

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кругляк Геннадій Віталійович**

УДК 620.92:621.314/572

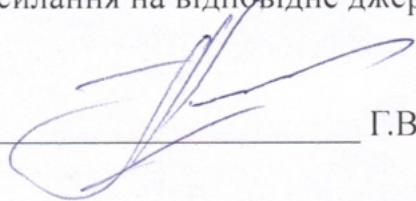
**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ СПОЖИВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ  
В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Г.В.Кругляк

Науковий керівник  
Шавьолкін Олександр Олексійович,  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Кругляк Г.В. Підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії в системі електроживлення локального об'єкта. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню гібридної фотоелектричної системи для потреб локального об'єкта шляхом підвищення ступеня використання фотоелектричної енергії на споживання у разі управління за прогнозом фотоелектричної генерації та підвищення енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення.

В дисертації отримано такі нові наукові результати:

1. Запропоновано модель руху смуги часткового затінення фотоелектричного масиву з урахуванням напрямку та швидкості руху хмар за використання покадрових шаблонів затінення з їхньою інтерполяцією, що підвищує точність моделювання зміни радіації для елементів масиву.
2. Встановлено, що швидкість руху смуги затінення не впливає на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву, що дозволяє поширити отримані рекомендації і на статичні режими затінення.
3. Удосконалено математичну модель фотоелектричного масиву для дослідження різних його конфігурацій в процесі руху смуги затінення за рахунок програмної обробки даних з визначенням траєкторії руху глобального максимуму потужності, що дозволяє визначити енергетичні характеристики та можливості відстеження максимуму потужності.
4. Отримав розвиток варіант управління фотоелектричною системою з перемиканням навантаження до мережі на визначених інтервалах часу та зміною алгоритму за прогнозом, що за рахунок зменшення пікового попиту забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію за трizonної тарифікації. Введення релейного регулювання потужності фотоелектричної

батареї за відсутності регулювання в МРРТ-контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації .

5. Отримав розвиток метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятора фотоелектричної батареї та навантаження з масштабуванням за потужністю та в часі. Це поряд з прискоренням експерименту дозволяє оцінювати ефективність випробуваних систем за різних співвідношень параметрів систем і коригувати алгоритми функціонування.
6. Отримала розвиток структура моделі фотоелектричного масиву з використанням наборів шаблонів затінення, що дозволяє досліджувати енергетичні показники для різних напрямів та швидкості руху смуги затінення.
7. Отримав розвиток принцип формування конфігурацій масивів фотоелектричних панелей для різних потужностей фотоелектричних систем з обмеженням кількості рядів та кількості панелей в рядку, що дозволяє підвищити продуктивність масиву незалежно від напрямку руху смуги затінення без підвищення вимог до алгоритму відстеження точки максимальної потужності.

**У першому розділі** проведено аналіз сучасного стану та існуючих рішень щодо реалізації гібридних фотоелектричних систем для енергозабезпечення локальних об'єктів. За цього основною тенденцією щодо вдосконалення фотоелектричних станцій є підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії на власні потреби. Важливим фактором підвищення є управління енергоспоживанням за прогнозом. Проаналізовано функціональні можливості комерційних гібридних інверторів та обґрунтовано доцільність розробки додаткових програмно-технічних комплексів для інтелектуального управління попитом. Показано доцільність застосування напівпровідникових емуляторів для розширення можливостей експериментальних досліджень програмно-технічного комплексу, що забезпечує повторюваність умов для перевірки ефективності алгоритмів управління на стадії розробки апаратних і програмних рішень.

Виконано аналіз розробок щодо мінімізації впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву. Поряд з вдосконаленням

МРРТ-контролерів розробляються стратегії реконфігурації, дослідження яких часто базуються на спрощених статичних сценаріях з неповним врахуванням реальної фізики та динаміки руху тіні. Виконано аналіз методів математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та засобів експериментальної перевірки з використанням емуляторів сонячних батарей.

Для підвищення загальної енергоефективності локальних фотоелектричних систем на основі критичного огляду літератури сформульовано завдання роботи, що передбачають розробку прогнозних алгоритмів управління за багатозонної тарифікації, створення уточнених моделей динамічного затінення, оптимізацію конфігурацій масивів, створення програмно-технічного комплексу та проведення його експериментальних випробувань.

**У другому розділі** розглянуто розробку алгоритмів та засобів управління енергоспоживанням локального об'єкта з фотоелектричною системою та акумуляторним накопичувачем на основі прогнозу сонячної генерації.

Обґрунтовано та реалізовано алгоритми функціонування програмно-технічного комплексу спільно зі стандартним гібридним інвертором в умовах тризонної тарифікації. Запропоновані сценарії прогнозного управління та вибору параметрів навантаження дозволяють знизити витрати на електроенергію і підвищити енергоефективність локальних об'єктів з фотоелектричними системами. Зокрема, з використанням гібридних інверторів без режиму паралельної роботи з мережею.

Обґрунтовано визначення параметрів сценаріїв управління та вибір рекомендованого графіка навантаження, який передбачає перерозподіл споживання в передпікові години для максимального заряду акумуляторної батареї. Розглянуто можливість застосування релейного регулювання потужності фотопанелей для забезпечення балансу енергії в режимах надлишкової генерації.

Виконано аналіз та імітаційне моделювання енергетичних процесів у середовищі MATLAB/Simulink, що підтвердило ефективність запропонованих рішень. З урахуванням отриманих результатів розроблено структуру програмно-технічного комплексу на базі мікроконтролерів ATmega та ESP8266, інтегрованого з веб-ресурсами для отримання метеопрогнозів. Результати підтверджують, що

впровадження прогнозного управління забезпечує зниження витрат на електроенергію до 29% та сприяє подовженню терміну експлуатації акумуляторів.

**Третій розділ** присвячений математичному моделюванню енергетичних процесів у фотоелектричних масивах за умов динамічного часткового затінення. Обґрунтовано методику моделювання динаміки руху хмарності з урахуванням умов Київського регіону влітку, де переважають західні та північні вітри визначають напрями переміщення тіньових смуг. Для підвищення адекватності моделювання розроблено цифрові шаблони, що описують геометрію затінення під різними кутами до фронту масиву, із застосуванням Гаусового згладжування для відтворення реальних розмитих меж тіні.

У роботі запропоновано комплексну математичну модель фотоелектричного масиву в середовищі MATLAB/Simulink з механізмом паралельних обчислень на ядрах процесора. Це забезпечує можливість проведення аналізу великих масивів даних та оцінки динаміки зміни енергетичних характеристик фотоелектричних масивів. Розглянуто вплив різних конфігурацій з'єднань на енергетичні показники та траєкторії руху точок глобального максимуму потужності, що є критично важливим для коректної роботи MPPT-контролерів комерційних інверторів. Доведено, що швидкість переміщення тіньової смуги не чинить суттєвого впливу на сумарну генерацію енергії. Це дає змогу виключити фактор швидкості вітру з переліку параметрів, що визначають точність оцінювання енергетичних показників.

Запропоновано варіанти дво- та трирядних топологій для систем потужністю 3–10 кВт. Показано, що впровадження рекомендованих схем з'єднань дозволяє знизити неузгоджені втрати до 20,2% та підвищити фактор заповнення на 9,9%. Приріст сумарної генерації енергії становить до 8% порівняно зі стандартними класичними паралельно-послідовними масивами.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень та практичної реалізації розроблених алгоритмів управління фотоелектричними системами. Обґрунтовано структуру експериментальної установки, що базується на використанні стандартного гібридних інвертора та напівпровідникового емулятора фотоелектричної батареї з програмним керуванням. Такий підхід дозволив

проводити випробування в реальному часі за різних сценаріїв генерації та навантаження, мінімізуючи часові та матеріальні витрати.

У роботі розвинуто метод експериментальних досліджень у добовому циклі з можливістю масштабування за потужністю та часом. Це надає можливість оцінювання ефективності запропонованих рішень за різних співвідношень параметрів системи та корегування алгоритмів функціонування на апаратному рівні. Розроблено структуру та схемні рішення щодо реалізації програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням, який є сумісним із комерційними інверторами та інтегрується з відкритими веб-ресурсами для отримання прогнозів генерації.

Показано результати тестування дослідного зразка комплексу, в ході яких підтверджено його функціональну працездатність відповідно до умов проведення випробувань. Експериментально перевірено функції автоматичного перемикавання між режимами роботи, формування сценаріїв управління згідно з прогнозом та візуалізацію поточних параметрів на сенсорному дисплеї. Результати випробувань підтверджують адекватність розроблених математичних моделей та високу ефективність алгоритмів прогнозного управління, що розширює умови для практичного впровадження інтелектуальних систем енергозабезпечення локальних об'єктів.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, гібридна фотоелектрична система, сонячні панелі, акумуляторна батарея, інвертор, прогноз генерації, управління енергоспоживанням, часткове затінення, конфігурація фотоелектричного масиву, тарифікація, моделювання.

## SUMMARY

Hennadii Kruhliak. Increasing the Level of Photovoltaic Energy Consumption in the Power Supply System of a Local object. – Qualification scientific work on the rights of a Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 141 – Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2026.

The dissertation Research is devoted to improve a hybrid photovoltaic system for the needs of a local object by increasing the utilization rate of photovoltaic energy for self-consumption under forecast-based control of photovoltaic generation and enhancing the energy performance of a photovoltaic array under partial shading conditions.

The following new scientific results have been obtained in the dissertation:

1. A model of partial shading propagation across a photovoltaic array has been developed, which accounts for the direction and velocity of cloud movement through the use of frame-by-frame shading templates and their interpolation. The proposed approach improves the accuracy of modelling irradiance variations affecting photovoltaic array elements.
2. It has been established that the speed of the shading strip movement does not affect the energy performance of the photovoltaic array, allowing the obtained recommendations to be extended to static shading modes as well.
3. An improved mathematical model of a photovoltaic array has been developed for investigating various array configurations under moving partial shading conditions. The model employs software-based data processing and determines the global maximum power point trajectory, enabling the evaluation of energy performance and maximum power point tracking capabilities.
4. A variant of photovoltaic system control with load switching the grid at specified time intervals and algorithm modification based on the forecast has been further developed, which, by reducing peak demand, provides an opportunity to reduce electricity costs under three-zone tariff pricing. The introduction of relay regulation

of the photovoltaic battery power in the absence of regulation in the MPPT-controller ensures energy balance in case of excess generation.

5. A method of experimental research in a daily cycle of photovoltaic system control tools using a software-controlled photovoltaic battery emulator and load with scaling in power and time has been further developed. Along with accelerating the experiment, this allows evaluating the efficiency of the tested systems under various system parameter ratios and adjusting the operation algorithms.
6. The structure of a photovoltaic array model using sets of shading templates has been further developed, allowing the investigation of energy indicators for various directions and speeds of the shading strip movement.
7. The principle of forming configurations of photovoltaic panel arrays for various capacities of photovoltaic systems with a limitation on the number of rows and the number of panels per string has been further developed, which allows increasing the array performance regardless of the shading strip movement direction without increasing the requirements for the maximum power point tracking algorithm.

**In the first chapter**, an analysis of the current state and existing solutions regarding the implementation of hybrid photovoltaic systems for the energy supply of local objects is carried out. In this regard, the main trend in improving photovoltaic power plants is to increase the consumption level of photovoltaic energy for self-consumption needs. An important factor in this increase is forecast-based energy consumption management. The functional capabilities of commercial hybrid inverters are analyzed, and the expediency of developing additional software and hardware complexes for intelligent demand management is justified. The feasibility of using semiconductor emulators to expand the capabilities of experimental research on the software and hardware complex is shown, which ensures the repeatability of conditions for verifying the effectiveness of control algorithms at the stage of developing hardware and software solutions.

An analysis of developments aimed at minimizing the impact of partial shading on the energy performance of a photovoltaic array is performed. Along with the improvement of MPPT-controllers, reconfiguration strategies are being developed, the research of which is often based on simplified static scenarios without fully considering the actual physics

and dynamics of shadow movement. An analysis of mathematical modeling methods in the MATLAB/Simulink environment and experimental verification tools using solar battery emulators is carried out.

To increase the overall energy efficiency of local photovoltaic systems, based on a critical literature review, the objectives of the work are formulated, which involve the development of forecast control algorithms under multi-zone tariff pricing, the creation of refined dynamic shading models, the optimization of array configurations, the creation of a software and hardware complex, and conducting its experimental testing.

**In the second chapter**, the development of algorithms and tools for managing the energy consumption of a local object with a photovoltaic system and battery storage based on the solar generation forecast is considered.

The operation algorithms of the software and hardware complex operating jointly with a standard hybrid inverter under three-zone tariff pricing are justified and implemented. The proposed scenarios of forecast control and load parameter selection allow reducing electricity costs and increasing the energy efficiency of local objects with photovoltaic systems. Particularly, when using hybrid inverters without a grid-parallel operation mode.

The determination of control scenario parameters and the choice of a recommended load profile, which involves shifting consumption to pre-peak hours for maximum battery charging, are justified. The possibility of applying relay regulation of the photo panel power to ensure energy balance in excess generation modes is considered.

An analysis and simulation modelling of energy processes in the MATLAB/Simulink environment were performed, confirming the effectiveness of the proposed solutions. Taking into account the obtained results, the structure of the software and hardware complex based on ATmega and ESP8266 microcontrollers, integrated with web resources for obtaining weather forecasts, was developed. The results confirm that the implementation of forecast control ensures a reduction in electricity costs by up to 29% and contributes to extending the battery life.

**The third chapter** is devoted to the mathematical modelling of energy processes in photovoltaic arrays under dynamic partial shading conditions. The methodology for

modelling cloud movement dynamics is justified, taking into account the conditions of the Kyiv region in summer, where prevailing western and northern winds determine the directions of shadow strip movement. To increase the adequacy of the modelling, digital templates describing the shading geometry at different angles to the array front were developed using Gaussian smoothing to reproduce actual blurred shadow edges.

The work proposes a comprehensive mathematical model of a photovoltaic array in the MATLAB/Simulink environment with a parallel computing mechanism on processor cores. This provides the capability to analyze large datasets and evaluate the dynamic changes in the energy characteristics of photovoltaic arrays. The impact of various connection configurations on energy indicators and global maximum power point trajectories is considered, which is critical for the correct operation of MPPT-controllers in commercial inverters. It is proven that the speed of the shadow strip movement does not have a significant impact on the total energy generation. This allows excluding the wind speed factor from the list of parameters that determine the accuracy of energy indicator evaluation.

Variants of two- and three-row topologies for systems with a capacity of 3–10 kW are proposed. It is shown that the implementation of the recommended connection schemes allows reducing mismatch losses by up to 20.2% and increasing the fill factor by 9.9%. The increase in total energy generation is up to 8% compared to standard classical series-parallel arrays.

**In the fourth chapter,** the results of experimental research and practical implementation of the developed photovoltaic system control algorithms are presented. The structure of the experimental setup, based on the use of a standard hybrid inverter and a software-controlled semiconductor photovoltaic battery emulator, is justified. This approach allowed conducting real-time tests under various generation and load scenarios, minimizing time and material costs.

The work further develops an experimental research method in a daily cycle with the possibility of scaling in power and time. This provides an opportunity to evaluate the effectiveness of the proposed solutions under various system parameter ratios and to correct operation algorithms at the hardware level. The structure and circuit solutions for

the implementation of the energy consumption management software and hardware complex, which is compatible with commercial inverters and integrates with open web resources to obtain generation forecasts, have been developed.

The results of testing a prototype of the complex are shown, during which its functional performance was confirmed in accordance with the testing conditions. Functions of automatic switching between operating modes, the formation of control scenarios according to the forecast, and the visualization of current parameters on a touch display were experimentally verified. The test results confirm the adequacy of the developed mathematical models and the high efficiency of forecast control algorithms, which expands the conditions for the practical implementation of intelligent energy supply systems for local objects.

**Keywords:** renewable energy sources, hybrid photovoltaic system, solar panels, battery, inverter, generation forecast, energy consumption management, partial shading, photovoltaic array configuration, tariffing, modeling.

**Список публікацій здобувача:**

1. O. Shavolkin, I. Shvedchykova, H. Kruhliak, T. Bila, A. Pisotskyi, “Determining photovoltaic array configurations with reduced impact of partial shading on energy performance,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 8 (139), pp. 27–36, Feb. 2026, doi: [10.15587/1729-4061.2026.352343](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352343).
2. О. Шавьолкін, І. Шведчикова, Г. Кругляк, Р. Марченко, А. Пісоцький, “Розроблення експериментальної установки для випробувань програмно-апаратних засобів управління мікроенергетичними мережами локальних об’єктів,” *Вісник КНУТД. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, vol. 148, no. 4, pp. 14–24, Mar. 2021, doi: [10.30857/1813-6796.2020.4.1](https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.4.1).
3. О. Шавьолкін, І. Шведчикова, Г. Кругляк, Є. Становський, М. Підгайний, “Програмно-технічний комплекс управління підключеною до мережі фотоелектричною системою з акумулятором для забезпечення власних потреб локального об’єкта,” *Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика*, vol. 23, no. 2, pp. 20–27, Dec. 2020, doi: [10.31474/2074-2630-2020-2-20-27](https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-2-20-27).
4. О. Шавьолкін, Г. Кругляк, Р. Марченко, Є. Становський, М. Підгайний, “Моделювання енергетичних процесів в гібридній фотоелектричній системі з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Технології та інжиніринг. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, no. 3, pp. 28–38, Jan. 2022, doi: [10.30857/2786-5371.2021.3.3](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.3).
5. О. Шавьолкін, Г. Кругляк, Р. Марченко, Є. Становський, М. Підгайний, “Визначення параметрів фотоелектричної системи з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Технології та інжиніринг. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, no. 4, pp. 41–50, Jan. 2022, doi: [10.30857/2786-5371.2021.4.4](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.4).
6. A. Shavelkin, J. Gerlici, I. Shvedchykova, K. Kravchenko, H. Kruhliak, “Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 36–42, Apr. 2021, doi: [10.20998/2074-272X.2021.2.06](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.06).

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
SUMMARY.....	7
Список публікацій здобувача.....	12
Перелік умовних позначень і скорочень.....	16
ВСТУП.....	18
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	25
1.1. Аналіз існуючих рішень щодо гібридних ФЕС та управління енергоспоживанням.....	25
1.1.1. Визначення параметрів ФЕС.....	27
1.1.2. Питання підвищення самоспоживання в розробках та дослідженнях....	27
1.2. Аналіз стану розробок щодо програмно-технічних засобів, сумісних для використання з комерційними гібридними інверторами.....	30
1.3. Аналіз існуючих рішень щодо підвищення енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення.....	33
1.3.1. Основні шляхи зменшення впливу часткового затінення.....	33
1.3.2. Алгоритми МРРТ в умовах часткового затінення фотоелектричних систем.....	34
1.3.3. Конфігурації фотоелектричних масивів з послабленням впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність.....	37
1.3.4. Математичне моделювання впливу часткового затінення в фотоелектричних системах.....	43
1.4. Формулювання завдань роботи.....	49
2. РОЗРОБКА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ’ЄКТУ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ЗА ПРОГНОЗОМ.....	51
2.1. Реалізація управління енергоспоживанням локального об’єкту згідно прогнозу фотоелектричної генерації.....	51
2.1.1. Розробка алгоритму роботи ФЕС з АКБ за тризонної тарифікації.....	51

2.1.2. Управління енергоспоживанням в фотоелектричній системі об'єкту згідно прогнозу фотоелектричної генерації.....	54
2.1.3. Імітаційне моделювання енергетичних процесів в фотоелектричній системі.....	59
2.2. Розробка програмно-технічного комплексу управління ФЕС за прогнозом.....	62
2.2.1. Алгоритм управління за прогнозом.....	62
2.2.2. Структура програмно-технічного комплексу управління з використанням гібридного інвертора типу АХІОМА.....	68
2.3. Висновки до розділу 2.....	69
3. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МАСИВУ В УМОВАХ ЧАСТКОВОГО ЗАТІНЕННЯ.....	71
3.1. Визначення можливих конфігурацій фотоелектричних масивів і кількості фотоелектричних панелей згідно прийнятої потужності фотоелектричної системи.....	71
3.2. Розробка математичної моделі фотоелектричного масиву з урахуванням часткового затінення.....	75
3.2.1. Моделювання одиночної фотоелектричної панелі.....	75
3.2.2. Моделювання фотоелектричного масиву.....	84
3.2.3. Обґрунтування методики моделювання руху смуги затінення з урахуванням напрямку вітру.....	86
3.2.4. Розробка математичної моделі фотоелектричного масиву з врахуванням руху смуги затінення.....	97
3.2.5. Оцінка впливу напрямку та швидкості руху смуги для вибраних конфігурацій.....	108
3.2.6. Визначення рекомендованих типів конфігурацій в умовах часткового затінення.....	114
3.3. Визначення рекомендованих конфігурацій масиву за різної кількості фотоелектричних панелей.....	115

3.3.1. Визначення загальних рекомендацій для конфігурацій масиву з різною кількістю фотоелектричних панелей та діапазон потужності фотоелектричних станцій, для якого це можливо.....	115
3.3.2. Моделювання та оцінка показників.....	117
3.3.3. Аналіз результатів моделювання та загальні рекомендації щодо конфігурацій фотоелектричних масивів.....	119
3.4. Висновки до розділу 3.....	122
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	124
4.1. Розробка експериментальної установки з програмно-технічним комплексом.....	124
4.1.1. Структура експериментальної установки.....	124
4.1.2. Дослідження ПТК на експериментальному стенді.....	129
4.2. Випробування програмно-технічного комплексу на діючій фотоелектричній системі.....	132
4.3. Висновки до розділу 4.....	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	135
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	161
ДОДАТОК Б. Програмна реалізація та моделювання MATLAB/Simulink.....	162
ДОДАТОК В. Експериментальна установка з програмно-технічним комплексом ..	181
ДОДАТОК Г. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження .....	209

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Пояснення
АКБ	Акумуляторна батарея
БЖ	Блок живлення
БК	Блок керування
ВАХ	Вольтамперна характеристика
ГІ	Гібридний інвертор
ГМІ	Гібридний мережевий інвертор
ДН	Датчик напруги
ДС	Датчик струму
ЕЕ	Електроенергія
ЕУ	Експериментальна установка
Зх	Захід
КЗ	Коротке замкнення
КСЕ	Комбінована система електроживлення
ЛО	Локальний об'єкт
Пд	Південь
ПК	Персональний комп'ютер
Пн	Північ
ПТК	Програмно-технічний комплекс
РМ	Розподільча мережа
Сх	Схід
ФБ	Фотобатарея
ФЕ	Фотоелектрична енергія
ФЕМ	Фотоелектричний масив
ФЕП	Фотоелектрична панель
ФЕС	Фотоелектрична система
ХХ	Холостий хід
ШІМ	Широтно–імпульсна модуляція

API	Application Programming Interface – Прикладний програмний інтерфейс
BL	Bridge-Linked – мостова
DDM	Double Diode Model – Дводіодна модель
GMPP	Global Maximum Power Point – Глобальна точка максимальної потужності
HC	Honey-Comb – сотова (стілєникова)
HEMS	Home Energy Management Systems – Система домашнього енергоменеджменту
LMPP	Local Maximum Power Point – Локальна точка максимальної потужності
MCU	Мікроконтролерний пристрій
MPP	Maximum Power Point – Точка максимальної потужності
MPPT	Maximum Power Point Track – Відстежування точки максимальної потужності
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature – Номінальні температурні умови комірки
P&O	Perturb and Observe – Збурення та спостереження
PSC	Partial Shadow Conditions – Умови часткового затінення
PV	Photovoltaic – Фотоелектричний
PVE	Емулятор сонячної батареї
S	Series – послідовна
SC	Self-Consumption – Самоспоживання
SDM	Single Diode Model – Однодіодна модель
SP	Series-Parallel – послідовно-паралельна
SS	Self-Sufficiency – Самодостатність
STC	Standard Test Conditions – Стандартні умови тестування
TCT	Total-Cross-Tied – повністю перехресна
TDM	Three Diode Model – Тридіодна модель

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2050 року [1], пріоритетним напрямом є розвиток розосередженої генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що дозволяє знизити навантаження на магістральні мережі та підвищити живучість енергосистеми в умовах дефіциту потужності. Особливе місце в цьому посідають локальні об'єкти (приватні домоволодіння, малий бізнес, об'єкти критичної інфраструктури), де як засоби енергозабезпечення застосовуються гібридні фотоелектричні системи (ФЕС) з акумуляторними накопичувачами. Однак ефективність таких систем суттєво обмежена мінливістю сонячної радіації та невідповідністю графіків генерації і споживання.

Підвищення рівня самоспоживання фотоелектричної енергії є критично важливим в умовах переходу до ринкових механізмів стимулювання ВДЕ та впровадження багатозонних тарифів на електроенергію. Існуючі комерційні рішення переважно не враховують прогностичні метеорологічні дані та не адаптовані до динамічних змін тарифних планів. Додатковим фактором зниження енергетичної продуктивності локальних ФЕС є негативний вплив часткового затінення фотоелектричних масивів, що потребує розробки та вдосконалення рішень щодо мінімізації цього впливу.

Отже питання вдосконалення алгоритмів управління енергоспоживанням за прогнозом та методів мінімізації втрат від динамічного затінення є своєчасним і актуальним для розвитку вітчизняної електроенергетики.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну. Матеріали роботи використано під час виконання держбюджетної фундаментальної науково-дослідної роботи «Розроблення системи енергоефективного управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів з традиційними та поновлювальними джерелами» (№ держреєстрації 0118U000232) виконавець (підрозділи 3.2 - об'єктно-орієнтовна адаптація програмно-апаратного забезпечення

виробничого зразка системи управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів, 3.3 - Виробничі дослідження системи інформаційно-технічного комплексу управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів), НДР за договором № ДЗ/92-2019 «Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системах енергоменеджменту локальних об'єктів» (№ держреєстрації 0119U103640) - виконавець – розділ 2.3 складання дослідного зразка ПТК, 3.1 проведення випробувань дослідного зразка ПТК, 4.1 - корегування документації на програмно-апаратну частину ПТК).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії в системі електроживлення локального об'єкту за рахунок використання прогнозу та збільшення продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення ФБ, що сприятиме зниженню витрат ЛО на електроенергію.

Вирішення наукового завдання, поставленого в дисертації, включає в себе вирішення наступного комплексу задач:

1. Виконати аналіз існуючих рішень щодо підвищення ефективності гібридної фотоелектричної системи для власних потреб локального об'єкту.
2. Розробити рішення щодо управління енергоспоживанням за прогнозом ФЕ в разі використання ПТК разом зі стандартним гібридним інвертором, що сприятимуть підвищенню самоспоживання ФЕ і зниженню витрат на ЕЕ. Передбачити реалізацію за тризонної тарифікації з врахуванням комплексу питань щодо: вибору параметрів, рекомендованого сценарію навантаження та сценаріїв управління згідно прогнозу генерації ФЕ.
3. Розробити алгоритми визначення параметрів та сценарію управління з формуванням стану заряду АКБ згідно прогнозу генерації ФЕ, що забезпечить підвищення рівня споживання ФЕ та зменшення витрат на ЕЕ з мережі.
4. Розробити експериментальну установку з емулятором ФБ, що дозволить досліджувати апаратно-програмні рішення ПТК в реальному часі за різних графіків генерації ФБ та навантаження.

5. Виконати аналіз кліматичних умов для місця знаходження ЛО та обґрунтувати методику моделювання руху смуги затінення .
6. Розробити загальну математичну модель масиву фотоелектричних панелей з урахуванням напрямку та швидкості руху смуги затінення.
7. Виконати аналіз енергетичних показників для можливих конфігурацій масиву заданої потужності за результатами моделювання. Визначити можливості щодо топології та електричних з'єднань ФЕП в масиві для зменшення впливу затінення на енергетичні показники в процесі руху смуги затінення.
8. Скласти за отриманими рекомендаціями конфігурації масиву за різної кількості ФЕП та здійснити моделювання з оцінкою показників. Визначити загальні рекомендації для конфігурацій масиву з різною кількістю ФЕП та діапазон потужності ФЕС, для якого це можливо.
9. Розробити експериментальний зразок ПТК та здійснити його випробування на діючій установці.

**Об'єкт дослідження** – енергетичні процеси в гібридній ФЕС з АКБ для електроживлення локального об'єкта.

**Предмет дослідження** – управління енергоспоживанням за прогнозом генерації ФЕС та визначення конфігурацій фотоелектричного масиву .

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач питання реалізації базувалось на відомих структурах управління та регулювання. При побудові математичних моделей енергетичних процесів в ФЕС та фотоелектричних масивах використано методи теорії електричних кіл та архівні дані фотогенерації, дані державного стандарту з будівельної кліматології. Для реалізації моделі смуги затінення використано алгоритм синтезу динамічних цифрових шаблонів із застосуванням Гаусового згладжування меж тіні та механізмів дискретного покадрового зміщення. При розробці програмно-апаратних рішень ПТК використано експериментальні дослідження в лабораторії та випробування дослідного зразка на діючій ФЕС. Розрахунки та моделювання енергетичних процесів проводились з використанням програмного пакету MATLAB/Simulink. Також використано результати робіт провідних вчених в області систем електроживлення з ВДЕ.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Запропоновано математичну модель руху смуги часткового затінення фотоелектричного масиву. Вона враховує напрям та швидкість руху хмар шляхом використання покадрових шаблонів затінення з їх інтерполяцією, що підвищує точність відтворення динаміки сонячної радіації для окремих елементів масиву.
2. Встановлено, що швидкість руху смуги затінення не має визначального впливу на сумарну енергетичну продуктивність масиву. Це дозволяє поширити отримані рекомендації щодо конфігурування систем і на статичні режими затінення.
3. Удосконалено математичну модель фотоелектричного масиву для дослідження його конфігурацій за умов динамічного затінення. Завдяки програмній обробці даних із побудовою траєкторії глобального максимуму потужності стає можливим оцінювання енергетичних характеристик та ефективності алгоритмів відстеження точки екстремуму.
4. Дістав подальшого розвитку метод управління фотоелектричною системою, що поєднує перемикання навантаження на мережу в задані інтервали часу та адаптацію алгоритму за прогнозом генерації. Це дозволяє знизити піковий попит та мінімізувати витрати на електроенергію за умов тризонної тарифікації. Впровадження релейного регулювання потужності забезпечує баланс енергії при надлишковій генерації навіть за відсутності функції регулювання у МРРТ-контролері.
5. Дістав подальшого розвитку метод експериментальних досліджень систем управління у добовому циклі. Використання програмно керованих емуляторів масиву та навантаження з масштабуванням у часі й за потужністю дозволяє прискорити випробування, оцінювати ефективність алгоритмів за різних експлуатаційних сценаріїв, коригувати алгоритми функціонування.
6. Розроблено структуру імітаційної моделі масиву, яка базується на наборах динамічних шаблонів. Це дозволяє проводити комплексні дослідження

енергетичних показників системи для довільних комбінацій векторів руху та геометричних параметрів зони затінення.

