*год")
    print(f"ПЛАНУВАЛЬНИК (сонячне вікно): від сонця {R.sa_solar.sum():.1f} "
          f"({R.sa_solar.sum()/R.need.sum()*100:.0f}%), з мережі {R.sa_grid.sum():.1f} кВт*год")
    print(f"Економія імпорту з мережі:  {R.imm_grid.sum()-R.sa_grid.sum():.1f} кВт*год")

    s, sp = surpl['2025-10-18']
    plot_day('2025-10-18', s, sp, EV_DAILY, 'data/processed/house_typical_profile.csv', out='planner_day.png')
    print("Графік дня: planner_day.png")

```

Лістинг Б.3 – Код файлу export_dashboard_data.py формування даних json

```

Формує data/processed/dash_data.json для вебінтерфейсу з оброблених профілів.
import pandas as pd, json
H=pd.read_csv('data/processed/hourly_victron.csv', parse_dates=['timestamp']).sort_values('timestamp')
H['date']=H['timestamp'].dt.strftime('%Y-%m-%d'); H['hour']=H['timestamp'].dt.hour
solarM=H.pivot_table(index='date',columns='hour',values='solar',aggfunc='sum').reindex(columns=range(24),fill_value=0)
consM =H.pivot_table(index='date',columns='hour',values='cons', aggfunc='sum').reindex(columns=range(24),fill_value=0)
house=pd.read_csv('data/processed/house_typical_profile.csv',index_col='hour')['cons'].reindex(range(24)).round(3).tolist()
ev={'2025-10-05':2.34,'2025-10-06':3.17,'2025-10-07':7.72,'2025-10-08':4.92,'2025-10-10':5.27,
   '2025-10-13':4.05,'2025-10-18':7.75,'2025-10-19':2.90,'2025-10-20':6.11,'2025-10-25':7.87,'2025-10-31':5.02}
data={'dates':list(solarM.index),
      'solar':[[round(x,3) for x in solarM.loc[d]] for d in solarM.index],
      'cons':[[round(x,3) for x in consM.loc[d]] for d in consM.index],
      'house':house,
      'dailyPV':[round(float(solarM.loc[d].sum()),2) for d in solarM.index],
      'dailyCons':[round(float(consM.loc[d].sum()),2) for d in consM.index],
      'evDaily':ev,
      'meta':{'pack_kwh':10.3,'whkm':87,'dist_km':287,'soc_min':24,'soc_max':100,'home_batt':17.0,
              'solar_total':473,'cons_total':446,'ev_total':57.1,'odo':86270,'charge_days':len(ev)}}
open('data/processed/dash_data.json','w').write(json.dumps(data,separators=(',',':')))
print('saved data/processed/dash_data.json')

```

Лістинг Б.4 – Код файлу forecast_eval.py прогнозу доступної сонячної енергії та планування заряджання

```

import numpy as np
import pandas as pd

```

```

import matplotlib.pyplot as plt

EV_KW = 3.7
WINDOW = (8, 17) # денне вікно доступності авто
RNG = np.random.default_rng(42)

EV_DAILY = {
    '2025-10-05':2.34,'2025-10-06':3.17,'2025-10-07':7.72,'2025-10-08':4.92,
    '2025-10-10':5.27,'2025-10-13':4.05,'2025-10-18':7.75,'2025-10-19':2.90,
    '2025-10-20':6.11,'2025-10-25':7.87,'2025-10-31':5.02}

def load_solar_matrix(hourly_csv):
    """День x година -> генерація ФЕП (кВт*год/год)."""
    H = pd.read_csv(hourly_csv, parse_dates=['timestamp']).sort_values('timestamp')
    H['date'] = H['timestamp'].dt.strftime('%Y-%m-%d')
    H['hour'] = H['timestamp'].dt.hour
    M = H.pivot_table(index='date', columns='hour', values='solar',
                      aggfunc='sum').reindex(columns=range(24), fill_value=0)
    return M

def make_forecast(M, kind, sigma=0.0):
    """Повертає матрицю прогнозу тієї ж форми, що й факт M."""
    days = list(M.index)
    F = M.copy().astype(float)
    if kind == 'perfect':
        return F
    if kind == 'climatology':
        clim = M.mean(axis=0)
        for d in days:
            F.loc[d] = clim.values
        return F
    if kind == 'persistence':
        for i, d in enumerate(days):
            F.loc[d] = M.iloc[i - 1].values if i > 0 else M.iloc[i].values
        return F
    if kind == 'noisy':
        noise = RNG.normal(1.0, sigma, size=M.shape)
        return (M.values * np.clip(noise, 0, None))
    raise ValueError(kind)

def schedule_from_forecast(need, fc_surplus):
    plan = np.zeros(24)
    hrs = list(range(WINDOW[0], WINDOW[1]))
    left = need
    for h in sorted(hrs, key=lambda x: -fc_surplus[x]):
        if left <= 0:
            break
        e = min(EV_KW, max(0, fc_surplus[h]), left)
        if e > 0:
            plan[h] += e; left -= e
    for h in sorted(hrs): # залишок – будь-які вільні години
        if left <= 0:
            break
        e = min(EV_KW - plan[h], left)
        if e > 0:
            plan[h] += e; left -= e
    return plan

def evaluate_against_actual(plan, act_surplus):
    """Скільки із запланованого заряду реально покритося фактичним сонцем."""
    solar = float(np.minimum(plan, np.maximum(0, act_surplus)).sum())
    return solar, plan.sum() - solar

def run(hourly_csv, house_csv, kind, sigma=0.0):
    M = load_solar_matrix(hourly_csv)
    house = pd.read_csv(house_csv, index_col='hour')['cons'].reindex(range(24)).values
    F = make_forecast(M, kind, sigma)
    Fdf = pd.DataFrame(F, index=M.index, columns=M.columns) if not isinstance(F, pd.DataFrame) else F

    tot_solar = tot_need = nrmse_acc = n = 0.0
    for day, need in EV_DAILY.items():
        act = M.loc[day].values
        fc = Fdf.loc[day].values
        act_surplus = np.maximum(0, act - house)
        fc_surplus = np.maximum(0, fc - house)
        plan = schedule_from_forecast(need, fc_surplus)
        s, _ = evaluate_against_actual(plan, act_surplus)
        tot_solar += s; tot_need += need
        # nRMSE прогнозу денної генерації (для зв'язку якість->результат)
        nrmse_acc += (act.sum() - fc.sum())**2; n += 1

```