7. Дістав подальшого розвитку принцип формування конфігурацій фотоелектричних масивів різної потужності з обмеженням розмірності рядів та панелей. Це забезпечує підвищення продуктивності системи за будь-якого напрямку руху тіні, не вимагаючи при цьому ускладнення алгоритмів відстеження точки максимальної потужності.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

Отримані рішення є основою для проектування ФЕС для забезпечення потреб локальних об'єктів, зокрема це:

- технічні рішення щодо реалізації експериментальної установки, які забезпечують мінімізацію матеріальних і часових витрат під час випробувань та розробки засобів управління фотоелектричною системою з акумуляторним накопичувачем [3];
- алгоритми та рішення щодо реалізації програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням ФЕС з використанням даних відкритих веб-ресурсів щодо прогнозу генерації, що може бути сумісним з комерційними інверторами;
- алгоритми визначення сценаріїв навантаження за прогнозом фотоелектричної генерації з можливістю поточного коригування потужності, що сприяє підвищенню ступеню споживання фотоелектричної енергії;
- методика формування шаблонів затінення відповідно конфігурації затінення і напрямів руху смуги затінення;
- методика динамічного моделювання енергетичних процесів в фотоелектричному масиві з симуляцією смуги затінення для різних конфігурацій масивів;
- рекомендації щодо формування конфігурацій масивів фотоелектричних панелей для потужності системи до 12 кВт за мінімального впливу часткового затінення.

- Результати дослідження впроваджено в НДР за договором № ДЗ/92-2019 «Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системах енергоменеджменту локальних об'єктів».
- Результати дослідження, зокрема:
  - розроблені математичні та комп'ютерні моделі, алгоритми і методики моделювання динамічного затінення, а також адаптивні топології фотоелектричних масивів;
  - методика прогнозних алгоритмів управління енергоспоживанням за багатозонної тарифікації та програмно-технічний комплекс для її реалізації,

впроваджені в освітній процес кафедри інженерії енергосистем Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України та будуть використані при вивченні дисциплін «Електростанції з відновлюваними джерелами», «Системи акумуляування та розподілення електроенергії» за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами» для здобувачів освітнього ступеню «Бакалавр», а також «Моніторинг та керування електричними системами» за освітньо-науковою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» для здобувачів освітнього ступеню «Магістр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Це підтверджено актом впровадження (Додаток Г).

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, наведені у дисертаційній роботі і винесені на захист, отримані особисто автором або ж за його активної участі та опубліковано у спеціалізованих фахових виданнях. Автору належать обґрунтування задачі, проведення досліджень, аналіз і обробка результатів, висновки за отриманими результатами роботи. У роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачу належить: [2] – особистий внесок здобувача – пропозиції щодо структури комплексу з введенням Wi-Fi модулю з підключенням до сайту для отримання прогнозу генерації ФЕ; [3] – розробка та використання емулятору фотоелектричної

батареї і програмованого імітатора навантаження в лабораторних дослідженнях; [4] – пропозиція щодо визначення сценарію навантаження; [5] – розробка модулю завдання навантаження в Matlab; [6] – пропозиції щодо сценаріїв роботи з врахуванням тризонної тарифікації; [7] – обґрунтування моделі смуги затінення, складання загальної моделі фотоелектричного масиву та обробка результатів моделювання, рекомендації щодо формування конфігурації фотоелектричних масивів.

### **Апробація матеріалів дисертації**

Основні положення дисертаційної роботи, результати досліджень і висновки викладені в доповідях, обговорені та отримали позитивну оцінку на таких міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях:

1. Семінар «Впровадження енергоефективних технологій компаніями для підвищення конкурентоспроможності та стійкості» (Київ, УСПП, січень 2023 р.).
2. Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» (Київ, НУБіП України, червень 2023 р.).
3. Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» (Київ, НУБіП України, червень 2024 р.).
4. Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» (Київ, НУБіП України, червень 2025 р.).
5. Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» (Київ, НУБіП України, червень 2026 р.).

### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота викладена на 209 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 160 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 11 таблицями та 58 рисунками. Список використаних джерел містить 179 найменувань.

# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

## 1.1. Аналіз існуючих рішень щодо гібридних ФЕС та управління енергоспоживанням

Найбільш розповсюдженими для систем електроживлення локальних об'єктів (ЛО) є підключені до мережі гібридні ФЕС з АКБ. За цього система має два джерела електроенергії (ЕЕ): ФБ і розподільчу мережу змінного струму (Рис. 1.1).

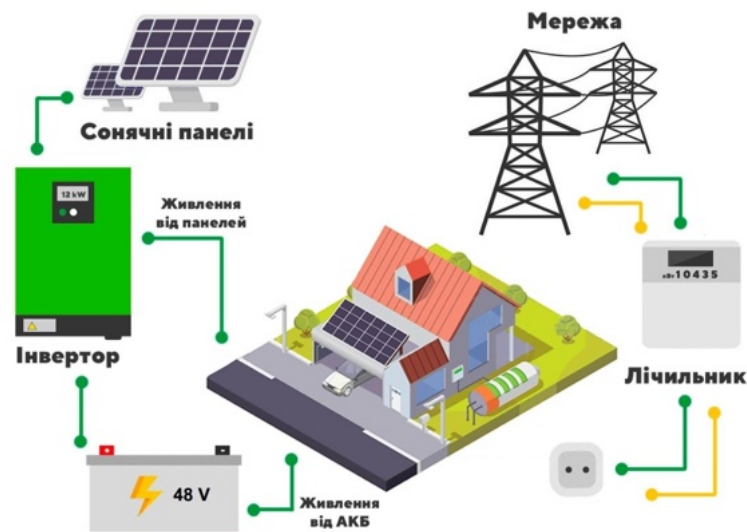


Рис. 1.1 Структура гібридної ФЕС з АКБ [8]

Мета зменшити споживання енергії з мережі та підвищення надійності енергозабезпечення. Фотоелектрична енергія (ФЕ) надходить нерівномірно, тому для перерозподілу енергії використовується АКБ. Прийняті наступні показники оцінки ефективності системи [2]:

- самоспоживання ( $SC$ ),
- самодостатність ( $SS$ ) і доступ до електроенергії.

Самоспоживання кількісно оцінює частку енергії, виробленої ФЕ установкою, яка споживається безпосередньо на місці або використовується для заряджання локальних накопичувачів. Математично коефіцієнт самоспоживання розраховується як відношення самоспожитої енергії до загальної енергії, згенерованої системою.

Максимальне значення 100% означає, що вся вироблена енергія була використана всередині об'єкта:

$$SC(\%) = \frac{E_{SC}}{E_{gen}} \times 100,$$

де:

$E_{SC}$  — річний або місячний обсяг самоспожитої енергії,

$E_{gen}$  — загальний обсяг генерації [10].

Самодостатність відображає здатність системи повністю покривати потреби об'єкта без залучення зовнішніх джерел і кількісно визначає ступінь незалежності споживача від електричної мережі [11]. Цей індикатор вимірює частку загального споживання, яка забезпечується локальною генерацією. Математично самодостатність розраховується:

$$SS(\%) = \frac{E_{lgc}}{E_{load}} \times 100,$$

де:

$E_{lgc}$  — енергія, згенерована локально та спожита на місці (включаючи енергію з батареї),

$E_{load}$  — загальне навантаження об'єкта.

За відсутності зелених тарифів основним фактором стає самоспоживання [12]. Тобто завдання системи забезпечити максимальне споживання ФЕ, що забезпечується управлінням енергоспоживанням та перерозподілом енергії.

Питання підвищення  $SC$  є достатньо складним, починаючи з вибору параметрів ФЕС (потужність ФБ  $P_{PV}$ , енергоємність АКБ  $W_B = U_B \cdot C_B$ ,  $U_B$  – напруга АКБ,  $C_B$  – ємність АКБ), що є головним вихідним фактором. Зазвичай, виникає протиріччя з бажанням забезпечення самодостатності шляхом підвищення встановленої потужності ФЕС при максимальному  $SC$ . За цього необхідно забезпечити споживання надлишкової ФЕ  $W_{EX}$ . Складним є питання графіку навантаження об'єкту  $P_L(t)$ . Здебільшого проблема підвищення  $SC$  зводиться до двох способів [13]: акумуляція надлишкової енергії і управління попитом.

### 1.1.1. Визначення параметрів ФЕС.

Загальноприйнятим є визначення потужності ФБ  $P_{PV}$  за відповідності значень річного споживання ЕЕ  $W_{PE}$  та генерації ФЕ  $W_{PV}$ . Так за умов Польщі [14] в разі  $W_{PE} = 4500 \text{кВт} \cdot \text{год}$  прийнято  $P_{PV} = 4.77 \text{кВт}$ , в умовах північної Європи в роботі [8]  $P_{PV} = 5 \text{кВт}$ , в роботі [16]  $P_{PV} = 5.19 \text{кВт}$ . Аналогічний підхід з визначенням потужностей ФЕС згідно річному споживанню господарством пропонується в роботі [17]. В роботі [4] визначення співвідношення між генерацією ФЕ і споживанням пропонується згідно очікуваному зниженню витрат на ЕЕ за архівними даними генерації ФЕ.

За цього не враховується енергоємність АКБ та ступінь використання ФЕ. Варіант визначення встановленої потужності  $P_{PV}$  з врахуванням ємності АКБ та очікуваного ступеню використання ФЕ ( $k_{PV} = \frac{W_{PVL}}{W_{PV}}$ ,  $W_{PVL}$  – спожита навантаженням енергія,  $W_{PV}$  – ФЕ, яка генерована в режимі максимальної потужності МРРТ) подано в роботі [18].

Визначення енергоємності АКБ залежить від обмежень щодо глибини розряду  $DoD$  та ступеню використання для зниження витрат на оплату ЕЕ. В роботі [13] рекомендоване значення  $W_B$  становить  $0.5 - 1 \text{кВт} \cdot \text{год}$  на  $1 \text{кВт}$   $P_{PV}$ . Це в цілому відповідає значенням в інших роботах. В роботі [20] за  $P_{PV} = 5 \text{кВт}$  прийнято значення  $W_B = 10 \text{кВт} \cdot \text{год}$ , що пов'язано з активним використанням енергії АКБ для зниження витрат в разі динамічних тарифів на ЕЕ.

### 1.1.2. Питання підвищення самоспоживання в розробках та дослідженнях.

Щодо підвищення  $SC$  в роботі [21] віддається перевага засобам зберігання ЕЕ і стверджується, що потенціал впливу на  $SC$  в разі управління попитом не перевищує 4 %.

Більш дешевим шляхом зберігання надлишкової ЕЕ порівняно з АКБ є використання теплоаккумуляторів [10], [16], [22]. За цього розглядається використання надлишкової ЕЕ на нагрів води в резервуарі для системи гарячого водопостачання. В разі повного нагріву води [11] надлишкова ЕЕ продається в мережу. Ефективність досягається лише за використання експорту ЕЕ в мережі,

особливо в разі тривалого періоду високої генерації ФЕ. До цього використання додаткового резервуару накопичувача не завжди можлива.

Велика кількість робіт присвячена управлінню попитом за використанням систем домашнього енергоменеджменту (HEMS). Здебільшого для збільшення власного споживання пропонується перепланування роботи приладів на години високої генерації ФЕ [23], [24], [25], [26], [27], [28]. Поряд з плануванням роботи приладів в [25] розглядається можливість зарядки систем зберігання в періоди низьких цін на ЕЕ. В роботі [23] поряд з плануванням роботи також розглядається питання оптимізації обміну енергією системи зберігання та електромобілем. За цього розглядається 6 сценаріїв функціонування об'єкту.

Комбінування акумуляції теплової енергії з управлінням попитом шляхом регулювання потужності електричного нагрівача розглянуто в роботах [29], [30]. В [29] показано що за повного використання ФЕ на споживання ступень зниження річного споживання ЕЕ з мережі можна підвищити від 9.5% до 30.7% залежно від встановленої потужності ФБ.

Здебільшого мова йде про прив'язку споживання до генерації ФЕ, що є дієвим тільки за її прогнозом. Рішення можуть бути різними і не є універсальними. Зокрема це стосується використання сценаріїв навантаження. В [6] потужність в сценаріях навантаження, що визначаються за прогнозом генерації ФЕ і залежить від значення  $W_{PV}$ , що не завжди можливо на практиці.

Практична реалізація гібридних ФЕС з АКБ пов'язана з використанням гібридних інверторів (ГІ). Комерційні рішення ГІ є базою системи і мають всі вбудовані елементи для підключення ФБ та АКБ.

Робота розпочата в 2019 році. Вже на той час на ринку була присутня значна гамма ГІ потужністю до 10 кВт для малих ЛО. Розглянемо ГІ типу АХІОМА energy, який був застосований в експериментальному зразку. Інвертор забезпечує два режими функціонування: автономний з використанням енергії ФБ та АКБ та перемикає навантаження на мережу. Більші можливості має ГІ типу Growatt, що має режими роботи з мережею, автономний та байпас. Розглянуті ГІ є широко розповсюдженими бюджетними рішеннями. Отже ГІ це завершений пристрій з

елементами інтелектуального управління: підключення через інтернет, обмін інформацією, наявність виходів для підключення та керування навантаженням, підключенням резервного генератора та інше.

Для порівняння розглянемо сучасний ГІ типу SUN-8K-SG01HP3-EU-AM [31].

За цього реалізуються наступні функції:

1. Згладжування (обрізання) піків потужності, що споживається з мережі, на заданому рівні. За цього недостатня для навантаження енергія споживається від АКБ.
2. Нульовий експорт енергії в мережу за відповідним обмеженням потужності, що генерується ФБ.
3. Заряд АКБ за рахунок енергії ФБ або мережі з завданням струму (потужності) заряду.
4. Обмеження потужності АКБ.
5. «Smart load», що забезпечує підключення навантаження в разі досягнення АКБ заданого значення  $SoC_1$  та відключення теж за заданим значенням  $SoC_2$ . Зазвичай це стосується випадку, коли АКБ є зарядженим і не може поглинати надлишкову ФЕ. В якості навантаження може бути бойлер. На відміну від функції «нульовий експорт в мережу», коли знижується потужність ФБ і має місце неповне використання можливостей ФБ, в даному разі споживається вся енергія ФБ. Недоліком цього рішення є те, що в разі незначної надлишкової ФЕ вмикання потужного бойлеру призводить до зайвого циклу розряду АКБ та зменшенню  $SoC$ . Це в подальшому обмежує можливості компенсації пікового попиту.

Порівняно з розглянутими вище ГІ додано функції 1 і 5. Отже сучасний ГІ являє собою багатофункціональний пристрій, можливості якого в повній мірі може забезпечити зовнішній контролер. Можливості комерційних ГІ щодо управління енергоспоживанням ФЕС з АКБ є обмеженими. Розглянуті вище розробки щодо підвищення самоспоживання ФЕ потребують реалізації додаткових програмно-технічних засобів, сумісних для використання з комерційними гібридними інверторами.

## 1.2. Аналіз стану розробок щодо програмно-технічних засобів, сумісних для використання з комерційними гібридними інверторами

На даний час більшість комерційних рішень ГІ для ФЕС з АКБ є достатньо універсальними та функціонально завершеними пристроями. Втручання в програмне забезпечення не є можливим. Вони мають великий набір функцій та режимів щодо можливості управління енергоспоживанням. Проте реалізація управління системою енергоживлення ЛО передбачає наявність додаткових ліній зв'язку як інформаційних, так і силових. Отримання та використання даних прогнозу, поточної інформації щодо стану елементів системи, обробка інформації та відповідні розрахунки потребує зовнішніх контролерів. Отже виникає питання використання додаткових програмно-технічних комплексів (ПТК) сумісних с ГІ для управління енергоспоживанням згідно прийнятими алгоритмам. Для зв'язку з ГІ використовується його інтерфейс.

Це обумовлює низку рішень та пропозицій щодо їх реалізації. Більшість рішень пов'язано з управлінням попитом (DSM) за використанням прогнозу метеорологічних умов та генерації ФЕ [32], [33]. В [34] застосовується модель авторегресійного ковзного середнього (ARMA) для прогнозування фотоелектричної та вітрової генерації, а також попиту на електроенергію.

Загальною тенденцією є перепланування роботи приладів згідно генерації ФЕ: збільшення навантаження  $P_L$  в години максимальної генерації ФЕ та зменшення пікового попиту. Основна увага приділяється споживанню надлишкової енергії за високої генерації ФЕ. Проте це не завжди можливо та ефективно. В роботі [35] розглядається модель LSTM (Generative Adversarial Network-Enhanced Long Short-Term Memory) для прогнозування попиту на ЕЕ в господарствах і оптимізації планування накопичування енергії. Модель використовує метеорологічні дані та дані з історії споживання енергії господарствами, що дозволяє ефективно накопичувати енергію в періоди зниженого навантаження та споживати її в пікові години.

Існуючі розробки щодо використання прогнозу передбачають використання власних рішень прогнозування з використанням нейромереж [34], [36], що значно

здорожує систему.

Разом з тим існує ряд відкритих веб-ресурсів [37], що надають готовий прогноз генерації ФЕ для локації об'єкту. За цього задаються географічна орієнтація, кут нахилу до горизонтальної поверхні, азимутальний кут до півдня ФЕП та загальну потужність ФЕМ. Проте любому прогнозу властива похибка [38], що передбачає її врахування.

Слід зазначити, що здебільшого використовується дещо спрощений підхід щодо алгоритму управління станом заряду АКБ *SoC* з обмеженням мінімального значення. Так заряд АКБ здійснюється за умови  $P_{PV} > P_L$ , а розряд за умови  $P_{PV} < P_L$ . В той же час в разі пікової тарифікації енергію АКБ доречніше використовувати в пікові години. З розвитком в Україні енергоринку здійснюється перехід до регулювання тарифів оплати в часі. Зокрема це стосується пікових тарифів оплати.

Можливі шляхи удосконалення ПТК, зокрема в разі багатозонної тарифікації оплати ЕЕ можуть бути пов'язані з:

- визначенням рекомендованого сценарію навантаження згідно мінімальним витратам ЕЕ;
- змінюванням сценаріїв управління енергоспоживанням згідно прогнозу генерації ФЕ за відповідного обмеження *DoD* АКБ;
- вдосконаленням алгоритму управління з врахуванням тарифних зон для забезпечення стану заряду АКБ достатнього для зниження пікового попиту та забезпечення максимального використання енергоемності АКБ;
- введенням поточних рекомендацій згідно фактичної генерації ФБ і навантаження з можливістю корекції рекомендованої потужності навантаження;
- автоматичним регулюванням налаштувань ПТК згідно сезону і прогнозу;
- введенням функції регулювання навантаження у разі відключення мереж для забезпечення тривалого функціонування критичного обладнання ЛО;
- відображенням інформації за попередню добу, виводом рекомендацій на день і поточних рекомендацій.

#### ***Апаратна реалізація та експериментальна перевірка в різних умовах ПТК***

При розробці та дослідженні рішень щодо ПТК переважно використовується

математичне моделювання, рідше експериментальні випробування на рівні апаратних рішень. Експериментальні випробування ускладнюються внаслідок необхідності відтворення різних умов за сезонами року та різних сценаріїв. За цього ускладнюється узагальнення отриманих результатів, що потребує багато часу. Тому доцільним виглядає комбінування моделювання з експериментальною перевіркою, як зроблено в роботі [39], де для обґрунтування алгоритму енергоспоживання ФЕС використано моделювання в комплексі з лабораторним експериментом.

Частка робіт стосується моделювання електромагнітних процесів в системі, що стосується показників якості енергії та налаштувань регуляторів, реалізації певних режимів.

Оцінювання інтегральних показників на рівні споживання та перерозподілу енергії в системі здійснюється в добовому циклі або «24h». Ряд рішень моделей систем з ВДЕ представлені на в статті [40] і на веб-ресурсі Mathworks [41].

В роботі [42] аналіз енергетичних процесів здійснюється з використанням певних спрощень на рівні активної потужності з описом сталих режимів і їх змінювання. Генерація ФЕ за цього задається згідно історичним значенням. Аналогічний підхід в роботі [5]. Модульний підхід, що спрощує реалізацію моделі ФЕС з АКБ, запропоновано в роботі [43]. За цього використовуються набір модулів, а зміни стосуються алгоритму.

Розширення можливостей реалізації експериментальних досліджень пов'язано з використанням емуляторів (імітаторів) реальних пристроїв на базі напівпровідникових перетворювачів енергії. Емулятори широко використовуються дослідниками і виробниками інверторів. В ФЕС це відноситься до емуляторів фотоелектричної батареї (ФБ), які дозволяють адекватно оцінити ефективність, надійність і продуктивність інвертора для скорочення періоду його розробки. При розробленні та експериментальному тестуванні фотоелектричних перетворювачів достатньо часто потрібні повторювані умови тестування, щоб обґрунтувати їх алгоритми управління. Це стосується також розроблення МРРТ контролерів, коли за допомогою емулятору відтворюються різні погодні умови, раптове затінення ФБ тощо. На сьогодні відомі різноманітні емулятори ФБ [3], [40], [45], характеристики

яких максимально наближені до реальних ФБ, деякі з них є комерційно доступними [46].

### **1.3. Аналіз існуючих рішень щодо підвищення енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення**

#### **1.3.1. Основні шляхи зменшення впливу часткового затінення**

Для малих локальних об'єктів, здебільшого приватних будинків характерним є розташування фотоелектричного масиву (ФЕМ) на даху. ФЕМ містить певну кількість фотоелектричних панелей (ФЕП). ФЕП певним чином розташовані на поверхні даху і з'єднані між собою - утворюють конфігурацію масиву. Проте енергетична продуктивність ФЕС є вразливою до зовнішніх факторів, найважливішим з яких є часткове затінення (Partial Shading Condition, PSC), спричинене хмарами та навколишніми об'єктами (будівлями, деревами). Так, часткове затінення, що створюється димоходом висотою 2 метри може призвести до щорічних втрат енергії 2-12.5% [47]. В роботі [48] стверджується, що затінення хмарами та деревами може знижати потужність генерації ФЕС до 60%.

Максимальну енергетичну продуктивність масиву ФЕП забезпечує алгоритм відстеження точки максимальної потужності MPPT (Maximum Power Point Tracking), що реалізується MPPT-контролером для перетворювача постійної напруги на вході інвертора ФЕС. За однакової освітленості ФЕП в масиві його загальна характеристика потужності  $P(U)$  має монотонний характер з вираженим глобальним максимумом GMPP (Global Maximum Power Point). PSC призводить до порушення монотонності загальної характеристики потужності  $P(U)$  з появою поряд з глобальним множинних локальних піків потужності LMPP (Local Maximum Power Point). В цих умовах забезпечення максимальної енергетичної продуктивності масиву ФЕП ускладнюється.

Визначилося декілька підходів вирішення проблеми PSC. Одним з основних є пошук рішення методу MPPT, яке б забезпечувало відстеження глобального

максимуму за любых умов. Інші рішення пов'язані з пошуком конфігурацій масивів ФЕП із зменшеним впливом затінення на енергетичну продуктивність.

Розглянуті автором роботи щодо розв'язання проблеми часткового затінення можливо розподілити за напрямом (Таблиця 1.1). В певній мірі ділення в Таблиця 1.1 умовне, тому що функціонування алгоритму МРРТ зазвичай розглядають і оцінюють для конкретного масиву, але певну перевагу має науковий інтерес до конфігурацій ФЕМ.

Таблиця 1.1 Розподіл досліджень щодо розв'язання проблеми часткового затінення

Пошук рішень щодо методів МРРТ	Пошук конфігурацій масивів ФЕП
[49], [50], [51], [52], [53], [50], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86]	[87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [89], [94], [47], [95], [95], [96], [97], [98], [99], [96], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [28], [132]

### 1.3.2. Алгоритми МРРТ в умовах часткового затінення фотоелектричних систем

Нижче надано стислі характеристики ряду робіт щодо контролерів МРРТ.

Реалізація пошуку точки МРРТ здійснюється з використанням різних алгоритмів, опис і порівняння яких надається в оглядовій роботі [133]. Сучасні оглядові роботи підкреслюють, що МРРТ-алгоритми для фотоелектричних систем в PSC розвинулись від класичних методів (P&O, INC) до гібридних та інтелектуальних підходів. Стаття [134] систематизує як традиційні, так і оптимізаційні методи, включно з PSO, GA та нейромережевими алгоритмами, демонструючи їхню ефективність у складних умовах PSC. Інші огляди [59], [60] пропонують порівняльний аналіз різних МРРТ-технік, класифікуючи їх за принципом роботи та оцінюючи придатність для PSC.

Контролери МРРТ швидко вдосконалюються. За цього їх можна поділити на традиційні та передові, що відзначається в оглядовій роботі [61]. Традиційні не

розрізняють локальні та глобальні максимуми, тому їх ефективність відносно низька. В дослідженні наведені таблиці порівняння між традиційними і передовими методами МРРТ за відсутності єдиного рейтингу, який повинен базуватися на застосуванні, швидкості відстеження, ефективності, складності та вартості та інше.

В огляді методів МРРТ [62] стверджується, що підвищення ефективності МРРТ пов'язано з використанням стохастичних алгоритмів та штучного інтелекту. В оглядовій роботі [63] відзначаються переваги передових метаевристичних алгоритмів і гібридних методів в умовах зміни умов навколишнього середовища. Аналогічні висновки щодо більшої ефективності в умовах часткового затінення методів оптимізації рою часток (PSO) и пошуку зозулі (CS) зроблені в роботі [64]. Оцінку проведено для послідовного ФЕМ із чотирьох ФЕП для чотирьох статичних схем часткового затінення, що недостатньо для якісної оцінки функціонування методу МРРТ. Оцінка в динаміці зміни затінення відсутня.

Автори публікації [69] зосередили увагу на проблематиці і класифікації алгоритмів МРРТ на основі FLC для ФЕС. Авторами запропонований власний алгоритм МРРТ, представлено схему FLC, таблиця правил, які базуються на концепції асиметричних функцій належності. Запропонована схема реалізована в режимі реального часу на 64-бітному процесорі PowerPC dSPACE DS1104. Запропонований алгоритм МРРТ, згідно з результатами експериментів є простим, точним та забезпечує швидку збіжність до МРРТ. Запропонований механізм нечіткого висновку не перевірявся авторами в умовах часткового затінення.

Огляд та порівняння продуктивності алгоритмів оптимізації на основі роєвого інтелекту при відстеженні точки МРР ФЕС в умовах PSC зроблений в [70]. Авторами наведено порівняльний аналіз підходів до оптимізації на основі роєвого інтелекту, які останнім часом стали популярними через недоліки традиційних алгоритмів МРР у різних умовах експлуатації. Але проведений аналіз обмежений послідовною конфігурацією ФЕМ з чотирьох панелей під дією двох статичних шаблонів затінення.

Авторами [74] запропоновано оригінальний алгоритм адаптивної нечіткої логіки (AFL) для розв'язання задачі відстеження МРРТ в умовах PSC ФЕС.

Запропонований алгоритм базується на реалізації системи нечіткого логічного висновку (FIS) типу Такагі-Сугено (TS). Запропонована ФЕС в умовах PSC розроблена та змодельована за допомогою середовища MATLAB/Simulink. Результати моделювання показують, що AFL здатний правильно відстежувати GMPP і має кращі енергетичні характеристики порівняно з P&O. Дослідники обмежились перевіркою алгоритму MPPT на послідовному масиві з 5-и ФЕП чотирьох статичних шаблонів з різницею радіації між сусідніми модулями від 200 до 450 Вт/м<sup>2</sup>, що фізично маловірогідно.

Виробники комерційних інверторів малої потужності широко використовують алгоритм P&O [135]. Однак, це не базовий, спрощений варіант, а його модифіковані версії. Замість переходу на кардинально нові, але дорогі та складні інтелектуальні алгоритми, інженери зосередилися на вдосконаленні перевіреного методу, що дозволяє досягти ефективності за прийнятною вартістю.

Дослідження [136] приділяє увагу вдосконаленню традиційних MPPT (збурення та спостереження, підйом на пагорб та інкрементальна провідність) і надати кількісну оцінку пошуку GMPP для визначення їх порівняльної ефективності. Оцінка зроблена на чотирьох критеріях: точність відстеження, час збіжності, тривалість коливань напруги та ефективність перехідних процесів під час пошуку GMPP. Проте автори для оцінки використовують 16 статичних ступінчастих змін радіації, які послідовно накладаються на модель ФЕМ. В якості моделі використана найбільш вразлива для ФЕМ послідовна конфігурація з 16 ФЕП. Шаблони тіні задаються значеннями з дискретністю 200 Вт/м<sup>2</sup>, в них присутні стрибкоподібні переходи від 1000 Вт/м<sup>2</sup> до 400 Вт/м<sup>2</sup>, що не відповідає фізиці реального затінення хмарами або об'єктами.