```

day_nrmse = (np.sqrt(nrmse_acc / n) / M.loc[list(EV_DAILY)].values.sum(axis=1).mean())
return tot_solar / tot_need, day_nrmse

if __name__ == "__main__":
    HC, HP = 'data/processed/hourly_victron.csv', 'data/processed/house_typical_profile.csv'

    print("Денний планувальник: вплив джерела прогнозу на частку заряду від сонця")
    print("(план – за прогнозом, оцінка – за фактичною генерацією)\n")
    for kind in ['perfect', 'persistence', 'climatology']:
        frac, nrmse = run(HC, HP, kind)
        print(f" {kind:12s}: від сонця {frac*100:4.0f}% (nRMSE денної генерації {nrmse*100:3.0f}%)")

    print("\nПараметрична похибка прогнозу (емуляція метеомоделі), середнє по 20 реалізаціях:")
    for sigma in [0.10, 0.20, 0.30, 0.50]:
        fracs = [run(HC, HP, 'noisy', sigma)[0] for _ in range(20)]
        print(f" σ={sigma*100:2.0f}%: від сонця {np.mean(fracs)*100:4.0f}% "
              f"(розкид ±(np.std(fracs)*100:0f)%)")

```

Лістинг Б.5 – Код файлу meteo_pv_correlation.py з модулем збору метеоданих та валідації прогнозу сонячної генерації

```

import requests
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import r2_score, mean_absolute_error

# ПАРАМЕТРИ #
LAT, LON = 49.2528, 16.5792 # координати будинку
START, END = "2025-10-01", "2025-10-31" # період = період логів Victron
TIMEZONE = "Europe/Budapest" # та сама TZ, що у файлах Victron
VICTRON_KWH = "data/raw/524645_0_Brno_kwh_20251001-0000_to_20251031-2358.csv"

# Орієнтація панелей (для global_tilted_irradiance). Якщо невідома – лишити None,
# тоді предиктором буде shortwave_radiation (GHI на горизонт).
TILT, AZIMUTH = None, None # напр. TILT=35, AZIMUTH=0 (0=пд, -90=сх, 90=зх)

# 1. ЗБІР МЕТЕОДАНИХ (Open-Meteo Historical Weather API, без API-ключа) #
def fetch_meteo_daily() -> pd.DataFrame:
    """Денні суми радіації та середня температура за період."""
    daily_vars = ["shortwave_radiation_sum", "sunshine_duration",
                 "temperature_2m_mean"]
    params = {
        "latitude": LAT,
        "longitude": LON,
        "start_date": START,
        "end_date": END,
        "daily": ", ".join(daily_vars),
        "timezone": TIMEZONE,
    }
    url = "https://archive-api.open-meteo.com/v1/archive"
    r = requests.get(url, params=params, timeout=30)
    r.raise_for_status()
    d = r.json()["daily"]
    df = pd.DataFrame(d)
    df["date"] = pd.to_datetime(df["time"]).dt.date
    # shortwave_radiation_sum приходить у МДж/м^2; для зручності -> кВт*год/м^2
    df["GHI_kWh_m2"] = df["shortwave_radiation_sum"] / 3.6
    return df[["date", "GHI_kWh_m2", "sunshine_duration",
              "temperature_2m_mean"]]

def fetch_meteo_hourly() -> pd.DataFrame:
    """Погодинна радіація – для прогнозу всередині доби та планування заряджання.

    Якщо задано TILT/AZIMUTH, додатково тягнемо global_tilted_irradiance –
    радіацію на площину панелей (найближче до реального падіння на ФЕП).
    """
    hourly_vars = ["shortwave_radiation", "direct_radiation",
                  "diffuse_radiation", "direct_normal_irradiance",
                  "temperature_2m", "cloud_cover"]
    params = {
        "latitude": LAT,
        "longitude": LON,
        "start_date": START,
        "end_date": END,
        "hourly": ", ".join(hourly_vars),
        "timezone": TIMEZONE,
    }

```

```

if TILT is not None and AZIMUTH is not None:
    params["hourly"] += ",global_tilted_irradiance"
    params["tilt"] = TILT
    params["azimuth"] = AZIMUTH
url = "https://archive-api.open-meteo.com/v1/archive"
r = requests.get(url, params=params, timeout=30)
r.raise_for_status()
df = pd.DataFrame(r.json()["hourly"])
df["timestamp"] = pd.to_datetime(df["time"])
return df

# 2. РЕАЛЬНА ГЕНЕРАЦІЯ З VICTRON #
def load_victron_pv(path: str = VICTRON_KWH) -> pd.DataFrame:
    """Денна генерація ФЕП із VRM kWh-export.

    У цьому експорті колонка 'Solar Yield (delta)' порожня, тож реальну
    генерацію реконструюємо як суму потоків від PV:
    PV_total = PV to battery + PV to grid + PV to consumers
    (перевірено: сума за місяць = 473 кВт*год, збігається з дашбордом VRM).
    """
    df = pd.read_csv(path, skiprows=[1]) # 2-й рядок – одиниці виміру
    df["timestamp"] = pd.to_datetime(df["timestamp"])
    df["date"] = df["timestamp"].dt.date
    pv_cols = ["PV to battery", "PV to grid", "PV to consumers"]
    df["PV"] = df[pv_cols].sum(axis=1)
    daily = df.groupby("date")["PV"].sum().reset_index()
    daily.columns = ["date", "PV_kWh"]
    return daily

# 3. ЗВЕДЕННЯ ТА КОРЕЛЯЦІЯ #
def analyse():
    meteo = fetch_meteo_daily()
    pv = load_victron_pv()
    df = meteo.merge(pv, on="date").sort_values("date")

    # Кореляція радіація <-> генерація
    r = df["GHI_kWh_m2"].corr(df["PV_kWh"]) # Пірсон
    print(f"Коефіцієнт кореляції Пірсона (GHI vs PV): r = {r:.3f}")

    # Проста лінійна модель PV = a*GHI + b (a ~ ефективна площа*ККД*PR)
    X = df["GHI_kWh_m2"].values
    y = df["PV_kWh"].values
    model = LinearRegression().fit(X, y)
    y_hat = model.predict(X)
    print(f"PV = {model.coef_[0]:.2f} * GHI + {model.intercept_:.2f}")
    print(f"R^2 = {r2_score(y, y_hat):.3f} MAE = {mean_absolute_error(y, y_hat):.2f} кВт*год")

    # Графіки
    fig, ax = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 5))
    ax[0].plot(df["date"], df["PV_kWh"], "o-", label="ФЕП факт (Victron)")
    ax[0b] = ax[0].twinx()
    ax[0b].plot(df["date"], df["GHI_kWh_m2"], "s--", color="orange",
                label="GHI (Open-Meteo)")
    ax[0].set_ylabel("Генерація ФЕП, кВт*год/добу")
    ax[0b].set_ylabel("GHI, кВт*год/м^2/добу")
    ax[0].set_title("Денна генерація vs сонячна радіація")
    ax[0].tick_params(axis="x", rotation=45)

    ax[1].scatter(df["GHI_kWh_m2"], df["PV_kWh"])
    ax[1].plot(df["GHI_kWh_m2"], y_hat, "r-")
    ax[1].set_xlabel("GHI, кВт*год/м^2/добу")
    ax[1].set_ylabel("Генерація ФЕП, кВт*год/добу")
    ax[1].set_title(f"Перспекція (r={r:.3f}, R^2={r2_score(y, y_hat):.3f}")

    plt.tight_layout()
    plt.savefig("meteo_pv_correlation.png", dpi=130)
    print("Графік збережено: meteo_pv_correlation.png")
    return df, model

if __name__ == "__main__":
    analyse()

```

Лістинг Б.6 – Код файлу home_battery_buffer.py планування заряджання через батарею

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

```

```

# --- Домашня батарея (оцінено з даних Victron) ---
HOME_CAP = 17.0 # повна корисна ємність, кВт*год
SOC_MIN = 0.15 # резерв (не розряджати нижче)
SOC_MAX = 1.00
P_BATT = 5.0 # макс. потужність заряд/розряд, кВт
EFF_1WAY = 0.95 # однобічний ККД (round-trip ~0.90)

# --- EM ---
EV_KW = 3.7 # потужність заряджання авто, кВт

def dispatch_day(solar, house, ev, soc0_kwh):
    """Погодинна диспетчеризація доби. Повертає (grid_import, grid_export, soc_end).
    solar/house/ev – масиви по 24 год (кВт*год/год); soc0_kwh – стартовий запас."""
    E = soc0_kwh
    floor, ceil = HOME_CAP * SOC_MIN, HOME_CAP * SOC_MAX
    g_imp = g_exp = 0.0
    for h in range(24):
        net = solar[h] - house[h] - ev[h]
        if net >= 0: # надлишок -> у батарею, решта в мережу
            room = (ceil - E) / EFF_1WAY
            charge = min(net, room, P_BATT)
            E += charge * EFF_1WAY
            g_exp += net - charge
        else: # дефіцит -> з батареї, решта з мережі
            deficit = -net
            avail = (E - floor) * EFF_1WAY
            dis = min(deficit, avail, P_BATT)
            E -= dis / EFF_1WAY
            g_imp += deficit - dis
    return g_imp, g_exp, E

def ev_profile(need_kwh, window):
    """Розкласти потребу авто рівномірно з початку вікна на потужності EV_KW."""
    ev = np.zeros(24)
    left = need_kwh
    for h in range(window[0], window[1]):
        if left <= 0:
            break
        e = min(EV_KW, left)
        ev[h] = e
        left -= e
    return ev

def simulate_continuous(H, house, ev_series, soc_start_kwh):
    """Безперервна погодинна симуляція за весь період зі станом батареї, що
    переноситься з доби в добу. Повертає сумарний імпорт із мережі (кВт*год)."""
    E = soc_start_kwh
    floor, ceil = HOME_CAP * SOC_MIN, HOME_CAP * SOC_MAX
    g_imp = 0.0
    for i, (_, row) in enumerate(H.iterrows()):
        net = row['solar'] - house[row['hour']] - ev_series[i]
        if net >= 0:
            room = (ceil - E) / EFF_1WAY
            charge = min(net, room, P_BATT)
            E += charge * EFF_1WAY
        else:
            deficit = -net
            avail = (E - floor) * EFF_1WAY
            dis = min(deficit, avail, P_BATT)
            E -= dis / EFF_1WAY
            g_imp += deficit - dis
    return g_imp

def run_month(hourly_csv, house_csv, ev_daily, soc_start,
              ev_window=(17, 23)):
    """Маржинальний імпорт авто = (імпорт за місяць з авто) - (без авто).
    Так враховується, що віддана авто енергія батареї бракуватиме будинку згодом."""
    H = pd.read_csv(hourly_csv, parse_dates=['timestamp']).sort_values('timestamp')
    H['date'] = H['timestamp'].dt.strftime('%Y-%m-%d')
    H['hour'] = H['timestamp'].dt.hour
    H = H.reset_index(drop=True)
    house = pd.read_csv(house_csv, index_col='hour')['cons'].reindex(range(24)).values

    # синтетичний профіль заряду EM по всьому місяцю (ненульовий лише в дні заряджання)
    ev_series = np.zeros(len(H))
    for day, need in ev_daily.items():
        ev_day = ev_profile(need, ev_window)
        mask = (H['date'] == day).values
        idx = np.where(mask)[0]
        for h in range(24):
            sel = idx[(H.loc[idx, 'hour'] == h).values]