Розглянуті вище, та інші методи вдосконалення MPPT є дуже популярними для розробників та науковців. Але вони поки ще не отримали широкого впровадження в реальних комерційних інверторах для ФЕС. Більшість перевірок цих методів проведено в межах імітаційних випробувань. Аналіз досліджень, присвячених порівнянню методів MPPT, виявив, що більшість оглядових праць обмежуються якісними характеристиками замість кількісних показників. У порівняльних таблицях

використовуються оцінки «висока складність», «середня швидкість» або «низька точність», проте відсутні конкретні числові дані, вагові коефіцієнти або результати стандартизованих тестів. Часто відсутні базові параметри ФЕС, як енергетичний приріст, похибка відстеження або стабільність роботи під PSC.

### **1.3.3. Конфігурації фотоелектричних масивів з послабленням впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність**

Розробники все частіше звертають увагу на геометричні конфігурації розташування та з'єднання сонячних панелей. Основна ідея полягає в тому, щоб «розсіяти» вплив тіні по всьому масиву, замість того, щоб дозволити їй повністю блокувати одну окрему групу послідовно з'єднаних елементів. Такий підхід демонструє високу ефективність без потреби у дорогому додатковому обладнанні. За рахунок специфічного чергування з'єднань вдається досягти більш рівномірного розподілу радіації між ФЕП, що значно покращує загальну стійкість системи до локальних затінь.

Реконфігурація виступає як напрям, що дозволяє динамічно або статично змінювати топологію з'єднань або фізичне розташування ФЕП для вирівнювання сонячної радіації в рядах масиву, тим самим мінімізуючи втрати та спрощуючи відстеження MPPT. В роботі [87] розглядаються обидва методи реконфігурації масивів з метою зменшення впливу PSC:

- Динамічна реконфігурація - зміна електричних з'єднань модулів за допомогою комутаційної матриці та алгоритмів, з метою швидкого налаштування під часткове затінення і підвищення видобутку енергії. Матриця перемикання дозволяє системі перемикатися між послідовними та паралельними з'єднаннями згідно алгоритмів оптимізації.
- Статична реконфігурація означає одноразове або рідкісне фізичне переміщення модулів у масиві (або їх монтаж у певній фіксованій схемі) так, щоб при типових шаблонах затінення тіні електрично розсіювались по масиву, а не зосереджувались в одному місці [98]. Електричні зв'язки при цьому не міняються динамічно — тобто після перестановки електрична топологія

залишається фіксованою під час експлуатації (на відміну від динамічної, де комутатори змінюють з'єднання в реальному часі).

Загальна структура системи реконфігурації ФЕМ з замкненим циклом для оптимізації роботи ФЕМ наведена в [88].

Масив піддається впливу навколишнього середовища, а Система збору інформації (Information detection system) зчитує та передає електричні (струм і напруга) та кліматичні параметри (температура і рівень радіації), що характеризують поточну робочу точку кожної ФЕП або стрингу. Отримані дані передаються до Моделі ФЕМ (Model of PV array), де реальні виміряні параметри використовуються для створення цифрового двійника масиву та прогнозування його поведінки при різних конфігураціях. Результати моделювання обробляються Центральним блоком управління з алгоритмом оптимізації (Central Control unit with optimization algorithm), який обирає серед множини можливих варіантів найкращий. Оптимальна конфігурація (Optimal configuration) визначає подальший алгоритм зміни системи для досягнення GMPP в поточних умовах PSC з генерацією команд керування.

Обидва типи реконфігурації безпосередньо впливають на ФЕМ, замикаючи цикл управління. Це призводить до зміни вихідних параметрів (струму та напруги), які знову зчитуються системою збору інформації на наступному кроці дискретизації. Таким чином, система безперервно адаптується до динамічних умов навколишнього середовища, забезпечуючи максимальну енергоефективність локального об'єкта.

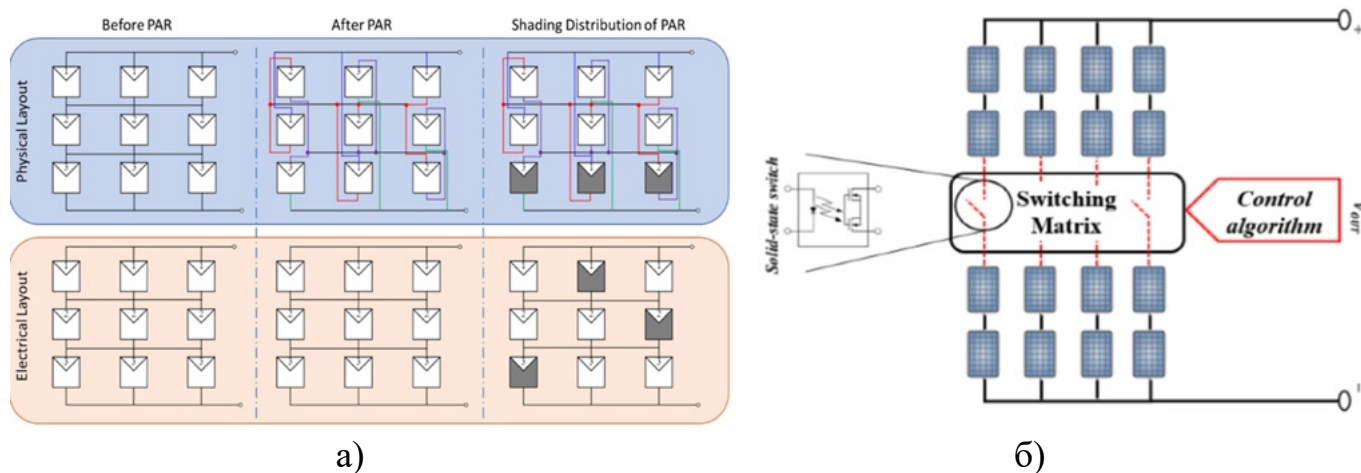


Рис. 1.2 Методи реконфігурації фотоелектричних панелей: а) фізична, б) електрична

Підхід з реконфігурацією масиву ФЕП для підвищення його вихідної

потужності в умовах динамічного PSC розглянуто в роботі [47]. Досліджується PSC на чотирьох класичних конфігураціях масиву  $5 \times 5$  ФЕП для двох методів реконфігурації: фізичної і електричної (Рис. 1.2). У обох методів є важливі недоліки: електрична реконфігурація потребує великої кількості датчиків та перемикачів, а фізична вимагає значного подовження електричних силових кабелів.

Метод SuDoKu базується на логіці однойменної гри та застосовується для реконфігурації ФЕМ по принципу розташування ФЕП (Рис. 1.3) у матриці ( $9 \times 9$  чи  $4 \times 4$ ) так, щоб тень рівномірно розподілялась по рядках і стовпцях, по правилу: жодна перша цифра номеру ФЕП не повторюється в одному ряду, стовпці чи підквадраті [99]. Дослідження [100] показують, що SuDoKu спрощує форму  $P - U$  кривої, часто зводячи її до одного глобального максимуму і підвищує генерацію потужності від 4% до 26% порівняно зі схемою ТСТ [96]. Проте є суттєві обмеження: метод жорстко прив'язаний до квадратних форм масивів певних розмірів, фізична реалізація вимагає складного планування кабелів, оскільки ФЕП з одного електричного ряду можуть бути рознесені в різні кути фізичного ФЕМ [101].

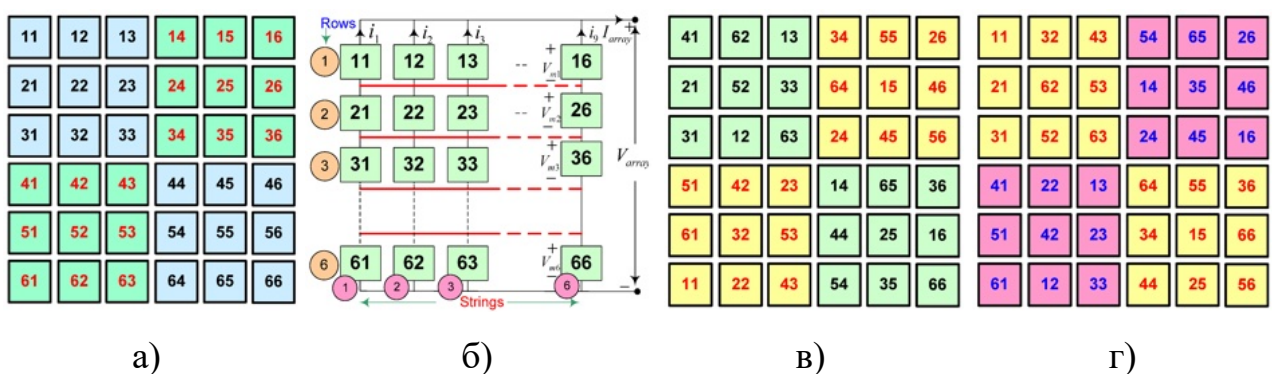


Рис. 1.3 Розташування ФЕП  $6 \times 6$ : а) розміщення ФЕП, б) конфігурація ТСТ, в) розміщення ФЕП для I-SuDoKu, г) розміщення ФЕП для SuDoKu

Квадрат домінування (Dominance Square, DS) використовує математичну операцію дедукції для визначення нових координат ФЕП і мінімізує різницю струмів між будь-якими двома рядами масиву, що робить  $I - U$  характеристику більш передбачуваною [102]. Модель ФЕМ  $5 \times 5$  показав підвищення в PSC для двох статичних шаблонів «короткий-широкий» та «довгий-вузький» порівняно з ТСТ. Проте метод лише для квадратних масивів і підвищення точності приводить до

значного збільшення довжини з'єднувальних проводів і зростання внутрішнього опору системи (Рис. 1.4, а) [103].

Техніка Zig-Zag передбачає переміщення ФЕП за зигзагоподібною траєкторією, де панелі з непарних рядів зміщуються в одному напрямку, а з парних — у протилежному, як показано на (Рис. 1.4, б). Це створює ФЕМ, де фізично сусідні модулі належать до різних електричних ланцюгів, що розмиває межі тіні [104]. Метод порівняно нескладний у реалізації, але, як визнають автори дослідження [105], обмежений невеликими масивами з максимальним досліджуванним розміром  $4 \times 4$ .

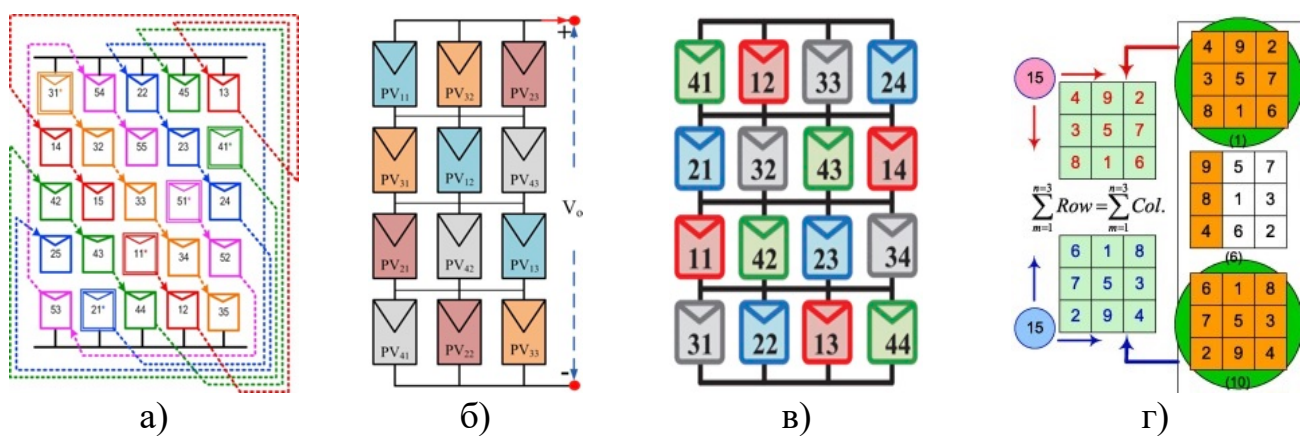


Рис. 1.4 Схеми з'єднання ФЕП по методу: а) DS, б) Zig-Zag, в) Ken-Ken, г) MS

Реконфігурація на основі головоломки Ken-Ken (KKSP) використовує математичні правила, що забезпечує хаотичне, але структуроване переміщення ФЕП (Рис. 1.4, в). Перевагою методу, по словам дослідників, є його масштабованість та здатність ефективно працювати з затіненням центральної частини масиву. Проте складність проектування такої системи є дуже високою, а налаштування трудомістким [92].

Метод Магічного квадрата (Magic Square, MS) використовує математичну матрицю, де сума чисел у кожному рядку, стовпці та по діагоналі є однаковою (Рис. 1.4, г) [100]. В ФЕМ це реалізує вирівнювання сонячної радіації, оскільки кожен рядок масиву ТСТ отримує приблизно однакову сумарну енергію навіть при PSC. Для масиву  $9 \times 9$  метод MS забезпечує плавні характеристики потужності, але розрахунок вимагає квадратних ФЕМ зі значними обчислювальними зусиллями [106].

Фізичне розсіювання затінення в масиві (Shade Dispersion Physical Array, SD-PAR) направлене на максимізацію фізичної відстані між ФЕП, які з'єднані паралельно в один електричний вузол. Метод ефективний у боротьбі з локальними тінями від дерев або димоходів, однак обмежений через надмірну довжину з'єднувальних кабелів з відповідним збільшенням омичних втрат [137].

В роботі [138] аналізується продуктивність за PSC ФЕП, налаштованих в 19 конфігурацій під впливом 18 статичних шаблонів затінення (Рис. 1.5) з чотирма величинами опромінення від 250 до 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Автори стверджують, що методи статичної реконфігурації вимагають менше обчислювальної потужності, легше реалізується, понижують вимоги до обладнання та обслуговування в умовах обмеження ресурсів. Дослідження обмежено ФЕМ 4x4 з статичними режимами PSC.

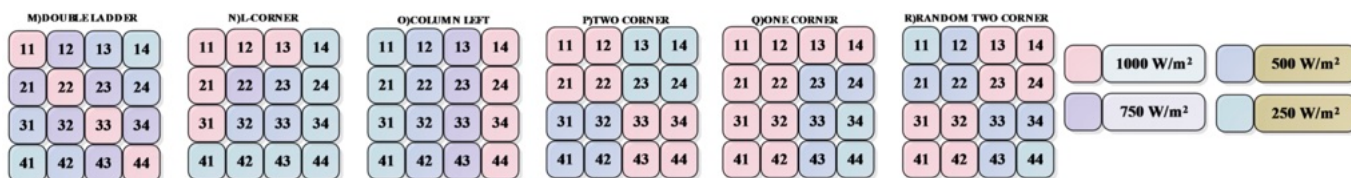


Рис. 1.5 Статичні шаблони затінення

Покращена конфігурація ФЕП (ІОЕ) в масиві пропонується в роботі [108] для розсіювання ефекту затінення. Підвищення потужності порівняно з традиційними конфігураціями 1,55 – 28,21 %. Автори розглянули шість сценаріїв затінення, мова в яких йде про статичні режими затінення.

Дослідження щодо порівняння послідовних, паралельних та ТСТ конфігурацій масиву з шести ФЕП в умовах часткового затінення проведено в роботі [71]. Перевагу надано паралельній конфігурації. Рекомендація є обмеженою і відноситься до конкретного масиву з шести малопотужних ФЕП за одного сценарію статичного затінення.

Шляхом імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink [112] розроблений метод реконфігурації, заснований на покращеній гібридній оптимізації рою частинок (HPSO) для ТСТ конфігурації ФЕМ. HPSO додає гібридизацію в генетичні алгоритми та використовує нелінійні методи для збалансування можливості алгоритму локального та глобального пошуку. Метод балансує струм

рядка масиву, змінюючи електричні з'єднання ФЕС (Рис. 1.6). Результати моделювання показують підвищення потужності від 6,39 % до 28,26 %, а крива потужності отримує один виражений пік.

Процес динамічної реконфігурації ФЕМ, показаний на Рис. 1.6, передбачає інтеграцію інтелектуального блока моніторингу, системи збору даних та комутаційної матриці, керованої алгоритмом оптимізації (HPSO). Потрібно забезпечити точність датчиків, стабільність передачі даних і синхронізацію між апаратною і програмною частиною, що значно ускладнює проектування та налаштування. Система функціонує у режимі реального часу, що мінімізує втрати енергії при PSC, але вимагає високої обчислювальної потужності та ретельного калібрування. З точки зору надійності, використання великої кількості комутаційних елементів і складних алгоритмів підвищує ризик відмов окремих компонентів. Надійність залежить від якості сенсорів, стабільності алгоритму та відмовостійкості комутаційної матриці. Динамічна реконфігурація забезпечує значні енергетичні переваги, але підвищує складність проектування і потребу у регулярному технічному обслуговуванні, пошуку балансу між ефективністю і ризиком зниження довговічності системи.

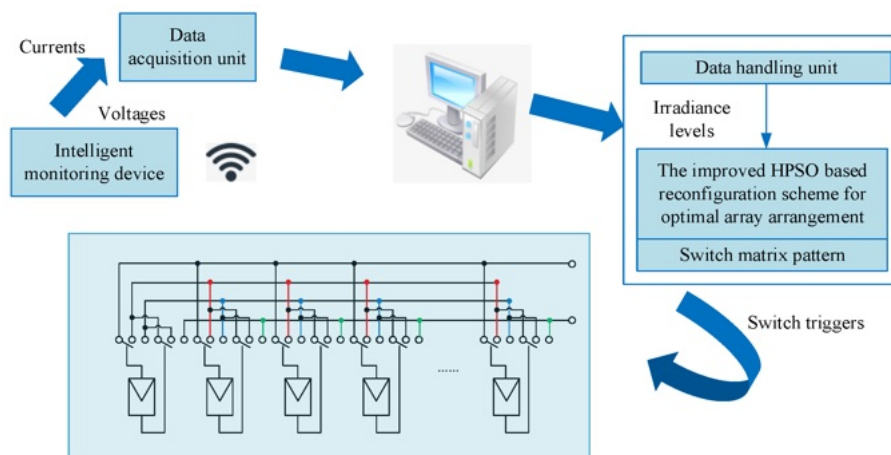


Рис. 1.6 Блок-схема реконфігурації фотоелектричних систем

В роботі [89] опублікований огляд, у якому систематизовано шістьдесят сім методів реконфігурації з оцінкою за критеріями прибутковості, генерації потужності та легкості інтеграції з МРРТ. Дослідники підкреслюють, що вплив тіні залежить від геометрії затінення та початкової конфігурації масиву. Робота підкреслює основні

перепони впровадження динамічних систем, серед яких висока вартість датчиків та складність комутаційних матриць, пропонуючи розвиток статичних методів як більш економічно доцільних.

#### **1.3.4. Математичне моделювання впливу часткового затінення в фотоелектричних системах**

Програмне середовище MATLAB/Simulink є основним інструментом для дослідження поведінки сонячних систем, проте існуючі моделі мають певні обмеження. Хоча електричні параметри самих ФЕП моделюються досить точно, підхід до задання умов затінення часто залишається надто спрощеним або статичним. Більшість дослідників використовують шаблони тіні з великим кроком зміни освітленості, що створює «ступінчастий» ефект, який рідко зустрічається в реальних умовах. Відсутність плавної динаміки та врахування реальної мінливості сонячної радіації в моделях не дозволяє повноцінно оцінити швидкість реакції та точність алгоритмів управління в динамічних PSC.

У більшості розглянутих наукових робіт прийнято загальний підхід щодо використання математичної моделі ФЕ комірки як бази для побудови характеристик  $I - U$  та  $P - U$ . Зазвичай застосовується еквівалентна схема з одним або кількома діодами, резистивними елементами та джерелом струму, що описує генерацію фотоструму. На основі відповідних рівнянь формується залежність між струмом і напругою, яка дозволяє отримати криву  $I - U$ , а через добуток напруги та струму – криву  $P - U$ . Такий підхід забезпечує універсальність і дає можливість враховувати вплив температури, радіації та параметрів елементів.

Подальший перехід від моделі окремої комірки до моделі ФЕП здійснюється шляхом масштабування та врахування послідовного й паралельного з'єднання комірок. Це дозволяє відтворити поведінку реальної ФЕП та оцінити її роботу в різних умовах освітленості. Таким чином, більшість досліджень спираються на стандартну математичну основу, яка забезпечує відтворюваність результатів і створює базу для порівняння різних алгоритмів керування та оптимізації.

Конкретні особливості моделей пов'язані з завданням схем затінення та

обробкою результатів. В роботі [95] відзначається, що вплив часткового затінення залежить від типу затінення, схеми затінення та конфігурації з'єднання ФЕП. Робота має загальний характер дослідження робочих характеристик в середовищі MATLAB/Simulink ФЕП в умовах часткового або повного затінення і визначає можливості зменшення впливу. У статті наведено приклад PSC ФЕМ 5x5 (Рис. 1.7, а), що є реалістичним у практичних умовах експлуатації ФЕС, але водночас градації інсоляції від 100 до 800 Вт/м<sup>2</sup> (Рис. 1.7, б) виглядають умовно. У реальних умовах інтенсивність сонячної радіації змінюється плавно, а не дискретними рівнями, тому такий шаблон не типовий.



Рис. 1.7 Шаблон затінення 5×5 і результати реконфігурації за різними методами

Так в роботі [135] складено масив з 8 ФЕП дві гілки з 4 ФЕП. Для ФЕП масиву використано чотири схеми (шаблони) затінення з радіацією від 200 Вт/м<sup>2</sup> до 1000 Вт/м<sup>2</sup>: слабе затінення – для 6 ФЕП радіація 1000 Вт/м<sup>2</sup>, для одної - 800 Вт/м<sup>2</sup>, для другої - 600 Вт/м<sup>2</sup>; помірне затінення - для 4 ФЕП радіація 1000 Вт/м<sup>2</sup>, для двох - 800 Вт/м<sup>2</sup>, для інших двох - 500 Вт/м<sup>2</sup>; сильне затінення – дві ФЕП - 1000 Вт/м<sup>2</sup>, одна - 800 Вт/м<sup>2</sup>, дві - 600 Вт/м<sup>2</sup>, дві - 400 Вт/м<sup>2</sup>, одна - 200 Вт/м<sup>2</sup>; сильне затінення – для 2 ФЕП радіація 1000 Вт/м<sup>2</sup>, для двох - 600 Вт/м<sup>2</sup>, для інших чотирьох - 400 Вт/м<sup>2</sup>. Дослідження виконано в статистиці для кожної зі схем затінення, а потім додатково в разі зміни шаблону затінення з інтервалом 0,4 – 1,2 секунди. Методика моделювання має дещо екстремальний характер для оцінки швидкості відстеження, точності та стабільності роботи МРРТ. Обґрунтування схем затінення та градацій радіації для ФЕП за цього відсутні.

В [110] подана оригінальна схема конфігурації масиву ФЕП на основі ходів шахового коня (Knight coin), подібних букві “L” (Рис. 1.8, а)), що переслідує мету рівномірного розподілу затінення між ФЕП за часткового затінення масиву. Таке компонування ФЕП утворює виключно квадратний масив. Авторами виконано

дослідження реконфігурації лише для шести шаблонів статичного затінення (Рис. 1.8, б)).

Зниження ефекту часткового затінення в разі управління ковзним режимом, що налаштований на основі алгоритму оптимізації рою часток запропоновано в роботі [68]. Дослідження виконано за використанням Matlab/Simulink з почерговим змінюванням радіації ФЕП для 3 сценаріїв РSC. Автори обмежилися розглядом масиву з послідовним з'єднанням 4 ФЕП під дією статичного опромінення з фіксованими градаціями радіації  $200 \text{ Вт/м}^2$  при незмінному напрямі.

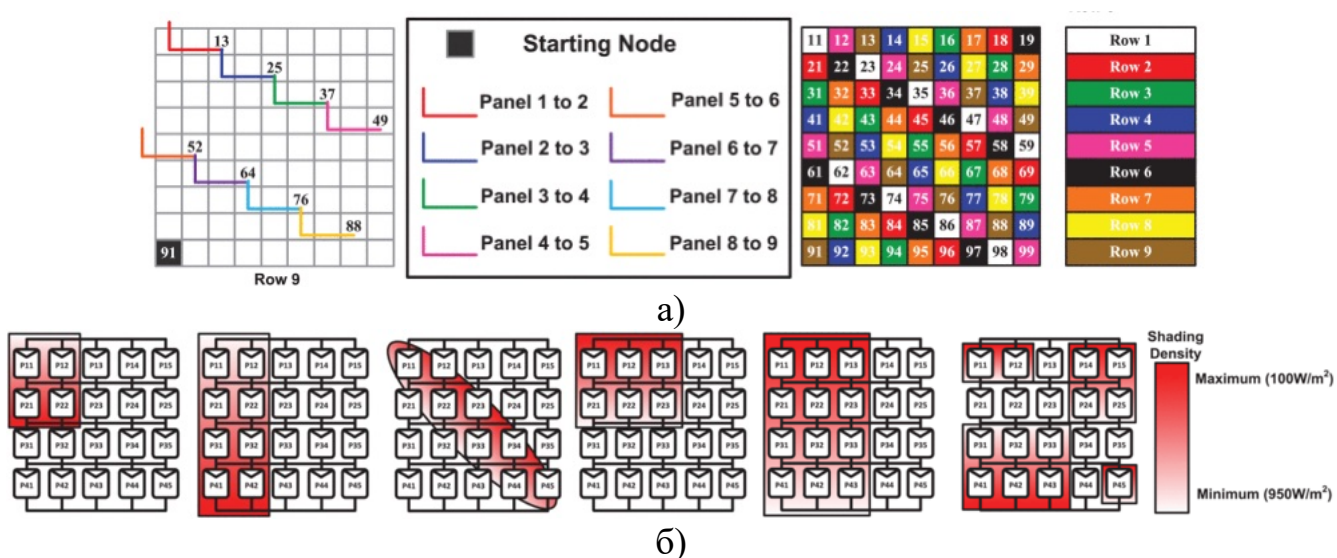


Рис. 1.8 а) Конфігурація масиву ФЕП на основі ходів шахового коня (Knight coin), б) шаблони затінення

У роботі [73] оцінюється продуктивність п'ятнадцяти існуючих методів конфігурації статичних ФЕ-масивів за різних схем затінення. Але в статті зроблено ряд спрощень. Так конфігурації шаблонів затінення, наведені на Рис. 1.9, є надто геометрично ідеальними з різким перепадом інсоляції від  $1000 \text{ Вт/м}^2$  до  $200 \text{ Вт/м}^2$  без перехідної зони, що фізично некоректно. Автори розглянули конфігурації із надмірним паралельним з'єднанням модулів, що приводить до низьковольтних ФЕС з екстремально високими струмами.

Цікавий підхід приведено в роботі [139], де розглядається динамічний режим змінювання радіації для ФЕП, коли хмара швидко переміщується вздовж масиву. Але рівень радіації для всіх ФЕП матриці ( $1000, 800, 600, 400 \text{ Вт/м}^2$ ) змінюється одночасно. Градації радіації між ФЕП в матриці не розглянуті. Також розглянуто три

сценарії з різною радіацією ФЕП ( $1000, 800, 600 \text{ Вт/м}^2$ ) в масиві. Фактично це три статичних режими затінення. В матриці використовуються лише 4 ФЕП, з'єднаних послідовно-паралельно, що не дозволяє поширити результати для іншої кількості ФЕП.

Переваги адаптивного нечіткого контролеру MPPT з підтримкою пояснювального штучного інтелекту (ХАІ), оптимізованого для двосторонніх сонячних фотоелектричних панелей, в умовах часткового затінення відзначаються в роботі [65]. Модифікований алгоритм оптимізації рою часток (MPSO), що забезпечує пошук GMPPT при нескладній статичній схемі затінення, представлено в роботі [66].

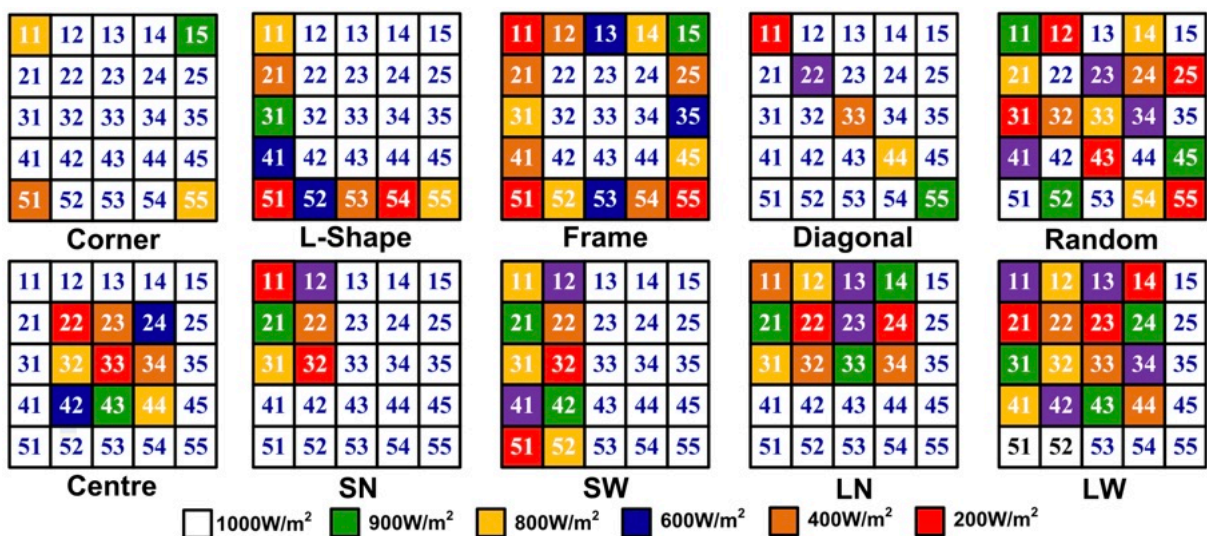


Рис. 1.9 Різні види шаблонів затінення, що використовуються для аналізу

В роботі [47] показано, що метод електричної реконфігурації масиву у всіх сценаріях PSC демонструє найбільш стабільну роботу та найменші втрати енергії. Динамічні сценарії затінення в моделюванні спрощені до трьох статичних згідно напрямку: горизонтально, вертикально та діагонально (Рис. 1.10).