```

```

    if len(sel):
        ev_series[sel[0]] = ev_day[h]

g0 = simulate_continuous(H, house, np.zeros(len(H)), soc_start) # без авто
g1 = simulate_continuous(H, house, ev_series, soc_start) # з авто
need = sum(ev_daily.values())
ev_grid = max(0.0, g1 - g0)
return dict(need=need, ev_grid=ev_grid, ev_solar=need - ev_grid,
            solar_frac=(need - ev_grid) / need,
            grid_no_ev=g0, grid_with_ev=g1)

if __name__ == "__main__":
    EV_DAILY = {
        '2025-10-05':2.34,'2025-10-06':3.17,'2025-10-07':7.72,'2025-10-08':4.92,
        '2025-10-10':5.27,'2025-10-13':4.05,'2025-10-18':7.75,'2025-10-19':2.90,
        '2025-10-20':6.11,'2025-10-25':7.87,'2025-10-31':5.02}

# реальний стартовий SOC батареї на 01.10 (з логу Victron)
SOC_START = 0.80 * HOME_CAP

print("Вечірнє заряджання (вікно 17-23) + домашня батарея як буфер")
print("Безперервна симуляція за жовтень, стан батареї переноситься між добами\n")
for cap in [17.0, 10.0, 5.0]:
    globals()['HOME_CAP'] = cap
    r = run_month('data/processed/hourly_victron.csv', 'data/processed/house_typical_profile.csv',
                 EV_DAILY, 0.80 * cap, ev_window=(17, 23))
    print(f"Ємність батареї (cap:4.1f) кВт*год: ")
    print(f"від сонця {r['ev_solar']:5.1f} кВт*год ({r['solar_frac']*100:3.0f}%), ")
    print(f"з мережі {r['ev_grid']:4.1f} кВт*год")

print("\nДовідково:")
print(" без буфера, заряд лише ввечері (попередній етап): 0% (57.1 з мережі)")
print(" пряме денне сонячне заряджання (авто вдома вдень): 93% (4.2 з мережі)")

```

Лістинг Б.7 – Код файлу solar_charging_subsystem.html з дашборд планування заряджання електромобілю

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Підсистема прогнозування доступної сонячної енергії</title>
<link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
<link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
<link
href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Bricolage+Grotesque:opsz,wght@12..96,500;12..96,700;12..96,800&family=IBM+Plex+Mono:wght@400;500;600&
family=IBM+Plex+Sans:wght@400;500;600&display=swap" rel="stylesheet">
<script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/Chart.js/4.4.1/chart.umd.min.js"></script>
<style>
:root{
--bg:#F6F2EA; --panel:#FFFFFF; --panel2:#FCFAF5;
--ink:#1C1A16; --muted:#736B5E; --line:#E7E0D3;
--solar:#EA9215; --solar-soft:#FBE4BE;
--grid:#C44536; --batt:#2E6DA4; --green:#2E9E5B;
--shadow:0 1px 2px rgba(40,33,20,.04),0 8px 28px rgba(40,33,20,.06);
--radius:16px;
}
*{box-sizing:border-box}
body{margin:0;background:
radial-gradient(1200px 500px at 85% -10%, #FCEFD6 0%, transparent 60%),
radial-gradient(900px 400px at -5% 0%, #EAF1F7 0%, transparent 55%),
var(--bg);
color:var(--ink);font-family:"IBM Plex Sans",sans-serif;
--webkit-font-smoothing:antialiased;line-height:1.5}
.wrap{max-width:1280px;margin:0 auto;padding:28px 22px 60px}
.mono{font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-variant-numeric:tabular-nums}
/* header */
header{margin-bottom:22px;animation:rise .6s ease both}
.eyebrow{font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-size:11px;letter-spacing:.18em;
text-transform:uppercase;color:var(--solar);font-weight:600}
h1{font-family:"Bricolage Grotesque",sans-serif;font-weight:800;
font-size:clamp(24px,3.2vw,38px);line-height:1.05;margin:.25em 0 .15em;
letter-spacing:-.01em;max-width:22ch}
.sub{color:var(--muted);font-size:14px}
.sub b{color:var(--ink);font-weight:600}
/* layout */
.kpis{display:grid;grid-template-columns:repeat(4,1fr);gap:14px;margin:22px 0}
.grid{display:grid;grid-template-columns:330px 1fr;gap:18px;align-items:start}
@media(max-width:980px){.grid{grid-template-columns:1fr}.kpis{grid-template-columns:repeat(2,1fr)}}

```

```

.card{background:var(--panel);border:1px solid var(--line);border-radius:var(--radius);
box-shadow:var(--shadow);padding:18px;animation:rise .6s ease both}
.card h3{font-family:"Bricolage Grotesque",sans-serif;font-weight:700;font-size:15px;
margin:0 0 14px;letter-spacing:-.01em;display:flex;align-items:center;gap:8px}
.card h3 .dot{width:8px;height:8px;border-radius:50%}
/* kpi */
.kpi{position:relative;overflow:hidden}
.kpi .lab{font-size:12px;color:var(--muted);font-weight:500}
.kpi .val{font-family:"Bricolage Grotesque",sans-serif;font-weight:800;
font-size:30px;line-height:1.1;margin-top:6px;letter-spacing:-.02em}
.kpi .unit{font-size:14px;color:var(--muted);font-weight:600}
.kpi .delta{font-size:11px;font-family:"IBM Plex Mono",monospace;margin-top:4px}
.kpi::after{content:"";position:absolute;right:-20px;bottom:-20px;width:70px;height:70px;
border-radius:50%;opacity:.12}
.kpi.solar::after{background:var(--solar)} .kpi.grid::after{background:var(--grid)}
.kpi.save::after{background:var(--green)} .kpi.gen::after{background:var(--batt)}
/* controls */
.ctl{margin-bottom:16px}
.ctl:last-child{margin-bottom:0}
.ctl label{font-size:12px;font-weight:600;color:var(--muted);display:block;margin-bottom:7px}
.seg{display:flex;background:var(--panel2);border:1px solid var(--line);border-radius:10px;padding:3px;gap:3px}
.seg button{flex:1;border:0;background:transparent;font-family:inherit;font-size:12px;
font-weight:600;color:var(--muted);padding:8px 6px;border-radius:7px;cursor:pointer;transition:.18s}
.seg button.on{background:var(--ink);color:#fff;box-shadow:0 2px 8px rgba(0,0,0,.15)}
.seg.amber button.on{background:var(--solar);color:#3a2400}
input[type=range]{width:100%;accent-color:var(--solar);height:4px;cursor:pointer}
.rowval{display:flex;justify-content:space-between;align-items:baseline}
.rowval .v{font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-weight:600;font-size:13px}
.hint{font-size:11px;color:var(--muted);margin-top:6px;line-height:1.4}
.badge{display:inline-block;font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-size:10px;
padding:2px 7px;border-radius:20px;background:var(--solar-soft);color:#8a5200;font-weight:600}
/* charts */
.chartcard{position:relative}
.chartwrap{position:relative;height:240px}
.chartwrap.tall{height:300px}
.charts2{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:18px}
@media(max-width:860px){charts2{grid-template-columns:1fr}}
.daysel{display:flex;align-items:center;gap:10px;margin-bottom:12px;flex-wrap:wrap}
select{font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-size:12px;padding:6px 10px;border:1px solid var(--line);
border-radius:8px;background:var(--panel2);color:var(--ink);font-weight:600}
/* tables */
table{width:100%;border-collapse:collapse;font-size:12.5px}
th,td{text-align:right;padding:7px 8px;border-bottom:1px solid var(--line)}
th:first-child,td:first-child{text-align:left}
th{font-size:11px;color:var(--muted);font-weight:600;text-transform:uppercase;letter-spacing:.04em}
td.mono{font-family:"IBM Plex Mono",monospace}
.spec{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:10px}
.spec .it{background:var(--panel2);border:1px solid var(--line);border-radius:10px;padding:10px 12px}
.spec .it .k{font-size:11px;color:var(--muted)}
.spec .it .v{font-family:"IBM Plex Mono",monospace;font-weight:600;font-size:16px;margin-top:2px}
.flow{display:flex;align-items:center;justify-content:space-between;gap:6px;margin-top:6px;
font-size:11px;color:var(--muted)}
.footer{margin-top:30px;color:var(--muted);font-size:11.5px;line-height:1.6;
border-top:1px solid var(--line);padding-top:16px}
.stagger>*{animation:rise .6s ease both}
@keyframes rise{from{opacity:0;transform:translateY(10px)}to{opacity:1;transform:none}}
</style>
</head>
<body>
<div class="wrap">
<header>
<h1>Підсистема прогнозування доступної сонячної енергії для заряджання електромобіля</h1>
</header>

<div class="kpis stagger" id="kpis"></div>

<div class="grid">
<!-- CONTROL PANEL -->
<div class="card" style="animation-delay:.05s">
<h3><span class="dot" style="background:var(--solar)"></span>Параметри планування</h3>

<div class="ctl">
<label>Сценарій доступності авто</label>
<div class="seg" id="modeSeg">
<button data-v="daytime" class="on">Денне пряме</button>
<button data-v="evening">Вечір + буфер</button>
</div>
<div class="hint" id="modeHint">Авто під'єднане вдень (8–17) – заряд напряму від сонця.</div>
</div>

<div class="ctl">
<label>Джерело прогнозу сонячної енергії</label>
<div class="seg amber" id="fcSeg">
<button data-v="perfect" class="on">Ідеальний</button>
<button data-v="persistence">Персист.</button>

```

```

<button data-v="climatology">Кліматол.</button>
<button data-v="noisy">Шум  $\sigma$ </button>
</div>
</div>

<div class="ctl" id="sigmaCtl" style="display:none">
<div class="rowval"><label>Відносна похибка прогнозу  $\sigma$ </label><span class="v" id="sigmaV">20%</span></div>
<input type="range" id="sigma" min="0" max="50" value="20" step="5">
<div class="hint">Типова денна похибка метеомоделі для хмарного клімату ЦЕ  $\approx$  20–30%.</div>
</div>

<div class="ctl">
<div class="rowval"><label>Потужність заряджання авто</label><span class="v" id="pevV">3.7 кВт</span></div>
<input type="range" id="pev" min="1.4" max="11" value="3.7" step="0.1">
</div>

<div class="ctl" id="battCtl">
<div class="rowval"><label>Ємність домашньої батареї</label><span class="v" id="battV">17 кВт·год</span></div>
<input type="range" id="batt" min="0" max="25" value="17" step="1">
<div class="hint">PyLontech (оцінено з даних  $\approx$ 17 кВт·год). Активна у вечірньому сценарії.</div>
</div>

<div class="ctl" id="winCtl">
<div class="rowval"><label>Вікно доступності</label><span class="v" id="winV">8:00–17:00</span></div>
<input type="range" id="wins" min="0" max="22" value="8" step="1">
<input type="range" id="winE" min="2" max="24" value="17" step="1" style="margin-top:8px">
</div>
</div>

<!-- RESULT + DAY CHART -->
<div style="display:flex;flex-direction:column;gap:18px">
<div class="card chartcard" style="animation-delay:.1s">
<div class="daysel">
<h3 style="margin:0"><span class="dot" style="background:var(--solar)"></span>Профіль доби: генерація, навантаження та розклад заряду</h3>
<span style="flex:1"></span>
<select id="daySelect"></select>
</div>
<div class="chartwrap tall"><canvas id="dayChart"></canvas></div>
<div class="flow" id="dayFlow"></div>
</div>

<div class="charts2">
<div class="card chartcard" style="animation-delay:.15s">
<h3><span class="dot" style="background:var(--batt)"></span>Порівняння сценаріїв</h3>
<div class="chartwrap"><canvas id="scenChart"></canvas></div>
</div>
<div class="card chartcard" style="animation-delay:.2s">
<h3><span class="dot" style="background:var(--green)"></span>Чутливість до похибки прогнозу</h3>
<div class="chartwrap"><canvas id="fcChart"></canvas></div>
</div>
</div>
</div>
</div>

<div class="charts2" style="margin-top:18px">
<div class="card chartcard" style="animation-delay:.15s">
<h3><span class="dot" style="background:var(--solar)"></span>Генерація ФЕП та споживання по днях</h3>
<div class="chartwrap"><canvas id="monthChart"></canvas></div>
</div>
<div class="card" style="animation-delay:.2s">
<h3><span class="dot" style="background:var(--batt)"></span>Електромобіль – параметри з OBD</h3>
<div class="spec" id="vehSpec"></div>
<h3 style="margin:18px 0 10px"><span class="dot" style="background:var(--grid)"></span>Дні заряджання вдома</h3>
<div style="max-height:170px;overflow:auto">
<table id="evTable"><thead><tr><th>Дата</th><th>Заряд, кВт·год</th><th>ФЕП того дня</th><th>Від сонця*</th></tr></thead><tbody></tbody></table>
</div>
<div class="hint" style="margin-top:8px">* за поточних налаштувань планувальника</div>
</div>
</div>