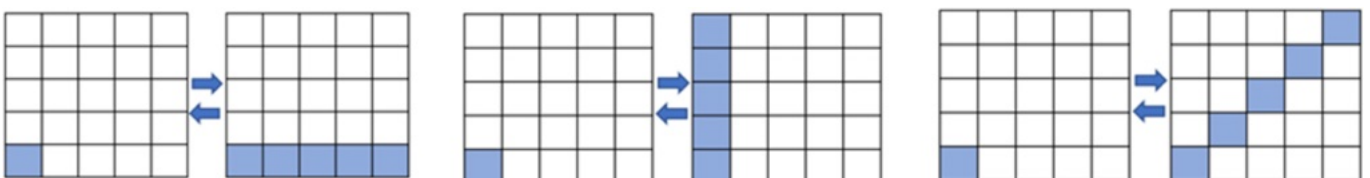


Рис. 1.10 Динамічні сценарії затінення

В статті [140] проведено дослідження топологій SP та ТСТ ФЕП під PSC з метою отримання найкращої топології для різних шаблонів затінення, проте з точки

зору реальних фізичних процесів у ФЕС вона містить низку надмірних спрощень. Основним недоліком є використання занадто різкого контрасту між незатіненими ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ ) та затіненими ( $200 \text{ Вт/м}^2$ ) ділянками масиву. У природних умовах, особливо при проходженні хмарності або затіненні від віддалених об'єктів, завжди існує зона півтіні (градієнт інсоляції). Відсутність перехідних значень призводить до ідеалізованих, «сходинок» результатів, які не враховують реальну роботу байпасних діодів. Окрім цього авторами розглянуто лише статичні шаблони або рух тіні строго «вздовж» та «поперек» масиву (Рис. 1.11). Це значно звужує область дослідження, оскільки в реальній експлуатації тінь зазвичай рухається під довільними кутами до фронту масиву. Відсутність сценаріїв із діагональним проходженням тіні та велика дискретність зміни величини затінення не дозволяють достовірно оцінити поведінку GMPP та швидкість реакції MPPT-контролера на динамічні зміни.

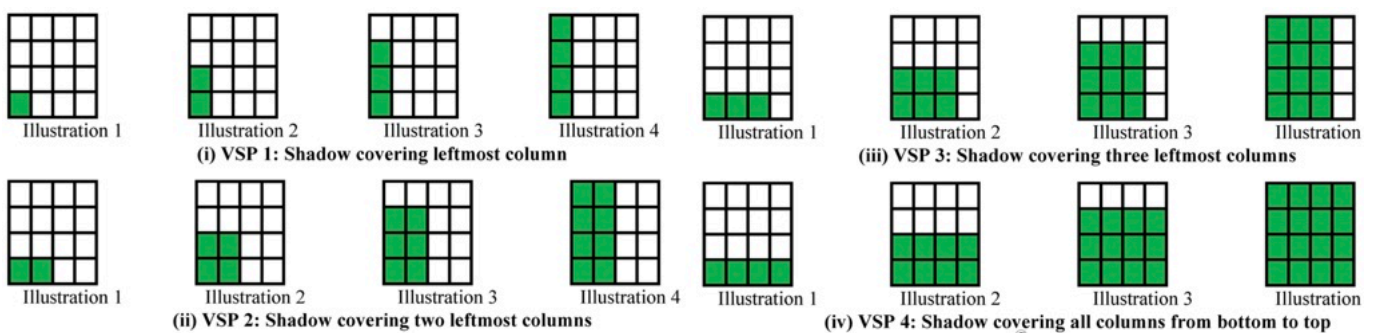


Рис. 1.11 Вертикальні і горизонтальні шаблони затінення

Нечітке логічне керування (FLC) стає методом оптимізації продуктивності за змінних умов погоди та опромінення. У роботі [58] використаний MATLAB/Simulink для порівняння багатьох стратегій MPPT на основі нечіткого логічного контролера (FLC). Автори детально та розгорнуто представили етапи побудови моделі в середовищі MATLAB/Simulink, проте сам процес моделювання було виконано лише для випадків рівномірного розподілу сонячної радіації зі змінними її величинами.

Аналіз впливу часткового затінення для масиву з 6х6 ФЕП подано в роботі [72]. Розглянуто послідовно-паралельна (SP), повністю перехресно-зв'язана (ТСТ), мостова (BL) і сотова (НС) схеми з'єднання ФЕП. Враховувалися чотири схеми затінення: довго- і коротко-вузька, довго- і коротко-широка зі змінною інтенсивністю

радіації (Рис. 1.12).

Показано, що найменший вплив часткового затінення досягається для ТСТ конфігурації. Однак це стосується конкретного масиву 6x6 ФЕП за обмеженням схем статичного затінення з великою дискретністю радіації ( $200 \text{ Вт/м}^2$ ).

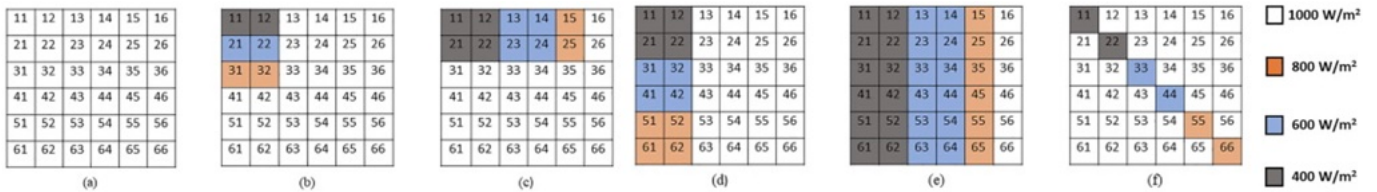


Рис. 1.12 Статичні схеми затінення

В [141] описаний процес моделювання у програмному середовищі MATLAB/Simulink та оцінки продуктивності різних топологій  $5 \times 5$  ФЕМ за восьми статичних шаблонів затінення (Рис. 1.13). Розглянуто основні класичні топології ФЕМ з статичними шаблонами нерівної інсоляції. Оцінка продуктивності топологій ФЕМ проведена з урахуванням порівняння основних енергетичних характеристик ФЕМ. Результати показали, що величина GMPP залежить від топології фотоелектричного масиву та шаблону затінення. В дослідженні відсутній аналіз динаміки процесу PSC.

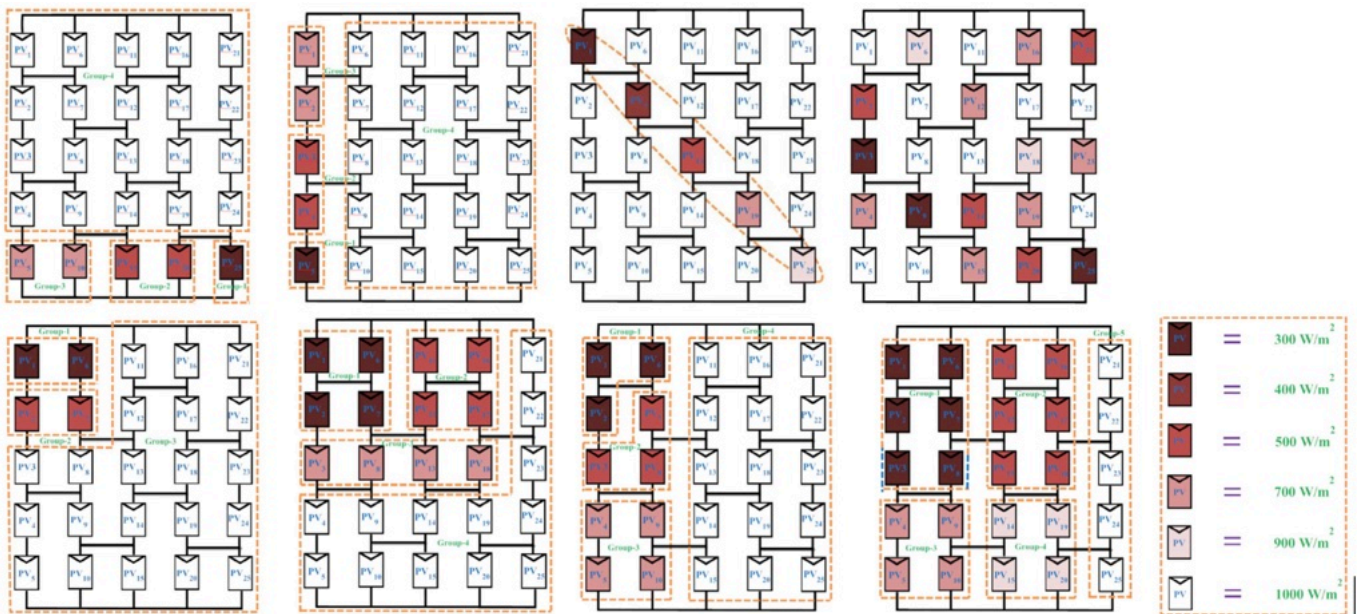


Рис. 1.13 Представлення різних шаблонів затінення

В разі розташування масиву на даху будівлі основним фактором затінення є рухома відповідно напрямку вітру смуга тіні від хмар.

У більшості досліджень моделювання часткового затінення ФЕМ здійснюється на основі фіксованої кількості шаблонів, які задаються наперед. Здебільшого розгляд стосується квадратних ФЕМ 4x4, 5x5, ... 9x9. При розташуванні на даху це не завжди можливо і масиви можуть бути в 1, 2, 3 ряди. Окрім цього, градації радіації в шаблонах часто не мають фізичного обґрунтування й у ряді робіт обираються екстремальні значення лише для перевірки працездатності алгоритмів МРРТ. Такий підхід дозволяє оцінити стійкість методів до різних умов, але не враховує реальних кліматичних факторів, що обмежує практичну достовірність результатів.

Динамічні сценарії затінення зазвичай спрощуються до зміни шаблонів у часі з обмеженням напрямів руху тіні кутами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $90^\circ$ . Зменшення дискретності градацій та розширення напрямів руху значно ускладнюють процес підготовки моделей, що потребує автоматизації формування шаблонів. Таким чином, сучасні підходи забезпечують базову перевірку алгоритмів МРРТ, але для підвищення реалістичності моделювання необхідна розробка інструментів автоматизованого створення більш складних і наближених до реальних сценаріїв затінення.

Проте питання впливу динаміки процесу затінення на режим роботи масиву та роботу МРРТ на даний час вивчені недостатньо і потребують додаткового вивчення. Це стосується вдосконалення математичної моделі масиву панелей за різної їх конфігурації з врахуванням руху смуги затінення. Така модель з методикою визначення рекомендованої конфігурації масиву ФЕП може бути базою для проектування ФЕС ЛО в конкретних умовах.

#### **1.4. Формулювання завдань роботи**

На підставі аналізу можна сформулювати наступні завдання:

1. Розробка рішень щодо управління енергоспоживанням за прогнозом ФЕ в разі використання ПТК разом зі стандартним гібридним інвертором, що сприятимуть підвищенню самоспоживання ФЕ і зниженню витрат на ЕЕ. Передбачити реалізацію за тризонної тарифікації з врахуванням комплексу питань щодо: вибору параметрів, рекомендованого сценарію навантаження та сценаріїв управління згідно прогнозу генерації ФЕ.

2. Розробка алгоритму визначення параметрів та сценарію управління з формуванням стану заряду АКБ згідно прогнозу генерації ФЕ, що забезпечить підвищення рівня споживання ФЕ та зменшення витрат на ЕЕ з мережі.
3. Використання прогнозу з відкритих веб-ресурсів сприятиме уніфікації рішень в разі використання стандартних комерційних гібридних інверторів.
4. Розробка експериментальної установки з емулятором ФБ, що дозволить досліджувати апаратні рішення в реальному часі за різних графіків генерації ФБ та навантаження.
5. Аналіз кліматичних умов для місця знаходження ЛО та обґрунтування методики моделювання руху смуги затінення.
6. Розробка загальної математичної моделі масиву фотоелектричних панелей з урахуванням напрямку та швидкості руху смуги затінення.
7. Аналіз енергетичних показників для можливих конфігурацій масиву заданої потужності за результатами моделювання. Визначити можливості щодо топології та з'єднань ФЕП в масиві для зменшення впливу затінення на енергетичні показники в процесі руху смуги затінення.
8. Скласти за отриманими рекомендаціями конфігурації масиву за різної кількості ФЕП та здійснити моделювання з оцінкою показників. Визначити загальні рекомендації для конфігурацій масиву з різною кількістю ФЕП та діапазон потужності ФЕС, для якого це можливо.
9. Розробка експериментального зразка ПТК та його випробування на діючій установці.

## **2. РОЗРОБКА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ЗА ПРОГНОЗОМ**

Дослідження розпочато в межах НДР за договором № ДЗ/92-2019 «Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системах енергоменеджменту локальних об'єктів» (№ держреєстрації 0119U103640) (2019-2020 рр.) з врахуванням існуючих на даний період рішень. Проте отримані результати цілком відповідають сучасним комерційним рішенням щодо управління енергоспоживанням ФЕС, зокрема, типу Sunny Home Manager 2.0 від SMA Solar [142]. Розглянуто можливості використання гібридного мережевого інвертора (ГМІ), що працює паралельно з мережею, а також гібридного інвертора (ГІ), що забезпечує автономне живлення об'єкту з перемиканням навантаження до мережі. Перевагою ГІ є можливість використання в мережах з порушенням якості напруги за рахунок автономного живлення.

### **2.1. Реалізація управління енергоспоживанням локального об'єкту згідно прогнозу фотоелектричної генерації.**

#### **2.1.1. Розробка алгоритму роботи ФЕС з АКБ за тризонної тарифікації**

Всі функції управління енергоспоживанням здійснюються через гібридний інвертор, що і визначає реалізацію алгоритму роботи ФЕС. За використання ФЕС з АКБ для власних потреб ЛО це передбачає функцію регулювання потужності ФБ  $P_{PV}$  для підтримання балансу енергії в системі в разі наявності надлишкової ФЕ. Це дозволяє виключити або обмежити експорт надлишкової ФЕ в мережу. Зменшення витрат на електроенергію в разі тризонної тарифікації передбачає обмеження або виключення пікового попиту, що можливо за використання енергії, яка накопичена в АКБ.

Варіанти режимів роботи ФЕС за інтервалами часу відповідно зонам тарифікації (для літнього періоду) в разі використання мережевого гібридного інвертора наведено в Таблиця 2.1. За цього використовуються функції виключення

експорту в мережу, обмеження стану заряду АКБ  $Q^*$  та завдання потужності заряду  $P_B$ . Інтервали часу прийняті за тризонної тарифікації оплати згідно [143]. Момент часу  $t_4 = 16^{00}$  відповідає завершенню періоду високої генерації в літній період, коли можливий заряд АКБ. Значення  $I_{BH}$  за нічного заряду задається, а заряд припиняється за досягненням заданого значення  $Q^*$ . Значення  $P_{B1} = 0$ , якщо  $P_{PVM} \cdot \eta_C \leq 0$ , і  $P_{B1} = P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$ , якщо  $P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L > 0$ . Для всіх інтервалів діє обмеження  $Q^* \geq Q_{MIN}^*$  і за досягненням  $Q_{MIN}^*$  розряд АКБ припиняється зі споживанням недостатньої енергії з мережі ( $\eta_C, \eta_B$  – ККД перетворювача і АКБ).

Таблиця 2.1 Режими роботи ФЕС за інтервалами часу

Інтервал часу	$t_1 = 7^{00} \rightarrow$ $t_2 = 8^{00}$	$t_2 = 8^{00} \rightarrow$ $t_3 = 11^{00}$	$t_3 = 11^{00} \rightarrow$ $t_4 = 16^{00}$	$t_4 = 16^{00} \rightarrow$ $t_X = X^{00}$
Тариф	денний	піковий	денний	денний
$P_g$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L - P_B$	0	0	0
$P_{PV}$	$P_{PVM} \cdot \eta_C$	$P_{PVM} \cdot \eta_C$	$P_L + P_B$	$P_{PVM}$
$Q^*$	$Q_1^* \rightarrow Q_2^*$	$Q_2^* \rightarrow Q_3^*$	$Q_3^* \rightarrow Q_4^*$	$Q_4^* \rightarrow Q_5^*$
$P_B$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$

Інтервал часу	$t_X = X^{00} \rightarrow$ $t_5 = 20^{00}$	$t_5 = 20^{00} \rightarrow$ $t_6 = 23^{00}$	$t_1 = 23^{00} \rightarrow$ $t_2 = 24^{00}$	$t_1 = 24^{00} \rightarrow$ $t_2 = 7^{00}$
Тариф	денний	піковий	денний	нічний
$P_g$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L$	0	$P_L$	$P_{PVM} \cdot \eta_C - P_L - P_B$
$P_{PV}$	$P_{PVM}$	0	0	$P_{PVM} \cdot \eta_C$
$Q^*$	$Q_5^*$	$Q^* \rightarrow Q_{MIN}^*$	$Q_{MIN}^*$	$Q^* \rightarrow Q_1^*$
$P_B$	0	$P_L$	0	$I_{BH} \cdot U_B$

Розглянуто випадок, коли енергоємність АКБ  $W_B = U_B \cdot C_B$  є достатньою для компенсації споживання навантаженням  $\Delta W_{B56} = \Delta Q_{56}^* \cdot W_B \cdot \eta_B \cdot \eta_C = W_{L56}$  і енергія, що споживається з мережі  $W_{g56} = 0$ . Це ж стосується інтервалу

$(t_2, t_3) (\Delta W_{B23} + W_{PV23} \cdot \eta_C) = W_{L23}$ . Обмеження  $Q^*$  стосуються мінімального значення  $Q_{MIN}^*$  і значення  $Q_5^*$  на інтервалі  $(t_4, t_X)$ . Значення  $Q_5^* \geq (\Delta Q_{56}^* + Q_{MIN}^*)$ ,  $Q_2^* \geq (\Delta Q_{23}^* + Q_{MIN}^*)$ . Момент часу  $t_X$  відповідає зниженню стану заряду до  $Q^* = Q_5^*$ . Якщо  $W_B$  є недостатньою, обмежується тривалість інтервалу, коли  $W_{g56} = 0$   $\Delta t_{56}^1 < \Delta t_{56}$ , за досягненням значення  $Q_{MIN}^*$ . Це ж стосується і інтервалу  $(t_2, t_3)$ . Забезпечення потрібного значення  $Q_2^*$  досягається за використання нічного заряду АКБ (за нічним тарифом) із заданим значенням потужності  $P_B$ .

Оскільки в експериментальній установці з ФЕС (п.4.1.1) використано гібридний інвертор типу AXIOMA energy ISMPPT-BF3000 [144], надалі розглядається його адаптація до реалізації управління енергоспоживанням.

Особливістю даного класу гібридних інверторів є відсутність режиму роботи паралельно з мережею і, відповідно, відсутність експорту надлишкової енергії в мережу. Функції регулювання потужності ФЕМ не передбачено, робота підтримується MPPT контролером в режимі максимальної потужності. За цього система може працювати в автономному режимі за рахунок ФЕ енергії та АКБ або в режимі байпасу з підключенням навантаження безпосередньо до мережі.

За цього виникає обмеження, яке стосується зони заряду АКБ за постійної напруги  $U_B$ , що має місце при  $Q^* \geq Q_d^*$  (значення  $Q_d^*$  становить 80 – 90 % в залежності від типу АКБ), коли струм заряду та, відповідно, потужність АКБ  $P_B = U_B \cdot I_B$  ( $I_B$  - струм АКБ) обмежується зарядною характеристикою  $P_B(Q^*)$ . Перевищення призведе до порушення балансу потужності. Обмеження можна уникнути, якщо підтримувати роботу АКБ в активному режимі за  $Q^* \leq Q_d^*$ .

Відмінність також стосується реалізації інтервалу  $(t_X, t_5)$ , коли здійснюється підготовка АКБ до розряду в вечірній пік. Заряд здійснюється в разі підключення навантаження до мережі (режим байпасу) за рахунок ФЕ і або енергії мережі. За цього обмеження заряду  $Q^* \leq Q_d^*$  не діє, бо АКБ споживає з мережі стільки енергії, скільки потрібно. Значення моменту часу  $t_X$ , коли здійснюється перемикання в байпас задається згідно сезону за умови достатності часу для заряду АКБ за його характеристиками.

В момент часу  $t_5$  здійснюється перемикання навантаження на живлення від

інвертору. Таким чином, на інтервалах  $(t_1, t_x)$ ,  $(t_5, t_6)$  система працює автономно без підключення до мережі. Це відповідає режимам розглянутого вище гібридного мережевого інвертора за відсутності споживання енергії з мережі (Таблиця 2.1). За відсутності надлишкової ФЕ цей варіант забезпечує повне споживання енергії навантаженням об'єкту.

В разі надлишкової генерації ФЕ розглянуто компромісний варіант з використанням релейного управління надходженням енергії від ФЕМ. За допомогою реле К1 ФЕМ може відключатися від перетворювача напруги.

Управління К1 здійснюється в релейному режимі у відповідності зі станом заряду АКБ. За досягненням заданого значення  $Q_{M1}^* = Q_d^*$  (значення  $Q_d^*$  становить 80-90% в залежності від типу АКБ) реле К1 розмикається та відключає ФЕМ, за цього робота навантаження здійснюється за рахунок енергії розряду АКБ  $\Delta W_B = \Delta Q^* \cdot W_B \cdot \eta_B \cdot \eta_C$  ( $\Delta Q^* = Q_{M1}^* - Q_{M2}^*$ ),  $Q_{M2}^*$  – мінімальне значення спрацьовування К1). За досягненням значення  $Q_{M2}^*$  реле К1 підключає ФЕМ до інвертору з наступним зарядженням АКБ.

### **2.1.2. Управління енергоспоживанням в фотоелектричній системі об'єкту згідно прогнозу фотоелектричної генерації.**

Забезпечення повного споживання ФЕ за максимальної генерації ФЕМ є практично нереальним завданням (пп.1.1). За статистичними даними для Київського регіону [145] кількість ясних днів влітку від 2,8 до 4,9, за даними PVGIS [146] середньомісячне значення генерації становить 0,7 – 0,75 від максимальної  $W_{PVmax}$ . Тобто характерним є незначна хмарність.

Виходячи з цього, розглянуто можливість забезпечення повного споживання ФЕ за генерації до  $0.85W_{PVmax}$ .

Графік навантаження локальних об'єктів  $P_L(t)$  може бути різним, характерним є наявність пікового попиту зранку та ввечері та суттєве зменшення нічного навантаження. Виходячи з цього, розглянуто можливість планування графіків (сценаріїв) навантаження з усередненням потужності на інтервалах часу (пп.2.1.1). Вважаємо, що зміни потужності відносно середнього значення в межах припустимих

значень практично не впливають на загальні енергетичні показники [147]. Для оцінки ефективності управління використано спрощений показник зниження витрат на ЕЕ, спожиту з мережі  $k_E$  [147].

Визначення параметрів виконано відносно використання ФЕМ з встановленою потужністю  $P_{PVR} = 1$  кВт, графік генерації якої наведено на Рис. 2.1.

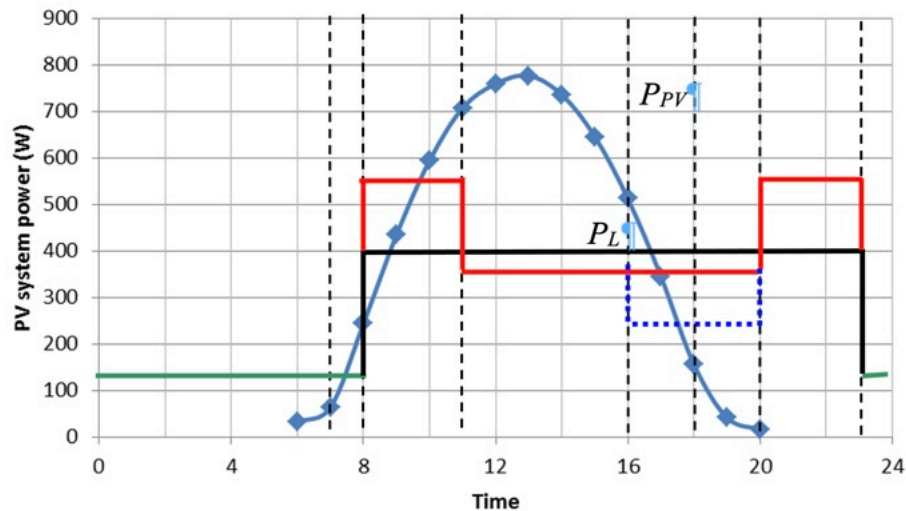


Рис. 2.1 Графік потужності ФБ для ясного дня липня

Визначення енергоємності  $W_B$  АКБ. Розглянутий варіант експериментальної установки (Розділ 4) передбачає використання АКБ типу AGM (свинцево-кислотні). За цього глибина розряду обмежена значенням 60 – 70 %. В разі використання літій-іонних АКБ з врахуванням можливого значення  $DoD$  до 80% ємність АКБ буде меншою.

Генерація ФЕ в разі  $P_{PVR} = 1$ кВт для ясного дня липня в м. Київ становить  $W_{PVmax} = 6$ кВт · год. Тривалість денного періоду  $(t_2, t_6)$  становить  $t_{26} = 15$ год. Приймаємо середнє значення потужності  $P_L = W_{PVmax} = 400$ Вт. Виключення вечірнього пікового споживання за рахунок енергії АКБ передбачає

$$\Delta W_{L56} = \Delta W_{B56} = 0.01 \Delta Q_{56} \cdot W_B \cdot \eta_B \cdot \eta_C.$$

В разі значення стану заряду  $Q_5^* = 90\%$  і  $\Delta Q_{56}^* = 40$  значення становить  $W_B = 2600$  Вт · год.

В разі виключення пікового попиту і споживання енергії з мережі на інтервалі  $(t_2, t_x)$  коефіцієнт зниження витрат на електроенергію  $k_E$  з врахуванням тарифікації оплати за умови

$$k_{E3} = \frac{W_L}{W_g} = \frac{W_{L61}T_n + (W_{L23} + W_{L56})T_p + W_{L35}T_d}{W_{L61}T_n + W_{Lx5}T_d + \Delta W_{B61} + \Delta W_{Bx5} + W_{Lx5}T_d - W_{PVx5}^1}, \quad (2.1)$$

де  $W_L$  і  $W_g$  – енергія спожита навантаженням і енергія, спожита з мережі з врахуванням тарифних коефіцієнтів,  $\Delta W_{B61}$  і  $\Delta W_{Bx5}$  – енергія на заряд АКБ на відповідних інтервалах часу,  $W_{PVx5}^1 = W_{PVx5} \cdot \eta_B \cdot \eta_C$  – енергія ФЕМ, якої за високої генерації має бути достатньо для підвищення стану заряду АКБ під час байпасу,  $T_n$ ,  $T_p$ ,  $T_d$  – коефіцієнти тарифікації (прийнято співвідношення тарифів до денного  $T_n = 0,4$ ,  $T_p = 1,5$ ,  $T_d = 1$ ).

Розглянуто можливості модифікації графіку за інтервалами за  $W_{L25} = const$ . Очевидним є те, що за трьох тарифів з використанням нічного заряду АКБ та заряду АКБ до початку вечірнього піку пікове навантаження доцільно підвищувати. Згідно цього розглянуто три варіанти графіків (Таблиця 2.2):

- В1:  $P_{L26} = 400\text{Вт}$ ;
- В2:  $P_{L23} = 550\text{Вт}$ ,  $P_{L35} = 350\text{Вт}$ ,  $P_{L56} = 400\text{Вт}$ ;
- В3:  $P_{L23} = 560\text{Вт}$ ,  $P_{L34} = 350\text{Вт}$ ,  $P_{L45} = 230\text{Вт}$ ,  $P_{L56} = 550\text{Вт}$ .

В Таблиця 2.2 значення  $W_{PV}^* = \frac{W_{PV}}{W_{PVmax}}$ . Значення  $k_{E3}$  визначені за результатами моделювання (п.2.1.3). За цього В2 і В3 забезпечують збільшення  $k_{E3}$  до 10 %.

Отже в подальшому, як рекомендований, розглядається В3.

Таблиця 2.2 Значення  $k_{E3}$  за різних графіків навантаження

$W_{PV}^*$ , в.о.	$Q_0^*$ , %	В1		В2		В3	
		$Q_2^*$ ,%	$k_{E3}/k_{E1}$ ,в.о.	$Q_2^*$ ,%	$k_{E3}/k_{E1}$ ,в.о.	$Q_2^*$ ,%	$k_{E3}/k_{E1}$ ,в.о.
0,65	40	77	3,299/2,078	89	3,627/2,038	90	3,471/2,036
0,75	40	58	3,864/2,55	68	4,25/2,516	69	4,02/2,53
0,85	30	38	4,319/2,924	46	4,71/2,903	48	5,557/3,241

Блок-схема алгоритму визначення параметрів та завдання сценарію управління за прогнозом генерації ФЕ наведена на Рис. 2.2.

За цього розглядається 3 сценарії роботи ПІ:

- за постійного стану заряду АКБ  $Q^* = 80 - 90\%$  в разі малої генерації  $W_{PV} < W_{PVmin}$  і використанні байпасу;

- за використання ФЕ на інтервалі  $(t_3, t_5)$  лише на заряд АКБ з перемиканням в автономний режим лише в пікові години;
- за використання байпасу лише на інтервалі  $(t_4, t_5)$  як і в разі ГМІ.