<footer>
<b>Про модель.</b> Усі обчислення виконуються у браузері на реальних погодинних даних Victron за жовтень 2025.
Базове навантаження будинку – усереднений профіль днів без заряджання ЕМ. Доступний надлишок: <span class="mono">max(0, генерація –
навантаження)</span>.
Вечірній сценарій використовує безперервну симуляцію енергобалансу з домашньою батареєю (ККД 0.90, резерв 15%), атрибуція – за маржинальним
імпортом з мережі.
Прогноз: «план за прогнозом, оцінка за фактом». У робочій системі блок прогнозу заміщується викликом метеомодуля (Open-Meteo).
Реальна поведінка системи у жовтні: 57.1 кВт·год заряду авто, <b>0%</b> від сонця</b>.
</footer>
</div>

<script>
const DATA = {"dates":["2025-10-01","2025-10-02","2025-10-03","2025-10-04","2025-10-05","2025-10-06","2025-10-07","2025-10-08","2025-10-09","2025-10-10","2025-10-11","2025-10-12","2025-10-13","2025-10-14","2025-10-15","2025-10-16","2025-10-17","2025-10-18","2025-10-19","2025-10-20","2025-10-21","2025-10-22","2025-10-23","2025-10-24","2025-10-25","2025-10-26","2025-10-27","2025-10-28","2025-10-29","2025-10-30","2025-10-31"],"solar":{xxxxxx}};

```

```

const $s=>document.querySelector(s), $$s=>[...document.querySelectorAll(s)];
const CH={};
const C={solar:'#EA9215',solarSoft:'rgba(234,146,21,.18)',grid:'#C44536',batt:'#2E6DA4',
  green:'#2E9E5B',ink:'#1C1A16',muted:'#736B5E',line:'#E7E0D3',house:'#1C1A16'};
Chart.defaults.font.family=""IBM Plex Sans",sans-serif";
Chart.defaults.font.size=11;
Chart.defaults.color=C.muted;

// ----- state -----
const S={mode:'daytime',fc:'perfect',sigma:0.20,pev:3.7,batt:17,winS:8,winE:17,day:'2025-10-18'};
const EVDAYS=Object.keys(DATA.evDaily);
const HOME_EFF=0.95, SOC_MIN=0.15, P_BATT=5.0;

// ----- forecast -----
function dailyClimatology(){const c=Array(24).fill(0);DATA.solar.forEach(r=>r.forEach((v,h)=>c[h]+=v));return c.map(v=>v/DATA.solar.length);}
const CLIM=dailyClimatology();
function forecastDay(di){
  const act=DATA.solar[di];
  if(S.fc==='perfect')return act.slice();
  if(S.fc==='climatology')return CLIM.slice();
  if(S.fc==='persistence')return DATA.solar[di>0?di-1:di].slice();
  if(S.fc==='noisy')return act.map(v=>Math.max(0,v*(1+gauss()*S.sigma)));
  return act.slice();
}
let _sp=null;function gauss(){if(!_sp){const t=_sp,_sp=null;return t;}let u=0,v=0;while(!u)u=Math.random();while(!v)v=Math.random();const m=Math.sqrt(-
2*Math.log(u));_sp=m*Math.sin(2*Math.PI*v);return m*Math.cos(2*Math.PI*v);}
const surplus=(solar=>solar.map((v,h)=>Math.max(0,v-DATA.house[h]));

// ----- daytime planner -----
function scheduleDaytime(need,fcSurp){
  const plan=Array(24).fill(0);let left=need;
  const hrs=[];for(let h=S.winS;h<S.winE;h++)hrs.push(h);
  hrs.slice().sort((a,b)=>fcSurp[b]-fcSurp[a]).forEach(h=>{if(left<=0)return;const e=Math.min(S.pev,Math.max(0,fcSurp[h]),left);if(e>0){plan[h]+=e;left-=e;}});
  hrs.forEach(h=>{if(left<=0)return;const e=Math.min(S.pev-plan[h],left);if(e>0){plan[h]+=e;left-=e;}});
  return plan;
}
function evalPlan(plan,actSurp){let s=0;for(let h=0;h<24;h++)s+=Math.min(plan[h],Math.max(0,actSurp[h]));return{solar:s,grid:plan.reduce((a,b)=>a+b,0)-s};}

// ----- evening continuous battery sim -----
function evProfileEvening(need){const ev=Array(24).fill(0);let left=need;for(let h=17;h<23;h++){if(left<=0)break;const e=Math.min(S.pev,left);ev[h]=e;left-=e;return
ev;}
function simContinuous(evByDay){ // evByDay: di -> 24h array
  const cap=S.batt;const floor=cap*SOC_MIN,ceil=cap;let E=0.80*cap,gimp=0;
  for(let di=0;di<DATA.dates.length;di++){const sol=DATA.solar[di];const ev=evByDay[di]||Array(24).fill(0);
    for(let h=0;h<24;h++){const net=sol[h]-DATA.house[h]-ev[h];
      if(net>=0){const room=(ceil-E)/HOME_EFF;const c=Math.min(net,room,P_BATT);E+=c*HOME_EFF;}
      else{const d=-net;const av=(E-floor)*HOME_EFF;const dis=Math.min(d,av,P_BATT);E-=dis/HOME_EFF;gimp+=d-dis;}}
    return gimp;
  }
function eveningResult(){
  const need=EVDAYS.reduce((a,d)=>a+DATA.evDaily[d],0);
  const empty={},full={};
  DATA.dates.forEach((d,di)=>{if(!EVDAYS.includes(d))return;const n=DATA.evDaily[di];need+=n;
    const fc=forecastDay(di),act=DATA.solar[di];
    const plan=scheduleDaytime(n,surplus(fc));const e=evalPlan(plan,surplus(act));
    solar+=e.solar;grid+=e.grid;});
  return{need,solar,grid,frac:solar/need};
}
// ----- monthly aggregate for current settings -----
function monthlyResult(){
  if(S.mode==='evening')return eveningResult();
  let solar=0,grid=0,need=0;
  DATA.dates.forEach((d,di)=>{if(!EVDAYS.includes(d))return;const n=DATA.evDaily[di];need+=n;
    const fc=forecastDay(di),act=DATA.solar[di];
    const plan=scheduleDaytime(n,surplus(fc));const e=evalPlan(plan,surplus(act));
    solar+=e.solar;grid+=e.grid;});
  return{need,solar,grid,frac:solar/need};
}
// perfect-daytime reference (best case)
function refDaytimePerfect(){const sv=S.fc,sm=S.mode;S.fc='perfect';S.mode='daytime';const r=monthlyResult();S.fc=sv;S.mode=sm;return r.frac;}