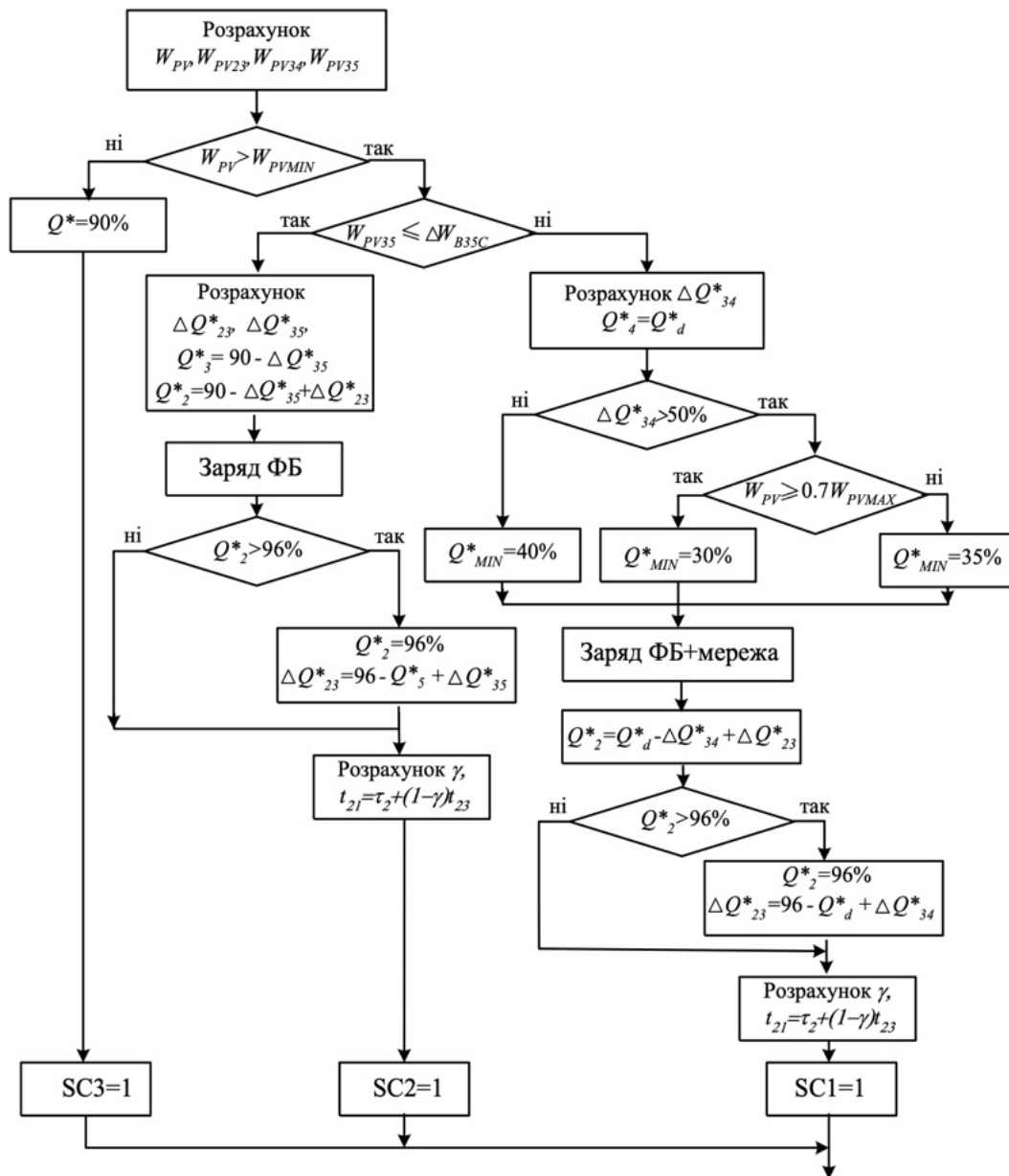


Рис. 2.2 Блок-схема алгоритму визначення параметрів та завдання сценарію управління

Значення  $W_{PV_{MIN}}$  відповідає балансу енергії за  $k_{E1} = 1$ . За цього енергія, що накопичується в АКБ в процесі нічного заряду  $\Delta W_{B62}$ , використовується зменшення споживання енергії в пікові години. З мережі, відповідно, споживається енергія  $W_g = \frac{\Delta W_{B62}}{\eta_c \cdot \eta_B}$ . Значення  $W_{PV_{MIN}}$  повинно компенсувати втрати енергії в АКБ

$$W_{PV_{MIN}} \cdot \eta_C = 0.01 \cdot \Delta Q_{62}^* \cdot W_B \left( \frac{1}{\eta_C \cdot \eta_B} - \eta_C \cdot \eta_B \right). \quad (2.2)$$

Значення  $\Delta W_{B35C}$  визначається за умови  $W_{PV23} = 0$  згідно  $\Delta Q_{35}^* = Q_{5M}^* - Q_3^*$ ,  $Q_{5M}^* = 90\%$ ,  $Q_3^* = Q_{2M}^* - \Delta Q_{23}^*$ ,  $Q_{2M}^* = 96\%$ ,  $\Delta Q_{23}^* = \frac{W_{L23}}{0.01 W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B}$ .

Ступінь компенсації пікового попиту вранці  $(t_2, t_3)$  визначається коефіцієнтом  $\gamma = (0 \div 1)$ . Відповідне значення

$$\gamma = \frac{0.01 \cdot \Delta Q_{23}^* \cdot W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B + W_{PV23} \cdot \eta_C}{0.01 \cdot \Delta Q_{23C}^* \cdot W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B + W_{PV23} \cdot \eta_C}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta Q_{23C}^*$  – скориговане за розрахунком значення.

Згідно значенню  $\gamma$  визначається момент часу  $t_{21}$ , коли здійснюється перемикання в автономний режим, і тривалість компенсації пікового попиту зменшується.

Прогноз генерації ФЕ  $P_{PV}$  і рафік навантаження  $P_L$  можуть відрізнятись від фактичних значень, що може призвести до зниження  $k_{E3}$  відносно очікуваного значення. Більш глибокий розряд АКБ на інтервалі  $(t_2, t_3)$   $Q_{3\Phi}^* < Q_3^*$  призведе до зниження  $Q_5^*$  і зниження ступеню компенсації попиту в вечірній пік. В разі  $Q_{3\Phi}^* > Q_3^*$  зростає  $Q_4^*$ , що може призвести до обмеження генерації ФБ і, відповідно, до неповного використання ФЕ.

В певній мірі це може бути компенсовано в разі корекції навантаження, яка має сенс на інтервалі  $(t_3, \rightarrow t_4)$ . За цього на момент  $t_3$  формується рекомендація щодо збільшення/зменшення навантаження на значення

$$W_{L34\text{дод}} = 0.01(Q_{3\Phi}^* - Q_3^*)W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B + W_{PV34} \cdot \eta_C(\rho - 1),$$

де  $\rho = \frac{W_{PV23\Phi}}{W_{PV23}}$  – відносне значення відхилення фактичної генерації ФЕ відносно прогнозованого значення.

За цього прийнято, що відхилення прогнозу є пропорційним протягом дня, а навантаження  $W_{L34}$  відповідає розрахованому значенню.

Значення  $W_{L34\text{дод}}$  виводиться на дисплей і є рекомендованим і має сприяти зниженню витрат на електроенергію.

### 2.1.3. Імітаційне моделювання енергетичних процесів в фотоелектричній системі

Математичне моделювання здійснювалось з використанням середовища MATLAB/Simulink для добового циклу роботи системи [5]. Модель виконана за відомими принципами для сталих режимів роботи з перемиканням згідно допоміжним змінним [43].

Використано наступні допоміжні змінні:

- змінні відповідні інтервалам часу

$\tau_{22}$  - приймає значення 0 на інтервалі  $(t_2, t_{21})$ ,  $t_{21}$  – розраховане значення;

$d1$  – приймає значення 1 на інтервалі  $(t_x, t_5)$ ,  $t_x$  – задається згідно сезону;

$\tau_n$  - приймає значення 1 на інтервалі  $(t_6, t_2)$ ;

- змінні відповідні значенням параметрів:

$q = Q_T \cdot \tau_{34}$  - задає перемикання реле в колі ФБ згідно стану заряду,

$Q_T$  – функція RS-тригера, стан якого визначається змінними:

$$R = \begin{cases} 1, & \text{якщо } Q^* \geq Q_d^* \\ 0, & \text{якщо } Q^* < Q_d^* \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q^* \geq Q_d^* - 5 \\ 1, & \text{якщо } Q^* < Q_d^* - 5 \end{cases}$$

$$qm = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q^* \geq Q_{MIN}^* \\ 1, & \text{якщо } Q^* < Q_{MIN}^* \end{cases} \text{ - обмеження мінімального значення стану заряду,}$$

$$q0 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q^* \geq Q_2^* \\ 1, & \text{якщо } Q^* < Q_2^* \end{cases} \text{ - обмеження заряду за досягнення заданого значення;}$$

$$d = \tau_{22} \cdot d1 \cdot qm.$$

Потужність навантаження  $P_L(t)$  і потужність генерації ФЕМ  $P_{PVM}(t)$  задаються в табличному вигляді.

З врахуванням регулювання  $P_{PV} = P_{PVM} \cdot q.$

Потужність АКБ  $P_B = U_B \cdot I_B.$

Потужність, що споживається з мережі  $P_g = P_B + P_{PV} \cdot \eta_C - P_L$

$$\text{Струм АКБ } I_B = \left( \frac{P_{PV} \cdot \eta_C - P_L}{U_B} \cdot d + I_{Bmax} \cdot \tau_n + d1 \cdot \left( \frac{P_{PV} \cdot \eta_C}{U_B} + I_{Bmax} \right) \right) \cdot \tau_{22}$$

де  $I_{Bmax}$  – обмеження струму заряду.

На інтервалі  $(t_x, t_5)$  струм заряду АКБ забезпечується ФЕМ і мережею. В разі  $Q^* \geq Q_d^*$  струм також обмежується зарядною характеристикою  $I_B(Q^*)$ . За цього обмежується і значення потужності, що споживається з мережі.

Результати моделювання за різних значень генерації ФЕМ наведено в Таблиця 2.3.

Таблиця 2.3 Результати моделювання за різних значень генерації ФЕМ

$W_{PV}^*$ , в.о.	Місяць	$Q_2^*$ , %	$Q_6^*$ , %	$\gamma$ , в.о.	$k_{E1}$ , в.о.	$k_{E3}$ , в.о.
0,0278	12	96	40	0,5	1,242	1
0,083	12	96	40	0,5	1,327	1,04
0,275	12	75	40	1	1,649	1,262
0,349	3	96	40	1	1,707	1,288
0,436	3	89	40	1	2,118	1,485
0,55	7	96	40	1	2,758	1,741
0,7	7	78	35	1	3,815	2,265
0,85	7	48	30	1	5,356	3,309

В Таблиця 2.4 для порівняння наведені основні показники для розглянутого алгоритму управління з перемиканням в режим байпасу та без використання байпасу. За цього використання байпасу з зарядженням АКБ на інтервалі  $(t_x, t_5)$  за рівних умов забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію в разі тризонної тарифікації до 28 %.

Таблиця 2.4 Основні показники для розглянутого алгоритму управління

Загальні показники			Без використання байпасу				З перемиканням в режим байпасу			
$W_{PV}^*$ , в.о.	$Q_6^*$ , %	$t_x$ , год	$Q_2^*$ , %	$Q_5^*$ , %	$k_{E3}$ , в.о.	$k_{E1}$ , в.о.	$Q_2^*$ , %	$Q_5^*$ , %	$k_{E3}$ , в.о.	$k_{E1}$ , в.о.
0,436	40	14	96	74	2,046	1,515	89	93	2,118	1,485
0,55	40	17,5	96	62	2,129	1,52	96	85	2,758	1,741
0,65	40	17,5	96	83	3,443	2,054	90	91	3,471	2,036
0,85	30	17,5	48	84	5,356	3,309	48	93	5,557	3,241

Графіки потужності  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  та стану заряду  $Q^*$  за ясного дня липня ( $W_{PV}^* = 1$ ) наведено на Рис. 2.3. Зону байпасу з зарядженням АКБ виділено пунктиром. В даному разі має місце надлишкова ФЕ з релейним регулюванням.

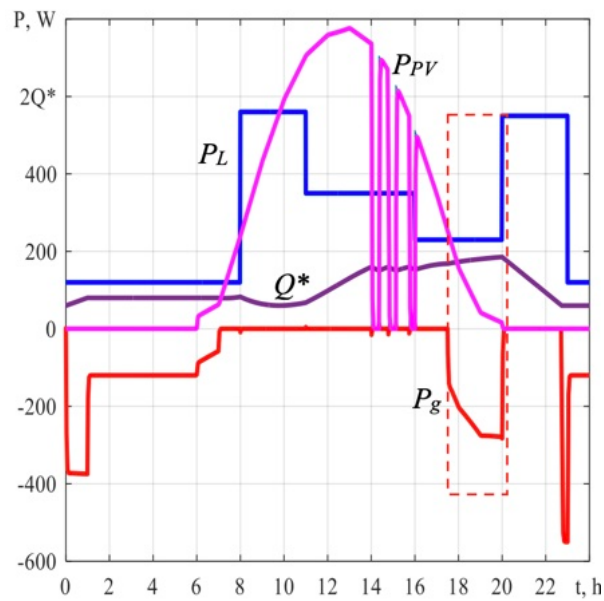


Рис. 2.3 Графіки потужності  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  та стану заряду  $Q^*$  за ясного дня липня  
( $W_{PV}^* = 1$ )

В разі  $W_{PV}^* \leq 0.85$  ФЕ використовується повністю (Рис. 2.4, Рис. 2.5, Рис. 2.6).

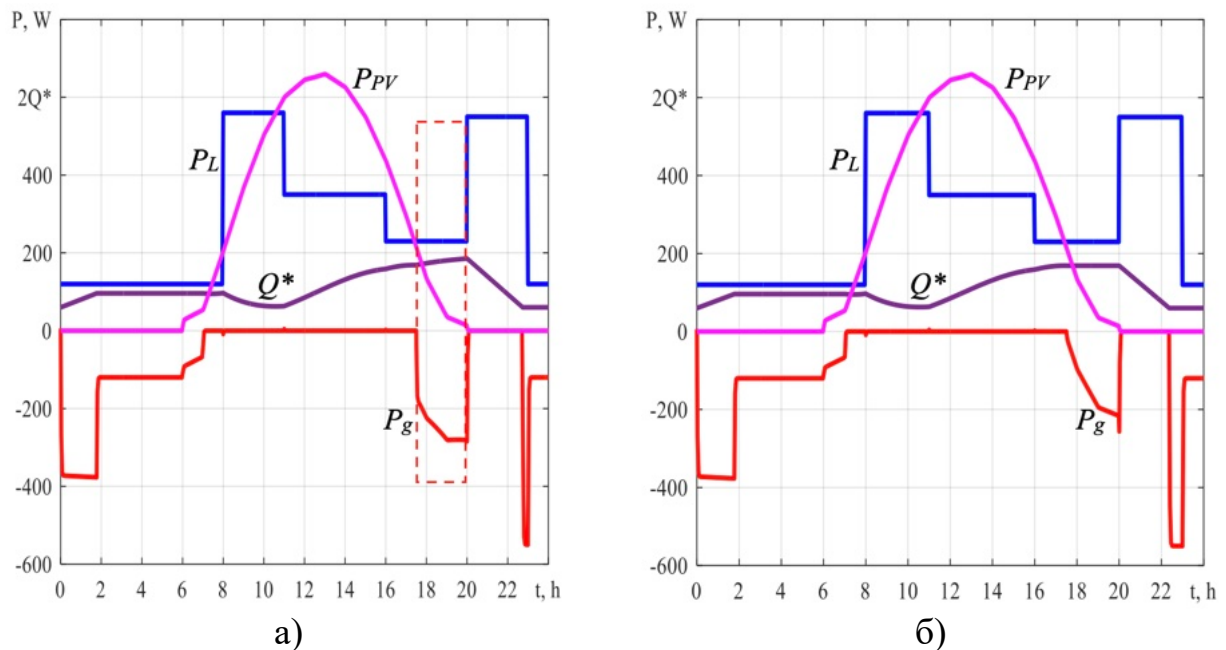


Рис. 2.4 Графіки потужності  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  та стану заряду  $Q^*$  за  $W_{PV}^* = 0.85$ : а) без байпасу; б) з перемиканням в режим байпасу (SC1)

За середньої генерації в грудні байпас має місце протягом всього дня з перемиканням в автономний режим тільки в години пікового попиту (Рис. 2.6).

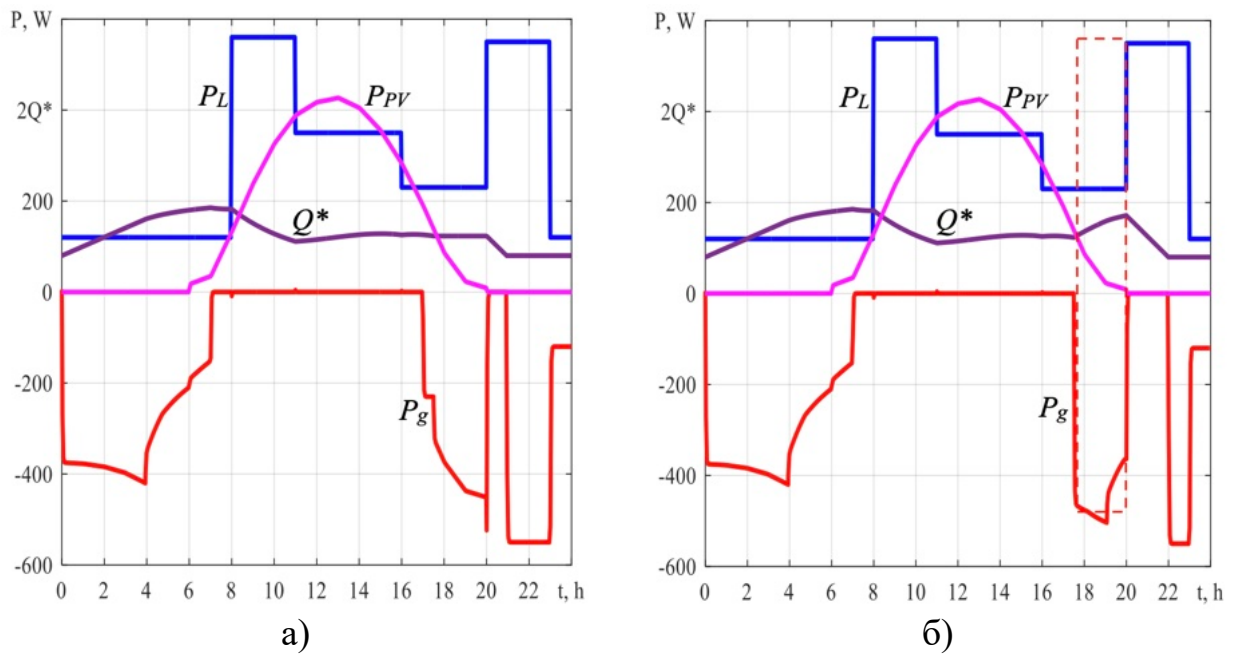


Рис. 2.5 Графіки потужності  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  та стану заряду  $Q^*$  за  $W_{PV}^* = 0.55$ : а) без байпасу; б) з перемиканням в режим байпасу (SC1)

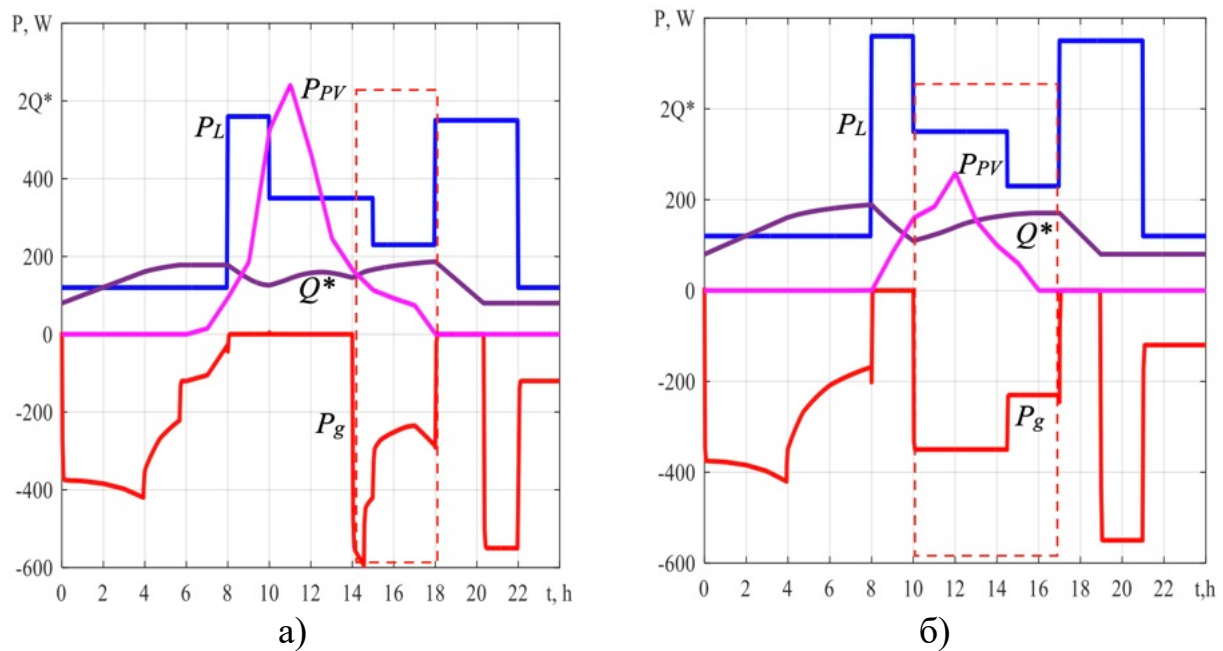


Рис. 2.6 Графіки потужності  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  та стану заряду  $Q^*$ : а) день березня (SC1); б) день грудня (SC2)

## 2.2. Розробка програмно-технічного комплексу управління ФЕС за прогнозом

### 2.2.1. Алгоритм управління за прогнозом

В пп.2.1.2 розглянуто алгоритм визначення основних параметрів за прогнозом

генерації ФЕ. Прогнозні значення  $P_{PV}(t)$  визначаються за даними веб-сайтів з дискретністю  $\Delta t = 1$  год. За цих умов значення добової генерації

$$W_{PVC} = \int_{t_S}^{t_E} P_{PV}(t) dt \approx 0,5\Delta t (\sum_{i=0}^{n-1} (P_{PV_i} + P_{PV_{i+1}})), \quad (2.4)$$

де  $t_S, t_E$  – межі інтегрування;  $P_{PV_i}, P_{PV_{i+1}}$  – потужність генерації ФБ для  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , відповідно.

Вираз (2.4) придатний і для визначення генерації ФБ  $W_{PV}$  на будь-якому часовому інтервалі (наприклад,  $t_S = t_1, t_E = t_2$ ).

Розрахунки здійснюються на кінець доби і визначають значення параметрів на наступну добу:

- сценарій SC1-SC3;
- $Q_2^*$  – значення на початок ранкового піку;
- $Q_{MIN}^*$  – мінімальне значення, що відповідає  $Q_6^*$ ;
- $t_{21}$  – розрахований момент початку ранкового піку, коли відсутнє споживання з мережі.

Значення  $t_X$  визначається сезоном.

Передбачено два режими роботи системи: нормальний автономний з перемиканням навантаження на мережу (байпас) і аварійний автономний при відключенні РМ.

### *Загальна структура алгоритму.*

1. Вмикання живлення та вхід з дисплею.
2. Початкова ініціалізація у разі першого вмикання: завдання параметрів ФЕС; години дії тарифних зон; відносна вартість електроенергії за тарифами до денного тарифу.

Робота системи в будь-який час вмикання передбачає певну ступінь заряду АКБ. Тому спочатку здійснюється заряд (підзаряд) АКБ в режимі байпас та таріровка ступеню заряду АКБ.

Вимірюється струм заряду АКБ  $I_B$  і напруга  $U_B$ . Заряд здійснюється до значення  $Q^* = 90\%$  (Таблиця 2.5), яке визначається умовою  $U_B \geq 27V$  і  $I_B \leq 0.03C_B$ . Це значення  $Q$  приймається як стартове  $Q = Q_S^*$ .

Таблиця 2.5 Зарядна характеристика АКБ типу RITAR RT12140H з напругою 12 В і ємністю  $C_B$  12 А·год при ступеню розряду 50%

$Q^*$ , %	80	85	90	95
$I_B$ , А	$0.1C_B$	$0.042C_B$	$0.03C_B$	$0.015C_B$
$U_B$ , В	26.4	26.76	27	27.6

Відповідний алгоритм наведено на Рис. 2.7.

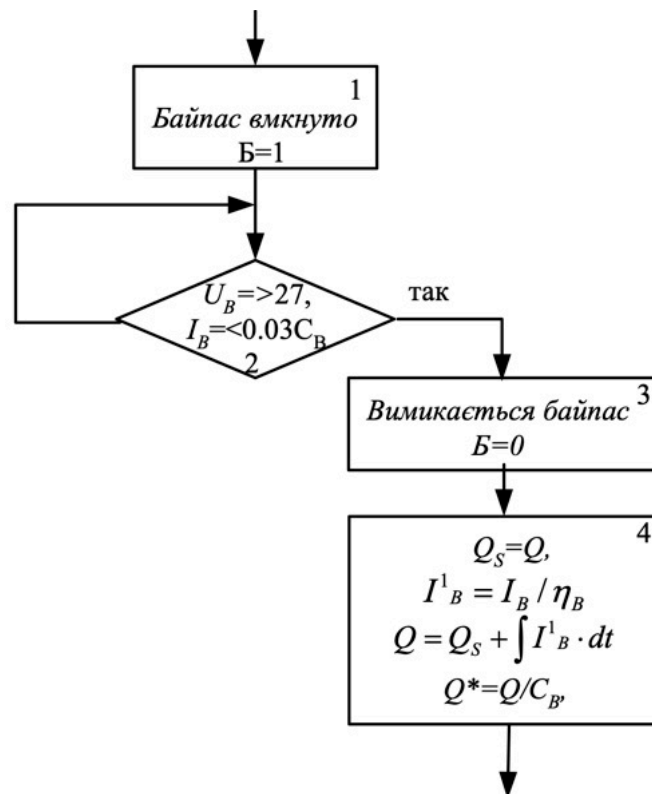


Рис. 2.7 Ініціалізація заряду АКБ

3. Виведення інформації за попередню добу на дисплей. Розрахунок коефіцієнту ефективності  $k_E$ ; електроенергії  $W_G$ , що споживається з мережі; електроенергії  $W_L$ , що споживається навантаженням.
4. Планування на поточну добу. Звернення до веб-сайту, зчитування  $i$ -го значення потужності сонячної генерації  $P_{PVi}$  з кроком 1 год. Розрахунок значень генерації ФЕ за інтервалами (табл. 2.1) і параметрів згідно Рис. 2.2.
5. Робота в поточному режимі. За поточним часом доби визначається, в якій точці тарифної зони знаходиться система. Роботу в ранковий пік показано на Рис. 2.8.

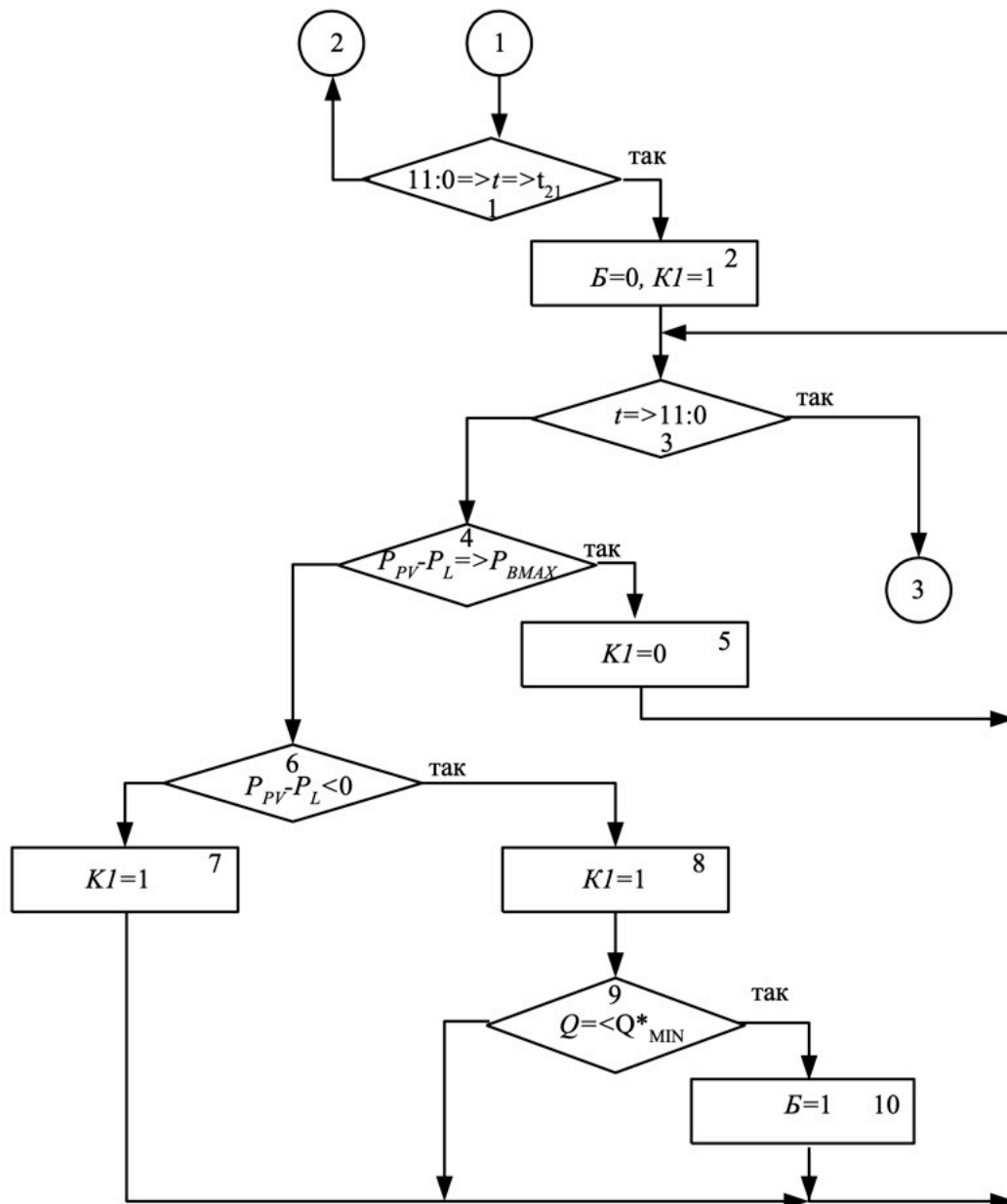


Рис. 2.8 Робота в ранковий пік

### ***Робота за умови малого навантаження ЛО.***

Реалізація алгоритму при малому навантаженні ЛО в ясний день має особливості, тому що АКБ не в змозі прийняти енергію ФБ (обмеження струму заряду). Тому введено додаткову умову (блок 4) –  $0 \leq (P_{PV} - P_L) \leq P_{Bmax} = I_{Bmax} U_B$  (якщо  $Q^* < 80\%$ ). Цей процес може бути тривалим, і приймається  $I_{Bmax} = 1.2 I_{Bном}$ . В цьому випадку вимикається ФБ (блок 5) та поступово розряджається АКБ, поки не зміниться умова.