// ----- KPIs -----
function renderKPIs(){
  const r=monthlyResult();const m=DATA.meta;
  const saved=m.ev_total-r.grid;
  const k=[
    {c:'solar',lab:'Заряд авто від сонця',val:(r.frac*100).toFixed(0),unit:'%',d:'було 0% → стало ${(r.frac*100).toFixed(0)}%',dc:C.green},
    {c:'grid',lab:'Імпорт з мережі на авто',val:r.grid.toFixed(1),unit:'кВт-год',d:'з ${m.ev_total} кВт-год потреби',dc:C.muted},
    {c:'save',lab:'Заощаджено з мережі',val:saved.toFixed(1),unit:'кВт-год',d:'${(saved/m.ev_total*100).toFixed(0)}% потреби авто',dc:C.green},
    {c:'gen',lab:'Генерація ФЕП за місяць',val:m.solar_total,unit:'кВт-год',d:'споживання ${m.cons_total} кВт-год',dc:C.muted},
  ];
  $('#kpis').innerHTML=k.map(x=><div class="card kpi ${x.c}"><div class="lab">${x.lab}</div>
<div class="val mono">${x.val}<span class="unit">${x.unit}</span></div>
<div class="delta" style="color:${x.dc}>${x.d}</div></div>`}.join("");
}

```

```

// ----- day chart -----
function renderDay(){
  const di=DATA.dates.indexOf(S.day);const act=DATA.solar[di],fc=forecastDay(di);
  const n=DATA.evDaily[S.day]||0;
  let plan,socTrace=null;
  if(S.mode==='daytime'){plan=scheduleDaytime(n,surplus(fc));}
  else{// single-day dispatch for visualization
    plan=evProfileEvening(n);const cap=S.batt,floor=cap*SOC_MIN,ceil=cap;let E=0.6*cap;socTrace=[];
    for(let h=0;h<24;h++){const net=act[h]-DATA.house[h]-plan[h];
      if(net>=0){const room=(ceil-E)/HOME_EFF;const c=Math.min(net,room,P_BATT);E+=c*HOME_EFF;}
      else{const d=-net;const av=(E-floor)*HOME_EFF;const dis=Math.min(d,av,P_BATT);E-=dis/HOME_EFF;}
      socTrace.push((cap>0?E/cap*100:0));}
  }
  const labels=[...Array(24).keys()].map(h=>h+'00');
  const ds=[
    {type:'line',label:'Генерація ФЕП (факт)',data:act,borderColor:C.solar,backgroundColor:C.solarSoft,fill:true,tension:.35,pointRadius:0,borderWidth:2,order:3},
    {type:'line',label:'Навантаження будинку',data:DATA.house,borderColor:C.house,borderDash:[5,4],fill:false,tension:.3,pointRadius:0,borderWidth:1.5,order:2},
    {type:'bar',label:'Заряд авто',data:plan,backgroundColor:C.batt,borderRadius:3,order:4,barPercentage:.9,categoryPercentage:.96},
  ];
  if(S.fc!=='perfect')ds.push({type:'line',label:'Генерація
(прогноз)',data:fc,borderColor:C.solar,borderDash:[2,3],fill:false,tension:.35,pointRadius:0,borderWidth:1.5,order:1});
  const scales={x:{grid:{display:false}},y:{title:{display:true,text:'кВт·год / год'},grid:{color:C.line,beginAtZero:true}}};
  if(socTrace)ds.push({type:'line',label:'SOC батареї, %',data:socTrace,borderColor:C.green,fill:false,tension:.3,pointRadius:0,borderWidth:1.5,yAxisID:'y2',order:0});
  scales.y2={position:'right',min:0,max:100,grid:{display:false},title:{display:true,text:'SOC, %'}};
  drawChart('dayChart','dayC',{type:'bar',data:{labels,datasets:ds},
    options:{responsive:true,maintainAspectRatio:false,interaction:{mode:'index',intersect:false},
      plugins:{legend:{position:'bottom',labels:{boxWidth:10,boxHeight:10,padding:10,font:{size:10}}},scales}});
  // flow line
  const e=evalPlan(plan,surplus(act));
  $('#dayFlow').innerHTML=`<span>Потреба авто: <b class="mono">${n.toFixed(1)} кВт·год</b></span>
<span>Від сонця: <b class="mono" style="color:${C.green}>${e.solar.toFixed(1)} кВт·год</b></span>
<span>3 мережі: <b class="mono" style="color:${C.grid}>${e.grid.toFixed(1)} кВт·год</b></span>
<span>Заряд ФЕП за день: <b class="mono" style="color:${C.solar}>${DATA.dailyPV[di].toFixed(1)} кВт·год</b></span>`;
}

// ----- scenario chart -----
function renderScen(){
  const cur=monthlyResult();const m=DATA.meta;
  const labels=['Реальність','Поточні налашт.','Денне\n(ідеал.)'];
  const vals=[0,(cur.frac*100).toFixed(0),(refDaytimePerfect()*100).toFixed(0)];
  const cols=[C.grid,S.mode==='evening'?C.batt:C.solar,C.green];
  drawChart('scenChart','scenC',{type:'bar',data:{labels,datasets:[{data:vals,backgroundColor:cols,borderRadius:6,barPercentage:.7}],
    options:{responsive:true,maintainAspectRatio:false,plugins:{legend:{display:false},
      tooltip:{callbacks:{label:c=>c.parsed.y+% від сонця}}},
      scales:{x:{grid:{display:false}},y:{beginAtZero:true,max:100,grid:{color:C.line},ticks:{callback:v=>v+'%'}}}});
}

// ----- forecast sensitivity chart -----
function renderFc(){
  const sigmas=[0,5,10,15,20,25,30,40,50];const sv=S.fc,sg=S.sigma;
  const pts=sigmas.map(s=>{if(s===0){S.fc='perfect';return monthlyResult().frac*100;}S.fc='noisy';S.sigma=s/100;
    let acc=0,N=8;for(let i=0;i<N;i++)acc+=monthlyResult().frac*100;return acc/N;});
  S.fc=sv;S.sigma=sg;
  drawChart('fcChart','fcC',{type:'line',data:{labels:sigmas.map(s=>s+'%'),
    datasets:[{label:'Частка від
сонця',data:pts,borderColor:C.batt,backgroundColor:'rgba(46,109,164,.1)',fill:true,tension:.3,pointRadius:3,pointBackgroundColor:C.batt,borderWidth:2}],
    options:{responsive:true,maintainAspectRatio:false,plugins:{legend:{display:false},
      tooltip:{callbacks:{label:c=>c.parsed.y.toFixed(0)+'% при σ='+c.label}}},
      scales:{x:{title:{display:true,text:'похибка прогнозу σ'},grid:{display:false}},
        y:{beginAtZero:true,max:100,grid:{color:C.line},ticks:{callback:v=>v+'%'}}}});
}

// ----- month chart -----
function renderMonth(){
  const labels=DATA.dates.map(d=>d.slice(8));
  const bg=DATA.dates.map(d=>EVDAYS.includes(d)?C.solar:C.solarSoft);
  drawChart('monthChart','monthC',{type:'bar',data:{labels,datasets:[
    {type:'bar',label:'Генерація ФЕП',data:DATA.dailyPV,backgroundColor:bg,borderRadius:3,order:2},
    {type:'line',label:'Споживання',data:DATA.dailyCons,borderColor:C.house,borderWidth:1.5,pointRadius:0,tension:.3,order:1}],
    options:{responsive:true,maintainAspectRatio:false,interaction:{mode:'index',intersect:false},
      plugins:{legend:{position:'bottom',labels:{boxWidth:10,boxHeight:10,padding:10,font:{size:10}},
        generateLabels:()=>[{}]{text:'ФЕП (день заряджання авто)',fillStyle:C.solar},{text:'ФЕП (ін. дні)',fillStyle:C.solarSoft},{text:'Споживання',fillStyle:C.house}}},
      scales:{x:{grid:{display:false},title:{display:true,text:'жовтень 2025'}},y:{beginAtZero:true,grid:{color:C.line},title:{display:true,text:'кВт·год/добу'}}}});
}

// ----- tables -----
function renderTables(){
  const m=DATA.meta;
  $('#vehSpec').innerHTML=[
    ['Корисна ємність пакета',m.pack_kwh+' кВт·год'],['Питоме споживання',m.whkm+' Вт·год/км'],
    ['Пробіг (лор)',m.dist_km+' км'],['Одометр',m.odo.toLocaleString('uk')+' км'],
    ['Діапазон SOC',m.soc_min+'-'+m.soc_max+' %'],['Днів заряджання',m.charge_days+' з 31'],
  ].map(x=><div class="it"><div class="k">${x[0]}</div><div class="v">${x[1]}</div></div>).join('');
  const tb=$('#evTable tbody');
  tb.innerHTML=EVDAYS.map(d=>{const di=DATA.dates.indexOf(d);const n=DATA.evDaily[d];

```

```

const fc=forecastDay(di),act=DATA.solar[di];let solar,plan;
if(S.mode==='daytime'){plan=scheduleDaytime(n,surplus(fc));solar=evalPlan(plan,surplus(act)).solar;}
else{solar=n*eveningResult().frac;}
const pct=n>0?(solar/n*100):0;
return `<tr><td>${d.slice(8)}.10</td><td class="mono">${n.toFixed(2)}</td><td class="mono">${DATA.dailyPV[di].toFixed(1)}</td>
<td class="mono" style="color:${pct>70?C.green:pct>40?#B07A00:C.grid}>${pct.toFixed(0)}%</td></tr>`;}.join("");
}

// ----- draw helper -----
function drawChart(canvasId,key,cfg){if(CH[key])CH[key].destroy();CH[key]=new Chart(`${'#'+canvasId},cfg);}

// ----- render all -----
function renderAll(){renderKPIs();renderDay();renderScen();renderFc();renderTables();}

// ----- wiring -----
function initControls(){
  // day select
  $('#daySelect').innerHTML=DATA.dates.map(d=>{const ev=EVDAYS.includes(d)? '☀️':'';return `<option value="${d}"${d===S.day?' selected':''}>${d.slice(8)}.10${ev}
  · ФЕП ${DATA.dailyPV[DATA.dates.indexOf(d)].toFixed(0)}</option>`}).join("");
  $('#daySelect').onchange=e=>{S.day=e.target.value;renderDay();}
  // mode
  $('#modeSeg').onclick=e=>{const b=e.target.closest('button');if(!b)return;S.mode=b.dataset.v;
  $('#modeSeg button').forEach(x=>x.classList.toggle('on',x===b));
  $('#modeHint').textContent=S.mode==='daytime'? 'Авто під\'єднане вдень – заряд напряму від сонця.' : 'Авто лише ввечері/вночі – сонце буферизується
  домашньою батареєю.';
  $('#winCtl').style.display=S.mode==='daytime'? 'none';
  $('#battCtl').style.opacity=S.mode==='evening'? '1' : '.45';
  renderAll();}
  $('#battCtl').style.opacity='.45';
  // forecast
  $('#fcSeg').onclick=e=>{const b=e.target.closest('button');if(!b)return;S.fc=b.dataset.v;
  $('#fcSeg button').forEach(x=>x.classList.toggle('on',x===b));
  $('#sigmaCtl').style.display=S.fc==='noisy'? 'none';renderAll();}
  // sliders
  $('#sigma').oninput=e=>{S.sigma+=e.target.value/100;$('#sigmaV').textContent=e.target.value+'%';renderAll();}
  $('#pev').oninput=e=>{S.pev+=e.target.value;$('#pevV').textContent=(+e.target.value).toFixed(1)+' кВт';renderAll();}
  $('#batt').oninput=e=>{S.batt+=e.target.value;$('#battV').textContent=e.target.value+' кВт·год';renderAll();}
  $('#winS').oninput=e=>{S.winS=Math.min(+e.target.value,S.winE-2);$('#winS').value=S.winS;updWin();renderAll();}
  $('#winE').oninput=e=>{S.winE=Math.max(+e.target.value,S.winS+2);$('#winE').value=S.winE;updWin();renderAll();}
  function updWin(){$('#winV').textContent=`${S.winS}:00–${S.winE}:00`;}
}
initControls();renderMonth();renderAll();
</script>
</body>
</html>

```

ДОДАТОК В

ПРЕЗЕНТАЦІЯ