Робота в денному тарифі (SC1) на інтервалі  $(t_3, t_5)$  показана на Рис. 2.9. Заряд АКБ задається від ФБ. За досягненням моменту часу  $t_x$  задається режим заряду АКБ

від ФБ і мережі з загальним обмеженням. В зоні денного тарифу (7:00,8:00) алгоритм є аналогічним.

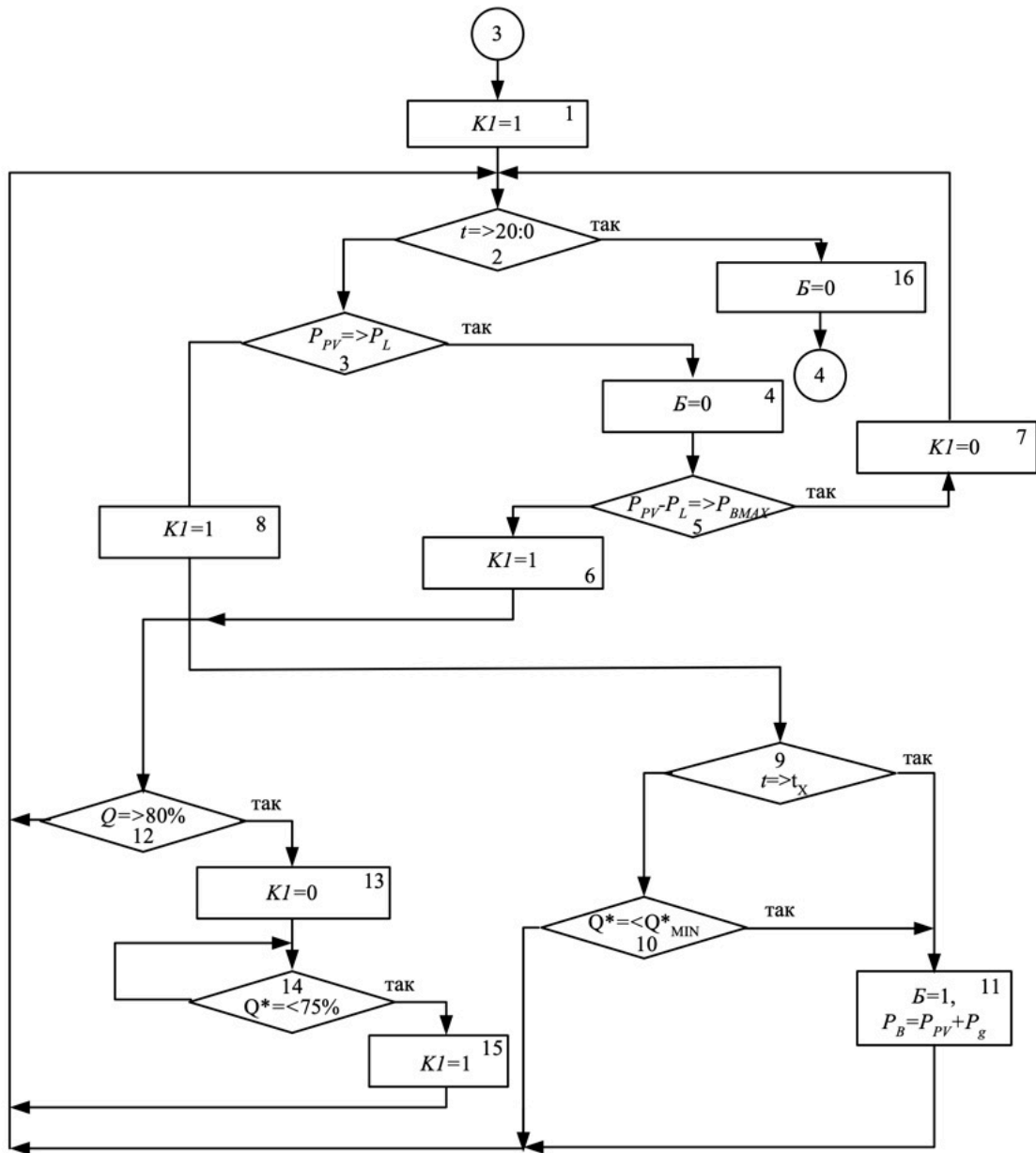


Рис. 2.9 Робота в денному тарифі

В зоні нічного тарифу заряд АКБ здійснюється за рахунок енергії мережі зі заданим значенням  $P_B$ . За досягненням розрахованого значення  $Q_2^*$  АКБ відключається (або задається  $P_B = 0$ ) і підключається за умови  $P_{PV} > P_L$ , сприймаючи надлишкову ФЕ в ранкові години влітку.

В аварійному автономному режимі (Рис. 2.10) при відключенні напруги мережі формується звуковий сигнал з датчика напруги, а на екрані дисплею виводиться повідомлення червоним кольором для того, щоб привернути увагу персоналу.

### Розрахунок навантаження.

Визначається час завершення світового дня  $t_{\text{СВК}}$  і початок наступного дня  $t_{\text{СВП}}$  за даними прогнозу. В разі відключення в денний час (до  $t_k = 16.30$  влітку, в інші періоди інший час) графік рекомендованого навантаження зберігаємо до  $t_k$

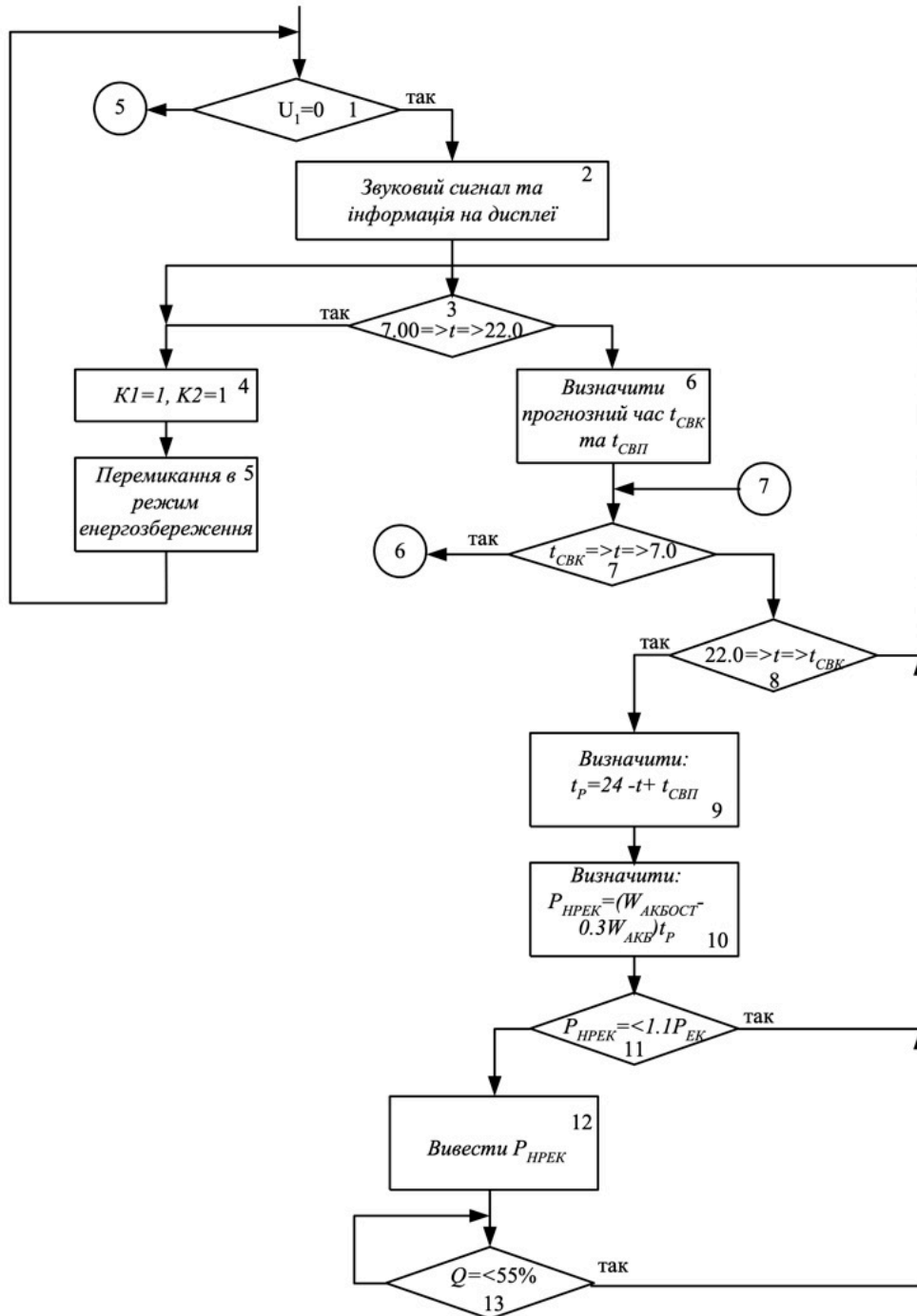


Рис. 2.10 Робота системи в автономному режимі роботи

Наприкінці денного часу орієнтація на точку, коли  $Q_1^* \approx 78\%$ . Відповідно до поточного прогнозу розраховується енергія ФБ  $W_{\text{ост}}$  на час, що залишився.

Для  $t_K = 16.30$  значення  $W_{\text{ост}}$  становить

$$W_{\text{ост}} = 0.5(2P_{PV17} + 2P_{18} + 2P_{PV19} + P_{PV20} + 0.5(P_{PV16} - P_{PV17})),$$

де  $P_{PV17}, \dots, P_{PV20}$  – значення потужності у відповідні години за прогнозом.

Остаточна енергія АКБ

$$W_{B_{\text{ост}}} = 0.01(Q_1^* - Q_{\text{MIN}}^*) \cdot W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B.$$

З огляду на це, вважаючи, що відключення тривале, розраховується

$$P_{\text{РЕК}} = \frac{W_{\text{ост}} + W_{B_{\text{ост}}}}{24 - t_K + t_{\text{СВП}}}.$$

Далі визначається час і тарифна зона, в якій перебуває алгоритм. Вночі (після 22.00) здійснюється відключення споживачів, залишаються тільки з безперебійним живленням (режим енергозбереження). При відновленні напруги в мережі відбувається перехід в точку 5 – дозаряд АКБ і т. д.

Відключення після 7.00. Якщо на даний момент світловий день (Рис. 2.10) - перехід в точку 6. По завершенню світлового дня визначається час роботи до початку наступного дня на випадок, якщо відключення тривале. Визначення рекомендованого значення потужності навантаження виходячи з залишкового заряду АКБ  $W_{B_{\text{ост}}}$  і  $W_{\text{ост}}$  за умови розряду АКБ до ранку не нижче  $0.2W_B$ . Якщо рекомендоване значення потужності навантаження є близьким до потужності в режимі енергозбереження – перехід в режим енергозбереження.

### **2.2.2. Структура програмно-технічного комплексу управління з використанням гібридного інвертора типу АХІОМА**

Відповідно до розглянутих алгоритмів управління енергоспоживанням ФЕС програмно-технічний комплекс (ПТК) управління з врахуванням можливостей гібридного інвертора типу АХІОМА повинен забезпечувати в реальному часі наступні функції:

- зручний інтерфейс користувача;
- формування запиту до веб-ресурсу щодо прогнозу генерації ФЕ та обробку даних для наступного використання;

- розрахунок та обробку поточної інформації;
- визначення сценаріїв та завдання параметрів;
- вимірювання потужностей генерації, навантаження, споживання з мережі;
- комутацію кіл ФБ, АКБ та навантаження, зокрема, в разі аварійного відключення мережі.

Структура ПТК містить наступні елементи: центральний модуль з сенсорним дисплеєм, Wi-Fi та радіо модуль зв'язку (wfM), модуль вимірювання, датчики напруги та струму, блок реле та вимикачів з можливістю дистанційного відключення ряду споживачів. За цього модуль wfM забезпечує отримання інформації з веб-сайту і керування реле по радіоканалу [2].

Розглянуто реалізацію центрального модулю ПТК з:

- плати розробника Robotdyn MEGA+WiFi R3 ATmega2560+ESP8266;
- дисплею з сенсорною панеллю Nextion NX8048T070;
- модулю годиннику реального часу (Real Time Clock) DS3231;
- радіомодулю nRF24L01+ 2.4 GHz;
- конвертеру RS232-TTL.

Модуль вимірювання та комутації містить:

- мікроконтролер ATmega328P;
- енергомонітори змінного струму PZEM-004T v.3;
- датчики постійного струму LTS 25-NP;
- датчики постійної напруги (резистивні подільники);
- модулі твердотільних реле SSR-40DA-H.

Інвертор напруги через послідовний інтерфейс RS232 інформаційно пов'язаний з центральним модулем ПТК. Інвертор і центральний модуль пов'язані між собою кабелем RJ45-RS232.

### **2.3. Висновки до розділу 2**

1. Розвинуто управління фотоелектричною системою з перемиканням навантаження до мережі на визначених інтервалах часу та зміною алгоритму за прогнозом, що за рахунок зменшення пікового попиту з мережі забезпечує

можливість зниження витрат на електроенергію. Введення релейного регулювання потужності фотоелектричної батареї за відсутності регулювання в МРРТ контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації ФЕ.

2. Обґрунтовано рекомендований сценарій навантаження зі зменшенням потужності в передвечірні години до початку вечірнього піку за відповідного збільшення пікового споживання, що забезпечує можливість підвищення стану заряду АКБ без додаткового споживання ЕЕ з мережі. Це забезпечує можливість додаткового зменшення вечірнього пікового споживання з мережі.
3. Розроблено алгоритм визначення параметрів та сценарію управління з формуванням стану заряду АКБ згідно прогнозу генерації ФЕ, що надає можливість підвищення рівня споживання за високої генерації ФЕ. В період високої генерації ФЕ АКБ працює в активному режимі заряду без обмеження потужності, заряд за постійної напруги здійснюється в передвечірні години. Глибина розряду АКБ із зменшенням генерації ФЕ за прогнозом знижується, що сприяє збільшенню терміну експлуатації АКБ.
4. Здійснено імітаційне моделювання енергетичних процесів в ФЕС за розроблених рішень для добового циклу роботи. За прийнятих параметрів та незмінного споживання ЛО використання рекомендованого графіку навантаження дозволяє зменшити витрати за тризонної тарифікації оплати до 29% в разі одного тарифу до 10%. Перемикання в байпас з зарядом АКБ в години перед початком вечірнього піку дає можливість зменшити витрати до 28% і забезпечити повне споживання ФЕ при генерації до 85% відносно ясного дня влітку.
5. Розроблено алгоритми та обґрунтовано структуру програмно технічного комплексу управління енергоспоживанням ФЕС з використанням даних відкритих веб-ресурсів щодо прогнозу генерації, що може бути сумісним з комерційними інверторами, що в певній мірі сприяє уніфікації рішень.

### 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МАСИВУ В УМОВАХ ЧАСТКОВОГО ЗАТІНЕННЯ

#### 3.1. Визначення можливих конфігурацій фотоелектричних масивів і кількості фотоелектричних панелей згідно прийнятої потужності фотоелектричної системи

Кліматичні умови Київської області в літній період характеризуються температурними та радіаційними параметрами, що наближені до стандартного режиму NOCT (Nominal Operating Cell Temperature). Це дозволяє застосовувати типові моделі продуктивності ФЕП без суттєвих поправок на локальні кліматичні відхилення [7]. Розглядалось використання сучасних монокристалічних ФЕП типу Longi Solar LR7-72HVH-655M [148] та гібридного високовольтного інвертору середньої потужності Deye SUN-8K-SG01HP3-EU-AM [149].

Основні параметри інвертору та ФЕП наведені в Таблиця 3.1 і 3.2. Визначення можливих конфігурацій здійснюється у відповідності до значень:

- Максимальна потужність ФЕМ - 10400 Вт
- Максимальна вхідна напруга інвертору - 1000 В
- Діапазон напруги MPPT - 260-850 В
- Максимальний робочий струм - 20 А

Таблиця 3.1 Основні параметри інвертору Deye SUN-8K-SG01HP3-EU-AM [149]

<i>Акумуляторна батарея</i>	
Тип	LiIon
Діапазон напруги, В	160-700
Максимальний струм заряду/розряду, А	37
<i>Фотоелектричний вхід</i>	
Максимальна вхідна потужність, Вт	10400
Максимальна вхідна напруга, В	1000
Діапазон MPPT при повному навантаженні, В	260-850

Максимальний робочий вхідний струм, А	20+20
Кількість трекерів МРРТ / рядків на трекер	2 / 1+1
<i>Змінний струм</i>	
Максимальна повна вхідна/вихідна потужність, ВА	8800
Максимальний вхідний/вихідний струм, А	13,4 / 12,8
Номинальна вхідна/вихідна напруга, В	230 / 400
Форма приєднання до мережі	3L+N+PE
<i>Інтерфейси зв'язку</i>	WiFi, RS485, CAN

Таблиця 3.2 Основні параметри монокристалічних ФЕП типу Longi Solar LR7-72HVH-655M [148]

<i>Електричні характеристики</i>		
Умова тестування	STC [150]	NOCT [151]
Максимальна потужність МРРТ ( $P_{MPPT}$ ), Вт	655	499
Напруга холостого ходу ( $U_{OC}$ ), В	54,00	51,32
Струм короткого замикання ( $I_{SC}$ ), А	15,37	12,34
Напруга в МРРТ ( $U_{MPPT}$ ), В	44,66	42,44
Струм в МРРТ ( $I_{MPPT}$ ), А	14,67	11,76
Ефективність ФЕП, %	24,2	
Кількість комірок	144	
<i>Температурні показники</i>		
Температурний коефіцієнт $I_{SC}$ ( $K_i$ ), %/°C	+0,05	
Температурний коефіцієнт $U_{OC}$ ( $K_v$ ), %/°C	-0,20	
Температурний коефіцієнт $P_{MPPT}$ ( $K_p$ ), %/°C	-0,26	

Для отримання максимально можливої потужності генерації  $P_{PVM} = 10400$  Вт складено 12 можливих конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП з урахуванням вихідних струмів і напруг модулів та інвертора (рис.3.1):

- п'ять послідовних конфігурацій в 1 ряд (16S-1P\_1 (1x16)), в 2 ряди (16S-1P\_2 (2x8), 16S-1P\_3 (2x8)) та 4 ряди (16S-1P\_4 (4x4), 16S-1P\_5 (4x4)).

- сім послідовно-паралельних конфігурацій в 2 ряди (8S-2P\_1 (2x8), 8S-2P\_2 (2x8), 8S-2P\_3 (2x8), 8S-2P\_4 (2x8)) та в 4 ряди (8S-2P\_5, 8S-2P\_6 (4x4), 8S-2P\_7 (4x4)).

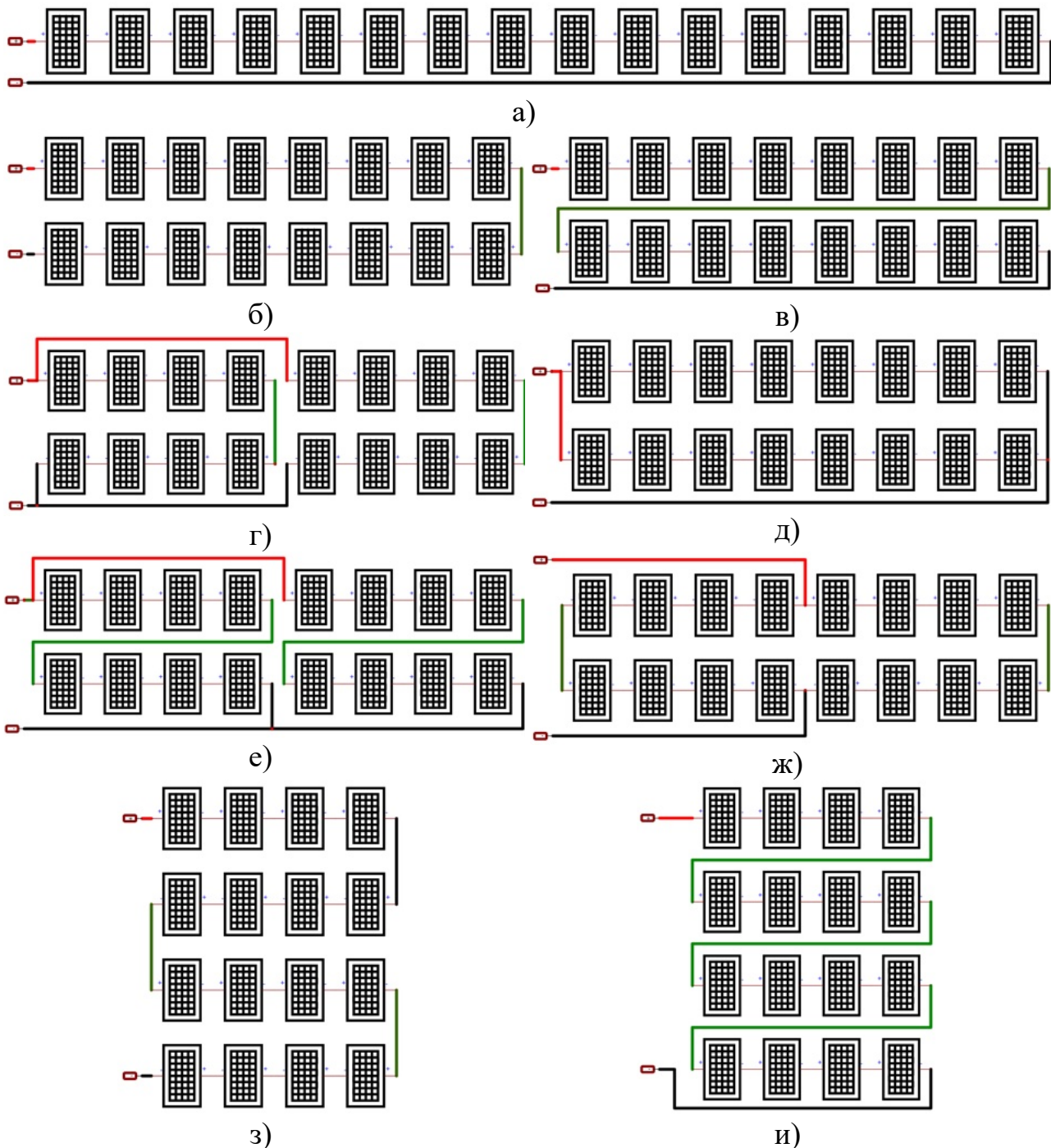


Рис. 3.1 Конфігурації масивів з 16 ФЕП:

- а) 16S-1P\_1; б) 16S-1P\_2; в) 16S-1P\_3; г) 8S-2P\_3; д) 8S-2P\_1; е) 8S-2P\_2; ж) 8S-2P\_4; з) 16S-1P\_4; и) 16S-1P\_5; к) 8S-2P\_5; л) 8S-2P\_6; м) 8S-2P\_7

При проектуванні масивів першочергово враховується критична напруга холостого ходу при мінімальних температурах. Для Київської області розрахункова

мінімальна температура становить приблизно  $-25^{\circ}\text{C}$ .

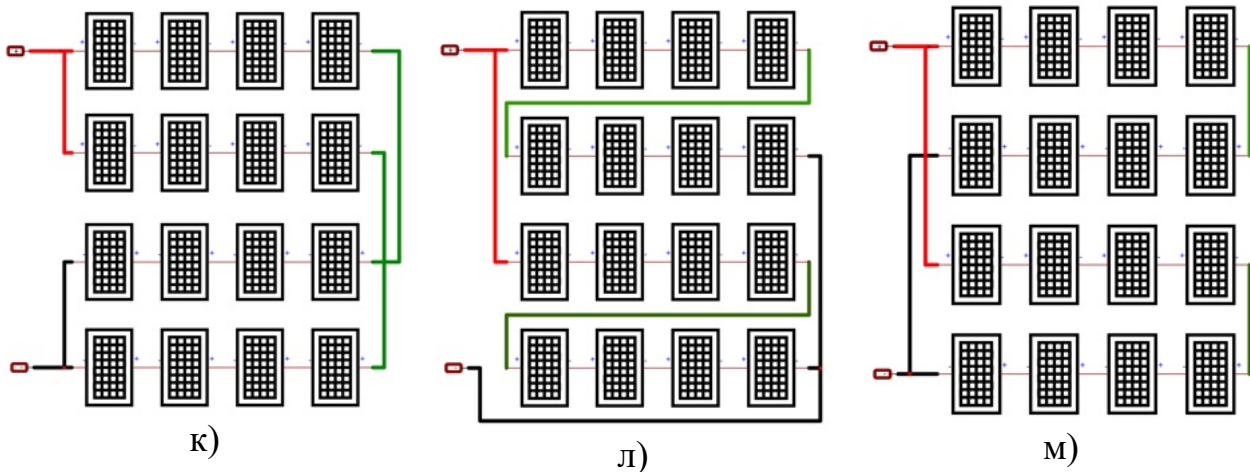


Рис. 3.1 (продовження)

Різниця температур від стандартних умов ( $STC, 25^{\circ}\text{C}$ ):

$$\Delta T = T - T_{STC} = -25 - 25 = -50^{\circ}\text{C}.$$

Збільшення напруги за рахунок коефіцієнта  $K_v = -0,20$  :

$$U_{Oстax} = U_{OC_{STC}} \times (1 + (K_v \times \Delta T)) = 54 \text{ В} \times (1 + (-0,002 \times -50)) = 54 \times 1,1 = 59,4 \text{ В}$$

При послідовному з'єднанні 16 панелей максимальна напруга масиву становитиме  $16 \times 59,4 \text{ В} = 950,4 \text{ В}$ . Це значення не перевищує максимальну вхідну напругу інвертора в 1000 В.

Розроблені п'ять послідовних конфігурацій передбачають послідовне з'єднання всіх 16 панелей в один ланцюг (стрінг). Вихідний струм масиву дорівнює струму однієї панелі  $I_{MPP} = 14,67 \text{ А}$ , що не перевищує максимальний вхідний робочий струм інвертора в 20 А.

Розміщення в 1 ряд (1x16) оптимально для довгих скатів дахів промислових будівель або довгих парканів. 2-рядне (2x8) та 4-рядне (4x4) розміщення використовуються при обмеженій ширині покрівлі. Таке групування дозволяє компактно розмістити масив на приватних будинках, мінімізуючи довжину кабельних трас і падіння напруги.

Розроблені сім послідовно-паралельних конфігурацій складені з міркувань

надійності та стійкості до затінення. Струм масиву подвоюється ( $2 \times 14,67 \text{ A} = 29,34 \text{ A}$ ). Це перевищує  $20 \text{ A}$ , тому такі масиви мають підключатися до двох незалежних МРРТ-входів інвертора (по  $14,67 \text{ A}$  на кожен).

2- та 4-рядне розміщення дозволяють розділити масив на окремі зони. Якщо частина масиву затінюється деревом чи димарем, інша паралельна гілка продовжує працювати з максимальною ефективністю. Конфігурації  $4 \times 4$  є найбільш затребуваними для прибудинкових територій, оскільки потребують найменшої площі опорних конструкцій та легше піддаються сервісному обслуговуванню. Послідовні конфігурації мають найбільш спрощений монтаж. Послідовно-паралельні обирають у випадках складної геометрії даху або наявності об'єктів, що спричиняють динамічне затінення.

Таким чином, запропоновані 12 конфігурацій охоплюють всі можливі сценарії експлуатації: від максимально ефективної генерації при повному освітленні до стабільної роботи в умовах щільної забудови та обмеженого простору.

### 3.2. Розробка математичної моделі фотоелектричного масиву з урахуванням часткового затінення

#### 3.2.1. Моделювання одиночної фотоелектричної панелі

##### *Вибір моделі ФЕ комірки*

В науковій літературі представлена велика кількість математичних моделей ФЕ комірки. Більшість авторів, наприклад [152], [153], [154], ґрунтуються на однодіодній моделі (SDM) - Рис. 3.2(а). В дослідженнях [155], [156], [157] розглянута дводіодна модель DDM, показана на Рис. 3.2(б). В роботі [158] розраховується модель (Рис. 3.2(в)) з трьома діодами (TDM).

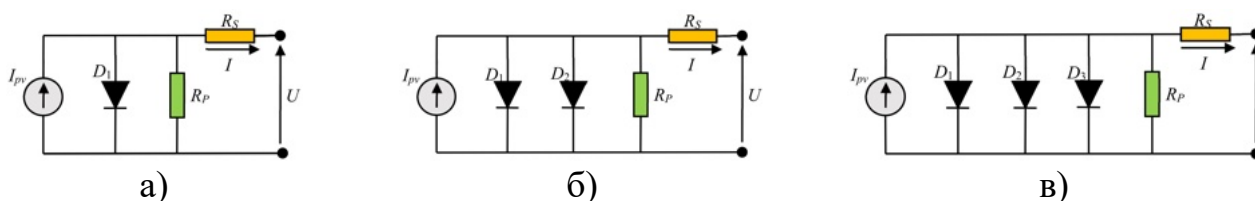


Рис. 3.2 Моделі еквівалентних схем ФЕ комірок: а) SDM, б) DDM, в) TDM [159]

У великих ФЕМ або при розробці систем МРРТ, де симуляція має відбуватися в

реальному часі або з високою швидкістю, ускладнення моделі призводить до експоненціального зростання часу розрахунків без суттєвого впливу на кінцевий результат.

В роботі [160] зазначається, що SDM забезпечує достатню точність для інженерних завдань, оскільки вона дозволяє легко ідентифікувати параметри за даними технічного паспорта виробника. Ускладнення до DDM вимагає складніших чисельних методів розв'язання, що не є виправданим для моделювання цілих масивів. Дослідження [157] підтверджує, що хоча DDM краще описує поведінку комірки при дуже низьких рівнях радіації, у стандартних та динамічних режимах роботи різниця між SDM та DDM стає нехтувано малою. У праці [153] наголошується, що для розробки та тестування алгоритмів MPPT (Fuzzy Logic, P&O) SDM є фактичним стандартом, оскільки вона стабільно працює у середовищі Simulink, уникаючи проблем зі збіжністю, які часто виникають у складніших трансцендентних моделях.

Таким чином, використання однодіодної моделі дозволяє уникнути надмірних обчислювальних затримок при моделюванні складних конфігурацій масиву (16 і більше панелей) і забезпечує високу збіжність розрахунків у Simulink.

### **Математична модель ФЕ комірки**

Загальновизнана для оцінки енергетичної ефективності систем з MPPT керуванням однодіодна модель ідеальної фотоелектричної комірки показана на Рис. 3.3. Вона включає в себе джерело струму  $I_{ph}$ , діод  $D$ , послідовний опір  $R_s$ , паралельний (шунтуючий) опір  $R_{sh}$ . Надалі математичний апарат, що описує електричні характеристики даної моделі, базується на підходах, викладених у роботі [161].

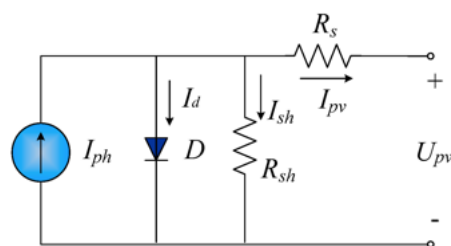


Рис. 3.3 Однодіодна модель фотоелектричної комірки [1]

Вихідний струм ФЕ комірки (А)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \quad (3.1)$$

де:

$I_{ph}$  - фотоелектричний струм (А),

$I_d$  - струм діода (А),

$I_{sh}$  - струм через шунтуючий опір (А).

Вихідна напруга (В)

$$U_{pv} = U_j - I_{pv}R_s, \quad (3.2)$$

де:

$U_j$  - напруга на діоді та шунтуючому опорі  $R_{sh}$  (В),

$I_{pv}$  - вихідний струм (А),

$R_s$  - послідовний опір (Ом).

Діодний струм становить (А)

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{U_j}{\alpha U_t}} - 1 \right) = I_0 \left( e^{\frac{U + I_{pv} R_s}{\alpha U_t}} - 1 \right), \quad (3.3)$$

де:

$I_0$  - зворотний струм насичення діода (А),

$U_t = \frac{kT}{q}$  - теплова напруга (В),

$\alpha$  - коефіцієнт ідеальності діода (зазвичай між 1 і 2),

$q$  - заряд електрона ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл),

$k$  - постійна Больцмана ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),

$T$  - робоча температура (К).

Струм насичення діода (А)

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i(T - T_{STC})}{e^{\frac{U_{oc} + K_v(T - T_{STC})}{\alpha U_t}} - 1}, \quad (3.4)$$

де:

$I_{sc}$  - струм короткого замикання STC (А),

$U_{OC}$  - напруга холостого ходу STC (В),

$K_i$  - температурний коефіцієнт  $I_{SC}$  (А/К),

$K_v$  - температурний коефіцієнт  $U_{OC}$  (В/К),

$T_{STC} = T_0 + 25^\circ C = 273.15 + 25 = 298.15 K$  - температура STC.

Рівняння (3.4) отримано шляхом включення температурних коефіцієнтів струму і напруги  $K_i$  і  $K_v$  фотоелектричної комірки. Ця модифікація спрямована на узгодження напруги холостого ходу моделі з експериментальними даними для дуже широкого діапазону температур. Рівняння спрощує модель і скасовує похибку моделі в околицях напруги холостого ходу та в інших областях ВАХ. Достовірність моделі з цим рівнянням було перевірено за допомогою комп'ютерного моделювання та шляхом порівняння з експериментальними даними [160].

Струм через шунтуючий опір

$$I_{sh} = \frac{U_j}{R_{sh}} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3.5)$$

де:

$R_{sh}$  - паралельний опір,

$R_s$  - послідовний опір.

Фотострум комірки (А)

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - T_{STC})) \cdot \frac{G}{G_{STC}}, \quad (3.6)$$

де:

$G$  - сонячне опромінення (Вт/м<sup>2</sup>),

$G_{STC} = 1000$  Вт/м<sup>2</sup> - сонячне опромінення SCT.

Вихідний струм комірки (А) на основі рівняння Шоклі [162], адаптованому для врахування впливу послідовного та паралельного опорів згідно з методикою [160],

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U + IR_s}{\alpha U_t}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3.7)$$

На основі рівнянь (3.1-3.7) отримуються  $I - U$  та  $P - U$  характеристики однодіодної моделі сонячної комірки.

### Модель Matlab/Simulink розрахунку фотоструму PV комірки

Структура моделі Simulink формування фотоструму  $I_{ph}$  наведена на Рис. 3.4. Для розрахунку фотоструму підсистема у якості вхідних параметрів використовує змінні зовнішнього середовища та дані з технічного паспорта ФЕП:  $G$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{STC} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{SC}$  (A),  $K_i$  ( $\%/^{\circ}\text{C}$ ).

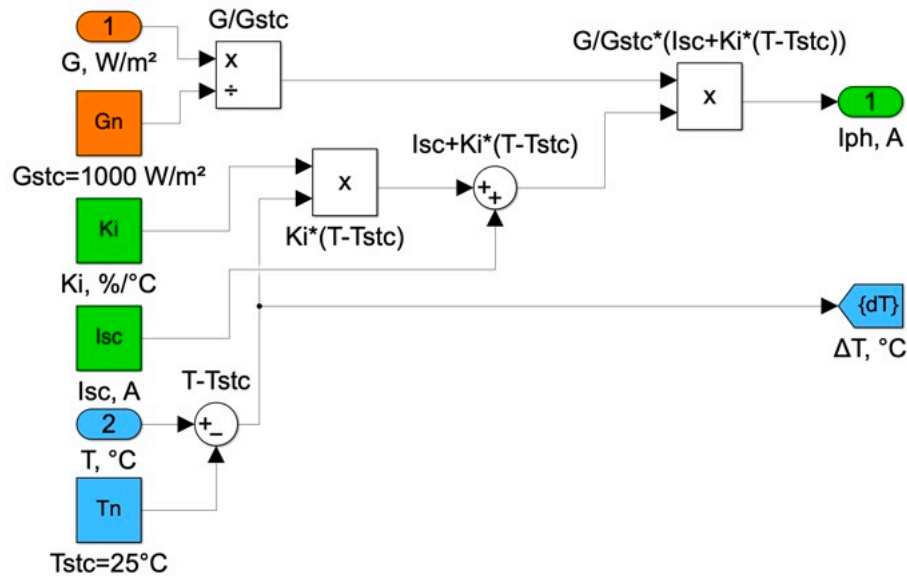


Рис. 3.4 Підсистема розрахунку фотоструму комірки  $I_{ph}$  згідно (3.6)

Вихідними параметрами підсистеми є:

- $I_{ph}$  (A): підсумкове значення генерованого фотоструму, що передається до головної ланки розрахунку вихідного струму моделі (вихідний порт 1).
- $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ): розрахована різниця температур ( $T - T_{STC}$ ), яка виводиться через тег для синхронізації з іншими підсистемами.

Підсистема реалізує рівняння (3.6) через наступні блоки:

- Блок віднімання (Sum) обчислює відхилення поточної температури від стандартної  $\Delta T = T - T_{STC}$ .
- Блок множення (Product) розраховує температурний приріст струму  $\Delta T \cdot K_i$ .
- Блок додавання (Sum) коригує базовий струм короткого замикання на значення температурного приросту  $I_{SC} = \Delta T \cdot K_i$ .
- Блок ділення (Product): Обчислює коефіцієнт інтенсивності світла як відношення поточного опромінення до стандартного  $\frac{G}{G_{STC}}$ .

- Блок множення (Product) перемножує температурно-коригований струм на коефіцієнт опромінення для отримання остаточного значення  $I_{ph}$ .

### **Модель Matlab/Simulink розрахунку струму насичення діода PV комірки**

Струм насичення діода  $I_0$  характеризує струм витoku через напівпровідниковий перехід у зворотному напрямку і показаний на Рис. 3.5:

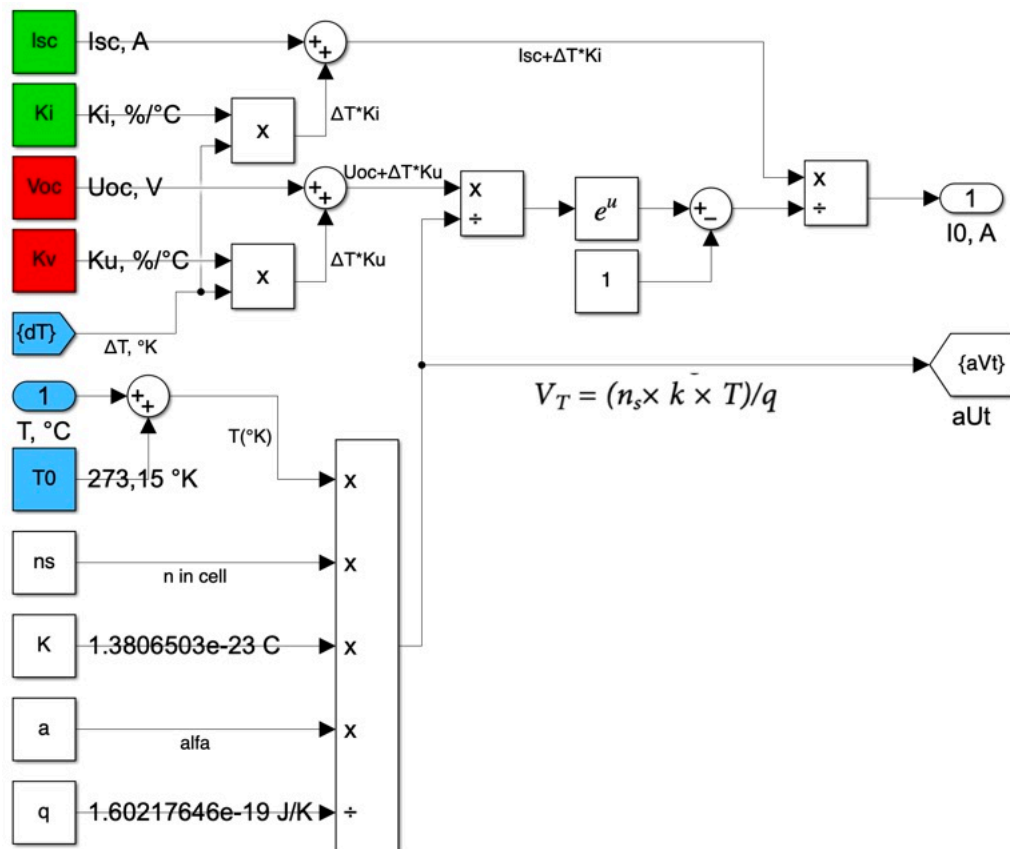


Рис. 3.5 Підсистема розрахунку струму насичення діода  $I_0$  комірки згідно (3.4).

Вихідними параметрами підсистеми є:

- $I_0$  ( $I_r$ , A).
- $\alpha U_t$ : Теплова напруга, помножена на коефіцієнт ідеальності, що виводиться як допоміжний сигнал через тег для інших підсистем.

Модель побудована за допомогою стандартних блоків бібліотеки Simulink.

### **Модель Matlab/Simulink розрахунку діодного струму PV комірки**

Підсистема розрахунку струму діода  $I_d$ , показана на Рис. 3.6, побудована за рівняннями (3.2-3.3).

Вхідні параметри підсистеми:  $U_{PV}$ ,  $I_{PV}$ ,  $R_S$ ,  $\alpha U_t$ ,  $I_0$ .

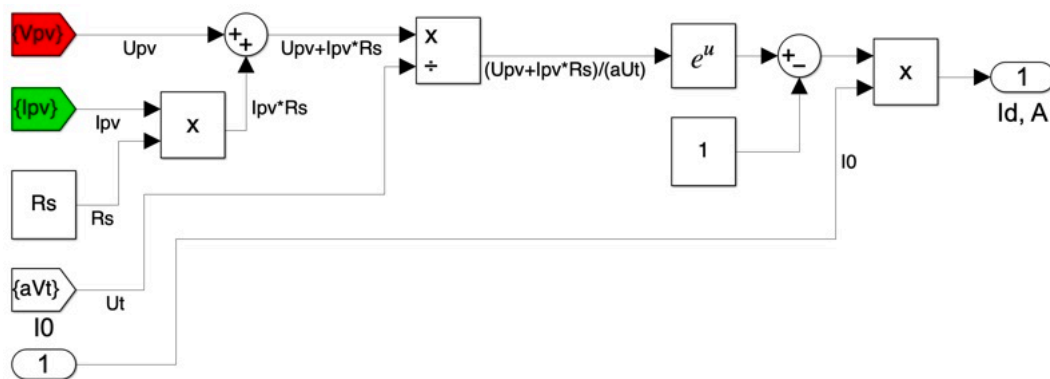


Рис. 3.6 Підсистема розрахунку струму діода комірки  $I_d$  згідно (3.2-3.3)

### **Модель Matlab/Simulink розрахунку струму через шунтуючий резистор ФЕ комірки**

Структура моделі підсистеми розрахунку струму через шунтуючий резистор  $I_{sh}$  ФЕ комірки показана на Рис. 3.7.

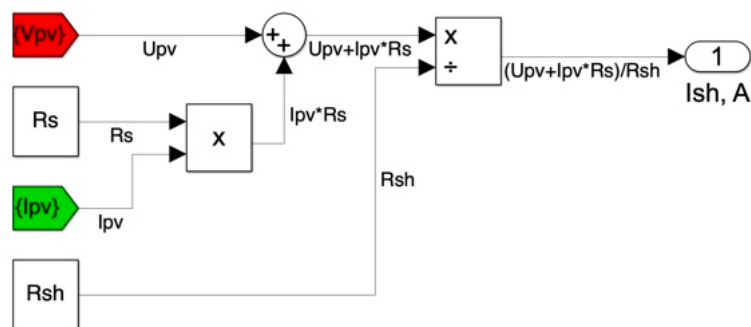


Рис. 3.7 Підсистема розрахунку струму через шунтуючий резистор комірки  $I_{sh}$  згідно (3.5)

### **Спрощення в моделі MATLAB/Simulink ФЕ комірки**

В процесі моделювання ФЕП прийняті припущення:

- Послідовний  $R_S$  та шунтуючий  $R_{SH}$  опори зазвичай залежать від температури та рівня радіації, проте в моделі вони прийняті стабільними. В роботі [160] доведена можливість використання фіксованих та розрахованих для STC значень достатньою для точного відтворення  $I - U$  характеристик у широкому діапазоні умов.
- Коефіцієнт ідеальності діода  $\alpha$  зазвичай лежить у діапазоні  $1 \leq \alpha \leq 2$  і залежить від механізму рекомбінації в напівпровіднику. В дослідженнях [160], [163] автори використовують для однодіодних моделей кремнієвих

фотоелементів, до яких належить панель «Longi Solar Hi-MO X10»,  $\alpha = 1.1$ . Це значення враховує дифузійний струм та незначну рекомбінацію в області просторового заряду, що забезпечує найкращий збіг форми ВАХ з експериментальними даними. В роботі [161] продемонстровано, що при налаштуванні параметрів моделі в Simulink, варіювання коефіцієнта  $\alpha$  є стандартною процедурою для досягнення збіжності з паспортними даними (такими як  $U_{OC}$  та  $I_{SC}$ ) конкретної ФЕП.

Прийняті спрощення математичної моделі дозволяють похибки розрахунків в межах інженерної точності (менше 3-5%), що підтверджується результатами досліджень [164] [160].

### ***Модель Matlab/Simulink ФЕП***

Електрофізичні процеси однієї комірки перенесені на всю ФЕП шляхом множення на кількість послідовних та паралельних з'єднань. У межах однієї промислової ФЕП використовуються комірки з однієї партії, що пройшли сортування. Це гарантує мінімальний розкид параметрів, що дозволяє розглядати їх як ідентичні елементи. Це математично еквівалентно заміні  $U_{cell}$  на  $n_S \cdot U_{cell}$ . Оскільки дослідження спрямоване на зовнішнє затінення, внутрішні неоднорідності ФЕП (різниця між окремими комірками всередині однієї секції) є нехтовно малими порівняно з перепадами радіації між секціями, захищеними байпасними діодами. Модель в роботі [164] підтверджує, що підхід "еквівалентної панелі" є валідним для системного аналізу, якщо параметри моделі налаштовані за паспортними даними ФЕП (STC).

Модель ФЕП, показана на Рис. 3.8, поєднує математичні розрахунки внутрішніх параметрів комірки з електричною схемою заміщення для симуляції реальних вихідних характеристик ФЕП.

Модель ФЕП структурно розділена на два модулі: обчислювальний (ліворуч) та силовий і вимірювальний (праворуч).

Обчислювальний модуль формує величину вихідного струму ( $I_m$ ) і відповідає за математичне розв'язання рівняння балансу струмів однодіодної моделі з урахуванням з'єднання комірок і їх кількості. Модуль включає чотири основні

підсистеми:

- Підсистема  $I_{ph}$  розраховує фотострум залежно від радіації  $G$  та температури  $T$ .
- Підсистема  $I_0$  визначає зворотний струм насичення діода.
- Підсистема  $I_d$  обчислює струм, що протікає через діод згідно з рівнянням Шоклі.
- Підсистема  $I_{sh}$  розраховує струм витоку через шунтуючий опір.

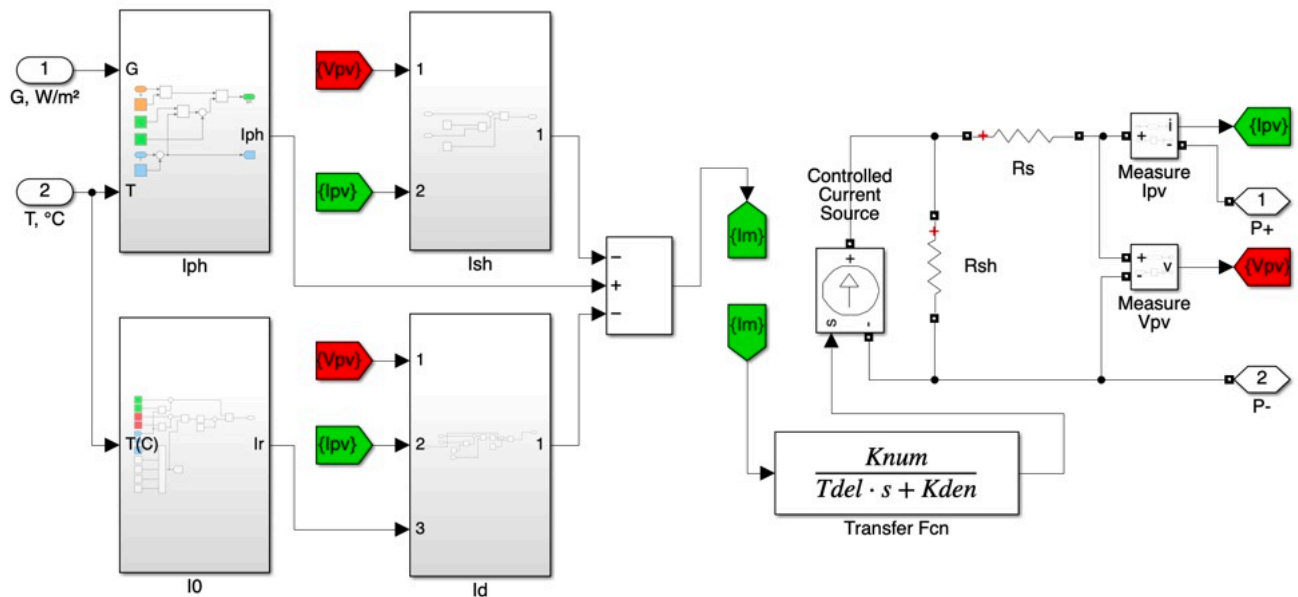


Рис. 3.8 Модель MATLAB/Simulink ФЕП

Всі розраховані значення подаються на суматор, який реалізує рівняння вихідного струму ФЕП (3.1). Отриманий сигнал  $I_m$  передається через теги до силової частини моделі.

Силовий модуль з вимірюванням представляє фізичну реалізацію ФЕП та інтерфейс для підключення до зовнішнього навантаження, фізичні послідовний та шунтуючий опори комірки, що впливають на нахил ВАХ та втрати потужності. Теги  $I_{PV}$  та  $U_{PV}$  передають вимірні значення струму та напруги назад до обчислювальних підсистем для розрахунків на наступному кроці модулювання.

Для виключення алгебраїчних петель, які виникають через взаємозалежність розрахункового струму та вимірної напруги, використано рішення з введенням блоку затримки Transfer Fcn (передавальна функція), що запропоновано в [165].

Передавальна функція  $W(s) = \frac{K_{num}}{T_{del} \cdot s + K_{den}} = \frac{1}{10^{-4} \cdot s + 1}$  є аперіодичною ланкою першого

порядку з параметрами: коефіцієнт чисельника  $K_{num} = 1$ , коефіцієнт знаменника  $K_{den} = 1$ , постійна часу  $T_{del} = 10^{-4}$  (сек.). Перехідний процес цієї функції дуже короткий і не впливає на точність чи стабільність симуляції, затримка мінімальна і блок фактично працює як одиничний безінерційний підсилювач.

### 3.2.2. Моделювання фотоелектричного масиву

У розробленій моделі реалізовано принцип індивідуального завдання вхідних параметрів для кожного структурного елемента масиву. Робочий процес завантаження даних сонячної радіації базується на наступних технічних положеннях:

- Значення інтенсивності сонячної радіації подаються у вигляді матриці коефіцієнтів  $G(i, j)$ , де індекси  $(i, j)$  відповідають порядковому номеру панелі в структурі масиву.
- Кожна з математичних моделей ФЕП функціонує як автономний об'єкт із власним портом вводу сигналу радіації. Це дозволяє імітувати реальні умови експлуатації, за яких рівень опромінення окремих панелей може суттєво відрізнятися.
- Для відпрацювання сценаріїв нерівномірного освітлення розроблено масив-шаблони, які містять попередньо розраховані значення  $G$  для кожної ФЕП.

Такий підхід дозволяє досліджувати режими роботи масиву за будь-яких сценаріїв затінення. Завдяки незалежному завантаженню  $G(i, j)$ , модель стає придатною ідентифікувати глобальний максимум потужності в умовах багатопіковості вольт-амперних характеристик, спричиненої частковим затіненням.

Використання окремої підсистеми збору даних (Рис. 3.9) дозволяє відокремити фізичну модель масиву від засобів вимірювання. Це забезпечує модульність - можливість змінювати конфігурацію масиву, не перероблюючи логіку збору та обробки даних. Підсистема збору даних у середовищі MATLAB/Simulink перетворює фізичні сигнали моделі у формат, придатний для аналізу, візуалізації та подальшої обробки результатів.

Підсистема призначена для централізованого збору та обробки вихідних

параметрів ФЕМ (напруги, струму, потужності) та зовнішніх факторів (сонячної радіації, температури) у режимі реального часу. Вона забезпечує:

- Моніторинг динаміки перехідних процесів.
- Формування масивів даних для побудови  $I - U$  та  $P - U$  характеристик.
- Збереження результатів симуляції у робочу область MATLAB (Workspace) для подальшого аналізу.

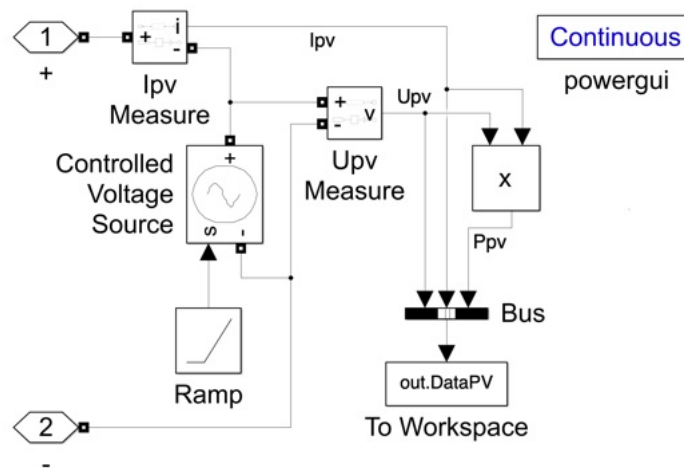


Рис. 3.9 Підсистема збору даних симуляції MATLAB/Simulink ФЕМ

Підсистема складається з трьох рівнів: вхідний рівень для прийому сигналів від вимірювальних блоків напруги та струму, обчислювальний рівень для математичного перетворення сигналів і вихідний рівень для візуалізації та експорту даних.

У блоці Product здійснюється обчислення потужності ФЕМ відповідно до базового рівняння  $P_{PV} = U_{PV} \cdot I_{PV}$ .

Блок Bus Creator впорядковує сигнали, об'єднуючи розрізнені лінії ( $U_{PV}$ ,  $I_{PV}$ ,  $P_{PV}$ ,  $G$ ,  $T$ ) у єдину шину (Bus).

Блок To Workspace записує вибрані сигнали у змінні MATLAB з використанням відміток часу симуляції (Timeseries). Це дозволяє після завершення симуляції використовувати скрипти для автоматизованого аналізу і побудови графіків високої якості.

Генератор постійно зростаючого сигналу (Ramp) генерує керуючий сигнал, амплітуда якого лінійно зростає з часом і виконує роль «задатчика» напруги для зняття ВАХ. За цього напруга змінюється від 0 до  $U_{OC}$  масиву  $i$ , відповідно, струм

від точки  $I_{SC}$  (струм короткого замикання при напрузі 0 В) до точки  $U_{OC}$  (напруга холостого ходу при струмі 0 А).

Кероване джерело напруги (Controlled Voltage Source) є інтерфейсом між математичною частиною Simulink та електричною схемою (Simscape/Power Systems).

Спільна робота блоків реалізує метод розгортки напруги: у момент  $t = 0$  Ramp видає 0, джерело встановлює на виході масиву 0 В і прилад фіксує струм короткого замикання  $I_{SC}$ . Далі Ramp поступово збільшує значення, джерело подає зростаючу напругу, а струм зменшується згідно з однодіодною моделлю до напруги  $U_{OC}$ , при якій струм стає нульовим.

Використання цієї пари блоків дозволяє:

- Отримати безперервну криву  $I - U$  за один цикл симуляції, оскільки напруга змінюється плавно.
- Автоматизувати процес для різних рівнів радіації, щоб отримати сімейство кривих ВАХ.

### **3.2.3. Обґрунтування методики моделювання руху смуги затінення з урахуванням напрямку вітру**

Обґрунтування методики моделювання руху смуги затінення з урахуванням напрямку вітру базується на загальноприйнятому припущенні, що в межах окремої ФЕП значення сонячної радіації відповідає середньому значенню і є постійним. Так в роботі [166] зазначено, що моделі продуктивності ФЕП стандартно ґрунтуються на припущенні рівномірного опромінення поверхні ФЕП. Автори [167] підкреслюють, що традиційні моделі ФЕМ виходять із рівномірного освітлення всіх комірок. В дослідженні [168] використане поняття «uniform irradiance» як базове припущення, за якого всі комірки отримують однакову інтенсивність сонячного випромінювання.

Згідно з ДСТУ «Будівельна кліматологія» [145] в літні місяці в Київському регіоні має місце вітер у межах північно-західного сектора (рис. 3.10).

За умов ясного неба максимальна сумарна (пряма + розсіяна) сонячна радіація для горизонтальної поверхні в липні складає  $691 \text{ Вт/м}^2$ (пряма) +  $171 \text{ Вт/}$

$\text{m}^2(\text{розсіяна}) = 862 \text{ Вт/м}^2$ . За 10-бальної хмарності  $327 \text{ Вт/м}^2$ . Відповідно до цього прийнято діапазон змінення радіації в смузі затінення від  $400 \text{ Вт/м}^2$  до  $800 \text{ Вт/м}^2$ .

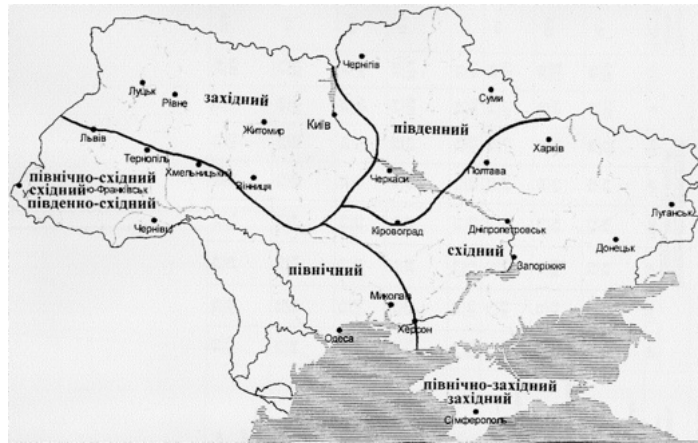
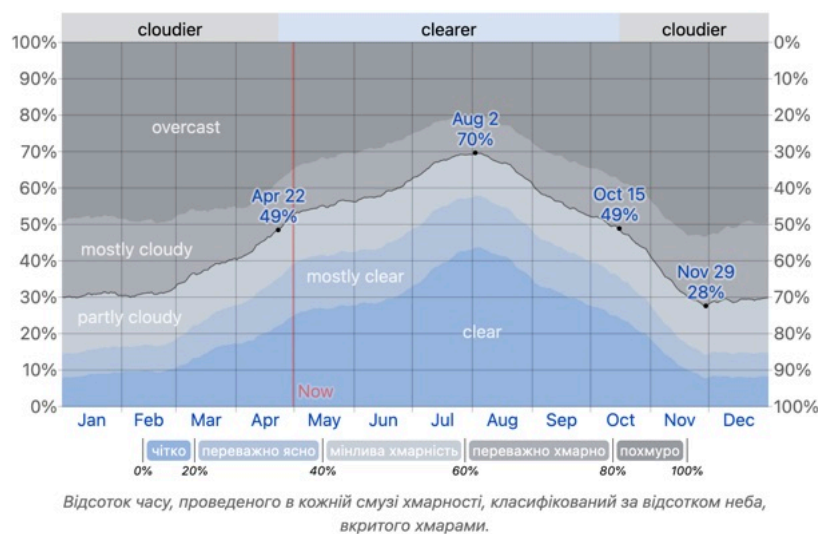


Рис. 3.10 Переважний напрям вітру в липні

Базову градацію сонячної радіації для окремих ФЕП при русі смуги затінення прийнято 12.5% від максимальної в ясний день влітку. В залежності від швидкості градація може зменшуватися практично до 0.

Середня кількість ясних днів влітку 2,8 – 4,9, а похмурих 5,8 – 6,3. Зіставлення значень енергії, що генерується ФЕП  $W_{PVM}$  в ясний день літа для Київського регіону з середньомісячним значенням  $(0,7 - 0,75)W_{PVM}$  показує, що характерним явищем є незначна хмарність.



	Січ	Лютий	Бер	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Хмарніше	69%	69%	62%	54%	45%	41%	33%	34%	44%	52%	68%	71%
Чіткіше	31%	31%	38%	46%	55%	59%	67%	66%	56%	48%	32%	29%

Рис. 3.10 Категорії хмарності в Києві

За даними [169] середнє значення хмарності влітку становить 33-41% (Рис. 3.10). Тобто затінення не постійне, а змінюється з рухом хмар. Це створює умови для часткового затінення масиву ФЕП за руху смуги відповідно напрямку вітру.

Структуру моделі MATLAB/Simulink послідовної конфігурації ФЕМ 16S-1P\_3 (4x4) (рис.3.1, з) показано на Рис. 3.11. Всі ФЕП з'єднані послідовно в одну лінію (струну). Загальні виводи масиву підключені до підсистеми збору даних. Вхідними параметрами є робоча температура ФЕП  $T(^{\circ}\text{C})$  (однакова для всіх ФЕП з можливістю зміни) і сонячна радіація  $G(\text{Вт}/\text{м}^2)$ . Значення подаються на відповідні входи ФЕП. Дослідження виконані за однакової температури ФЕП.

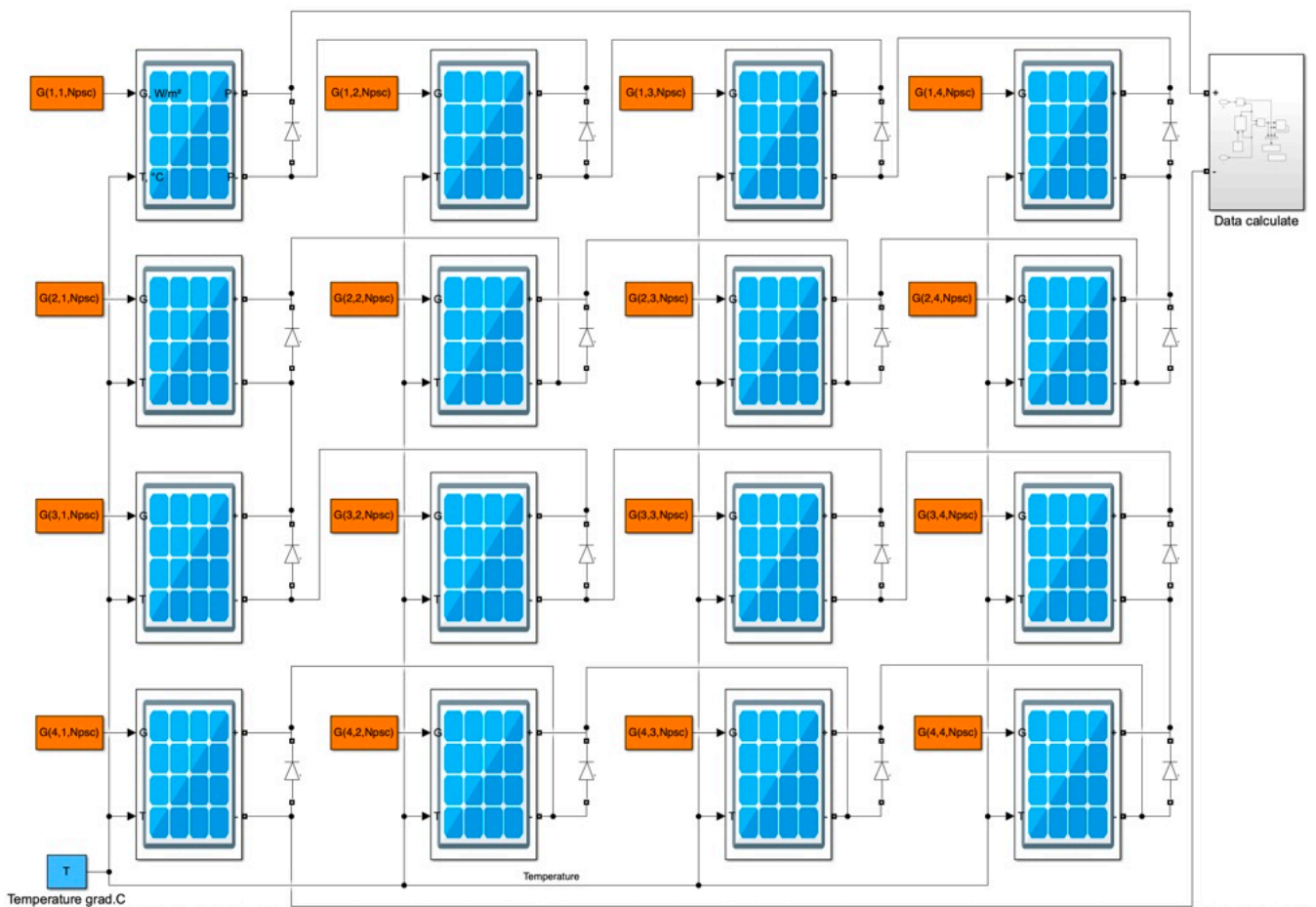


Рис. 3.11 Модель MATLAB/Simulink послідовної конфігурації ФЕМ 16S-1P\_3 (4x4)

Інші дослідні моделі MATLAB/Simulink для послідовних і послідовно-паралельних конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП 1x16, 2x8, 4x4 згідно рис.3.1 показані на рис. Б1 (Додаток Б).

### ***Визначення шаблонів затінення***

Розглянуті масиви займають незначну площу, ФЕП мають однакову орієнтацію в просторі. Прийняте спрощення щодо однакового значення температури ФЕП. В цьому разі шаблон затінення визначає значення сонячної радіації  $G_{i,j}$  для кожної ФЕП масиву.

Для обґрунтування моделі руху смуги затінення необхідно враховувати три переважні напрямки вітру в липні згідно з табл. 6 в [145]:

1. Західний – 20,4%.
2. Північний – 18,0%.
3. Північно-західний – 18,0%.

Це виправдовує необхідність симуляції затінення в різних напрямках: північ (Пн) на південь (Пд), північний захід (Пн-Зх) на південний схід (Пд-Сх), захід (Зх) на схід (Сх), які можуть бути спричинені переміщенням хмар під впливом цих переважних напрямків вітру.

Шаблон затінення для симуляції проходження смуги часткового затінення через ФЕМ з конфігурацією 16S-1P (1x16 – 1 рядок по 16 панелей) в напрямку з Пн на Пд (кут  $0^\circ$ ) показаний на Рис. 3.12(а), для проміжного напрямку (кут  $14^\circ$ ) на Рис. 3.12(б), для проміжного напрямку (кут  $27^\circ$ ) на Рис. 3.12(в) і для напрямку з Пн-Зх на Пд-Сх (кут  $45^\circ$ ) на Рис. 3.12(г). Шаблони розроблені для різних кутів напрямку руху смуги від  $0$  до  $76^\circ$ . Для симуляції кожен з шаблонів лінійно інтерполюється, за цього відповідним чином зменшуються градації радіації для ФЕП. Розроблені в середовищі Excel шаблони затінення для конфігурації масиву  $1 \times 16$  для кутів  $76^\circ$  і  $63^\circ$  наведено на рис.Б2 (Додаток Б).

### ***Реалізація механізму імітації руху смуги затінення***

Кадри шаблонів завантажуються в модель масиву з подальшим розрахунком потужності  $P(U)$  та потужності в точці GMPP. Симуляція відбувається шляхом зсуву кадру на одну строку. Кадри шаблонів затінення для масиву з конфігурацією 8S-2P (2x8) мають розмір 2x8 комірки. Розрахунки показників здійснюються по кадрам в порядку їхнього чергування. Траєкторія GMPP визначається згідно отриманим

максимумам. Алгоритм реалізації механізму імітації руху смуги затінення наведено на Рис. 3.13.

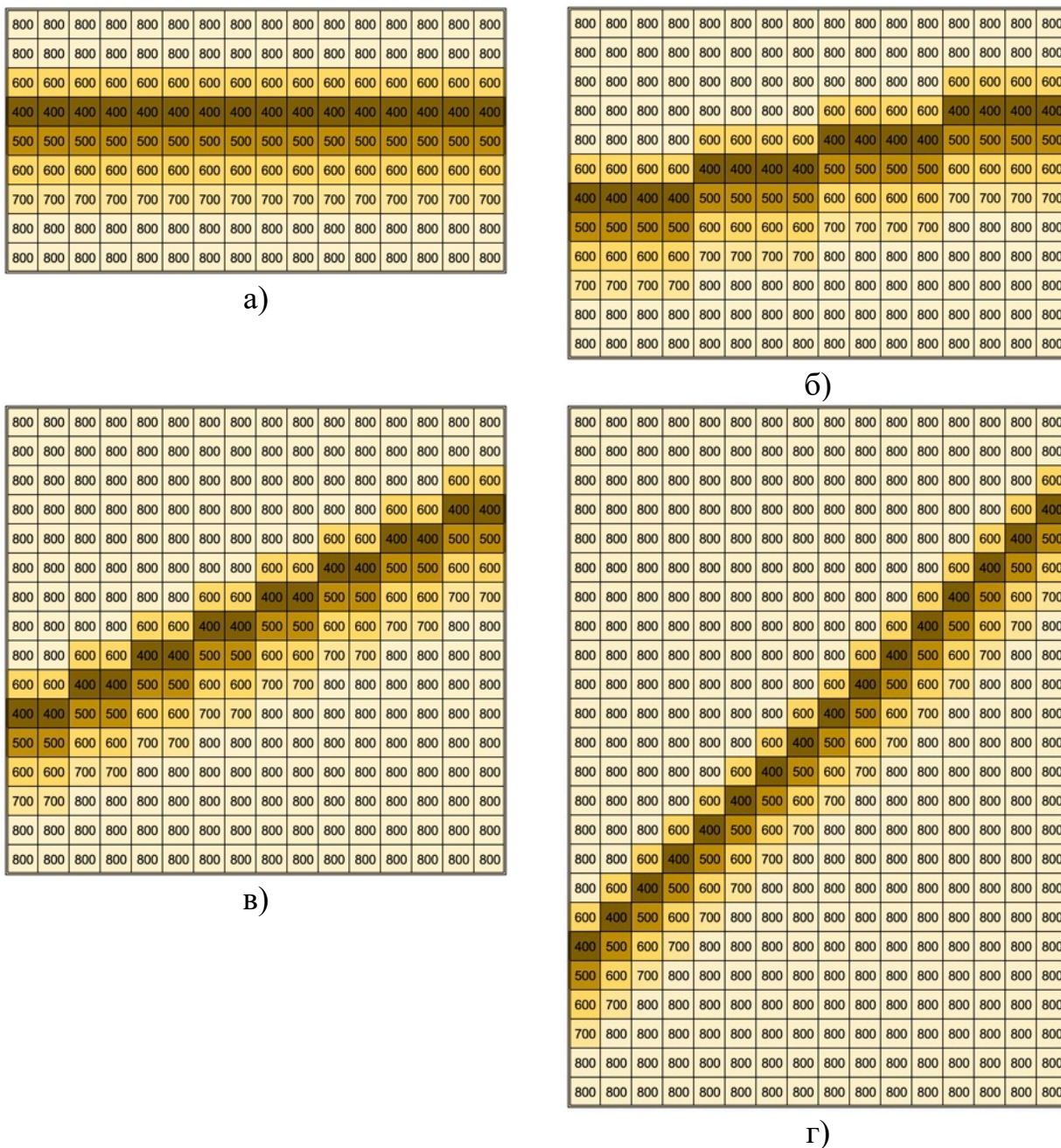


Рис. 3.12 Шаблони затінення ФЕМ  $1 \times 16$ : а) – напрям руху смуги затінення з Пн на Пд (кут  $0^\circ$ ), б) – проміжний напрям руху смуги затінення (кут  $14^\circ$ ), в) – проміжний напрям руху смуги затінення (кут  $27^\circ$ ), г) – напрям руху смуги затінення Пн-Зх на Пд-Сх (кут  $45^\circ$ )

Алгоритм базується на динамічній вибірці даних із розрахованої матриці радіації та складається з наступних кроків:



Рис. 3.13 Алгоритм реалізації механізму імітації руху смуги затінення

#### 1. Формування базових матриць радіацій.

Головною метою розробки матриць є створення прецизійної бази вхідних сигналів для моделювання динамічних процесів затінення ФЕ масивів шириною до 16 панелей. Процес реалізується у два етапи:

- Формування базових шаблонів - у середовищі Excel розроблені первинні цифрові маски, що описують геометрію смуги затінення під різними кутами до фронту масиву:  $0^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $63^\circ$  та  $76^\circ$ . На Рис. 3.12 представлені готові шаблони для кутів до  $45^\circ$ .
- Масштабування та програмна обробка - отримані шаблони імпортуються в Matlab для подальшого «розтягування» та математичної корекції, що дозволяє перетворити статичну маску на динамічну матрицю  $G_{full16}$  (файл *array\_16.m* в Б.7 Додаток Б).

Важливим моментом у моделюванні є правильний вибір коефіцієнтів масштабування (*scaleFactor*). Масштабування виконується таким чином, щоб отримати масив обсягом приблизно 48 рядків. Наприклад, для шаблону з кутом  $45^\circ$  використовується  $scaleFactor = 2$ , що за формулою  $(nRows - 1) \cdot scaleFactor + 1$  дає 47–48 розрахункових рядків. Отримана структура такої матриці (перші 20 рядків) для кута  $45^\circ$  представлена на Рис. 3.14.

```

% кількість строк для масок
Gfull16row = [0,20,22,24,26,28,30,32,34,36,38,40,42,44,46,48];
Gfull16 = [... % повна матриця освітлення
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 648 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 698 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 648 748 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 698 786 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 648 748 799 ;
800 800 800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 698 786 800 ;
800 800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 648 748 799 800 ;
800 800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 698 786 800 800 ;
800 800 800 800 800 800 702 504 451 548 648 748 799 800 800 ;
800 800 800 800 800 777 604 440 498 598 698 786 800 800 800 ;
];

```

Рис. 3.14 Частка (перші 20 строк) базової матриці радіацій для масивів шириною до 16 ФЕП з полозою затінення з кутом  $45^\circ$  до фронту масиву

Така щільність даних дозволяє моделювати рух затінення (зсув кадрів) для швидкостей 1x, 2x, 3x та 4x. Обрана кількість рядків гарантує, що навіть для конфігурації масиву 4x4 буде отримано мінімум 11-12 унікальних  $I - U$  кривих для детального аналізу енергетичних процесів.

Для уникнення фізично некоректних стрибкоподібних змін рівня освітленості між сусідніми елементами ФЕ масиву застосовується алгоритм дворівневої обробки:

- програмний код розраховує лінійно інтерпольовані проміжні значення радіації між рядками за допомогою коефіцієнта  $\alpha$ , що забезпечує безперервність градієнта тіні;
- для фінальної обробки використовується Гаусове згладжування (функція `smoothdata` з вікном 'gaussian' рівним 4), що дозволяє імітувати реальний розмитий край тіні (півтінь), який виникає внаслідок дифузного розсіювання світла.

Результат такої обробки продемонстровано на Рис. 3.15. На графіку видно, що оригінальна крива (без згладжування) має різкий спад радіації між 10–12 кроками, після чого значення поступово відновлюються. При застосуванні

гаусівського згладжування з малими вікнами (2–3) крива лише трохи «пом'якшується», але зберігає основну форму різкого падіння. Зі збільшенням вікна до 5–6 спостерігається значне згладжування, - спад стає більш плавним, що робить профіль більш «м'яким», але менш точним у відображенні реальних змін. Функція з вікном 4 демонструє компромісний результат, - крива достатньо згладжена, але водночас зберігає характерний спад радіації, не перетворюючи його на надто розтягнуту плавну криву. Саме тому для подальшого аналізу обрано параметр  $window = 4$ , який поєднує реалістичність моделі з корисністю отриманих даних.

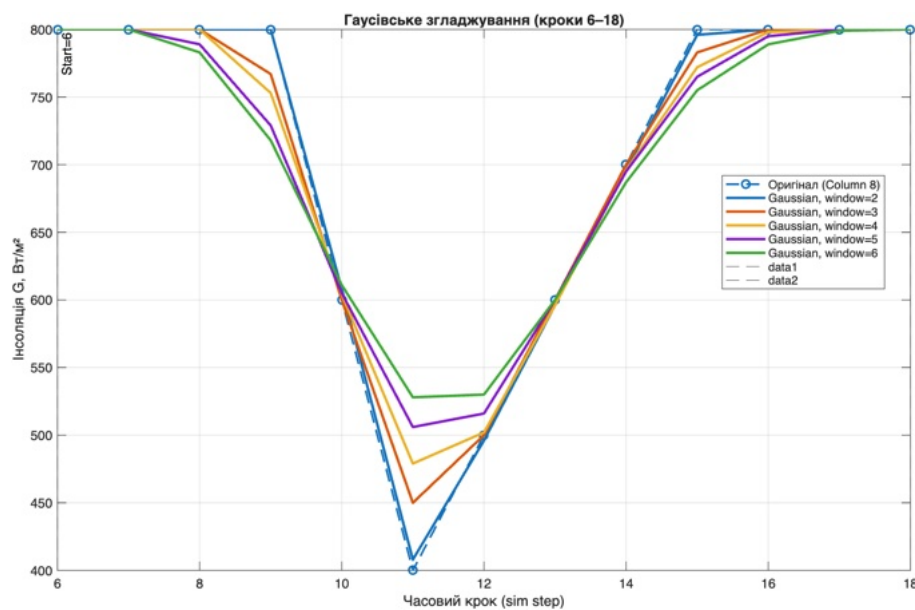


Рис. 3.15 Гаусівське згладжування масиву радіацій з різними вікнами

## 2. Вибір робочої підматриці.

Залежно від конфігурації масиву, з правої сторони базової матриці  $G_{full16}$  (Рис. 3.14) вибирається необхідна кількість стовпців та рядків, наприклад, для кута  $45^\circ$ :

- Для масиву  $4 \times 4$  - підматриця розміром 24 рядки та 4 стовпці;
- Для масиву  $2 \times 8$  - підматриця розміром 34 рядки та 8 стовпців;
- Для масиву  $1 \times 16$  - підматриця розміром 48 рядків та 16 стовпців.

## 3. Параметризація швидкості руху.

Швидкість руху смуги затінення  $nx$  імітується шляхом зміни кроку вибірки кадрів із кратністю  $n$  рядків, де  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ . Для підтвердження достатності

обраного діапазону швидкостей (1x – 4x) та перевірки гіпотези щодо незалежності сумарної енергогенерації від швидкості руху затінення необхідно здійснити аналіз із позицій математичного апарату, принципів дискретизації та особливостей побудови моделі.

Загальна генерація енергії  $E$  за час проходження смуги затінення  $T$  визначається як інтеграл миттєвої потужності  $P$  за часом:

$$E = \int_0^T P(t) dt$$

У дискретній моделі цей інтеграл замінюється сумою:

$$E_{sim} = \sum_{k=1}^N P_k \cdot \Delta t_k$$

де  $P_k$  — потужність масиву при певному положенні тіні, а  $\Delta t_k$  — тривалість перебування тіні в цьому положенні. У дискретній моделі зміна швидкості руху  $v$  призводить до пропорційної зміни кількості розрахункових кроків  $N$  та часового інтервалу  $\Delta t_k$ . Це забезпечує коректність розрахунку енергетичних показників незалежно від обраної швидкості імітації. Вибір чотирьох швидкостей дозволяє перевірити, чи залишається сума  $E_{sim}$  константою при зміні кроку дискретизації. Якщо значення  $E$  для  $S = 1$  та  $S = 4$  збігаються (з урахуванням масштабування часу), це математично доводить, що динаміка системи лінійна відносно швидкості.

Застосування Гаусового згладжування та лінійної інтерполяції при створенні матриці радіацій видаляє нефізичні стрибки радіації.

Згідно з теоремою Найквіста-Шеннона [170], для точного відновлення сигналу достатньо частоти дискретизації, що вдвічі перевищує максимальну частоту в сигналі. Оскільки матриця «гладка», навіть при максимальному кроці  $S=4$  (швидкість 4x) вибірка залишається достатньо щільною, щоб не втратити суттєвих змін потужності між кадрами.

Для масиву 4x4 повна матриця містить не менше 48 рядків. При швидкості 1x ( $S=1$ ) отримуються 48 розрахункових точок, а при 4x ( $S=4$ ) -  $\frac{48}{4} = 12$

розрахункових точок. Для імітаційного моделювання 12 точок на один цикл проходження затінення є достатньою кількістю, щоб коректно відобразити форму кривої потужності та обчислити площу під нею (енергію) з мінімальною похибкою.

Використання саме чотирьох швидкостей дозволяє виявити потенційну «динамічну помилку» моделі. Якщо гіпотеза вірна, то

$$E(1x) \approx E(2x) \approx E(3x) \approx E(4x)$$

Діапазон від 1 до 4 охоплює чотириразову зміну інтенсивності вхідного сигналу. Якщо на такому проміжку сумарна енергія залишається незмінною, це буде доказом незалежності інтегрального показника від швидкості процесу в межах дискретної моделі.

Параметризації швидкості через крок  $S \in \{1, 2, 3, 4\}$  забезпечує необхідну роздільну здатність для чисельного інтегрування потужності, а попереднє згладжування вхідних матриць зменшує ризик втрати даних при збільшенні кроку вибірки. Це дозволяє перейти до підтвердження гіпотези про незалежність загальної генерації від динаміки руху хмарності.

#### 4. Ітераційне формування кадрів.

Процес завантаження даних у модель здійснюється шляхом вибірки кадрів, розмір яких відповідає геометрії масиву. Приклади перших двох кадрів для різних конфігурацій (2x8, 4x4, 1x16) та швидкостей наведені на Рис. 3.16, Рис. 3.17, Рис. 3.18, де 1-й кадр – червоний, а 2-й – помаранчевий.

#### 5. Симуляція та аналіз характеристик:

- Значення радіації з кожного кадру завантажуються в індивідуальні моделі ФЕП.
- Розрахунки енергетичних показників та побудова  $I - U$  і  $P - U$  характеристик виконуються послідовно для кожного кадру в порядку їх чергування.

#### 6. Визначення траєкторії GMPP.

Траєкторія GMPP визначається на основі отриманих максимумів для кожного кадру симуляції. Механізм імітації реалізує принцип «ковзного вікна»,

що переміщується по статичній матриці значень радіації, відтворюючи динаміку проходження затінення через ФЕМ.

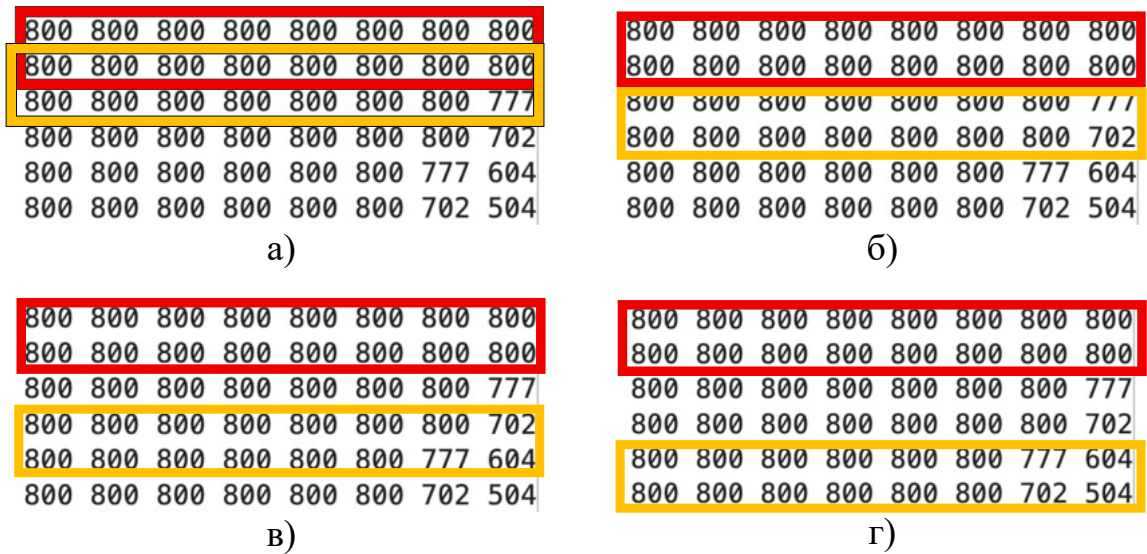


Рис. 3.16 Вибірка кадрів з матриці радіації для завантаження в моделі ФЕ масивів розміром 2x8 для різних швидкостей руху полоси затінення: а) 1x, б) 2x, в) 3x, г) 4x

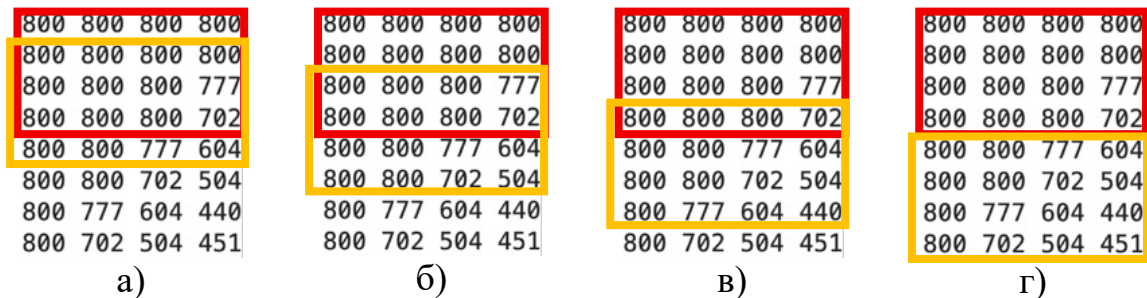


Рис. 3.17 Вибірка кадрів з матриці радіації для завантаження в моделі ФЕ масивів розміром 4x4 для різних швидкостей руху полоси затінення: а) 1x, б) 2x, в) 3x, г) 4x

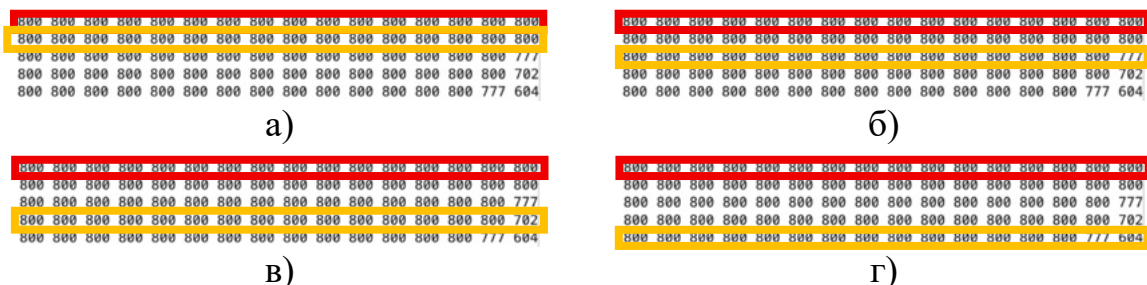


Рис. 3.18 Вибірка кадрів з матриці радіації для завантаження в моделі ФЕ масивів розміром 1x16 для різних швидкостей руху полоси затінення: а) 1x, б) 2x, в) 3x, г) 4x

Ключові особливості реалізації механізму імітації руху смуги затінення:  
 – Послідовна вибірка стовпців і рядків дозволяє коректно відобразити

черговість накриття тінню кожної панелі в масиві.

- Механізм дозволяє використовувати одну базову розрахункову матрицю для різних топологій масиву (4x4, 2x8 чи 1x16), змінюючи лише параметри «вікна» вибірки та крок зсуву рядків.
- Завдяки дискретній зміні кроку вибірки (від 1 до 4 рядків) модель здатна відтворювати різну швидкість зміни зовнішніх умов.

Такий підхід переслідує забезпечення високої достовірності результатів моделювання та дозволяє детально дослідити траєкторію переміщення точки максимальної потужності за складних умов експлуатації.

### **3.2.4. Розробка математичної моделі фотоелектричного масиву з врахуванням руху смуги затінення**

В основі моделювання лежить необхідність чисельного розв'язання системи диференціально-алгебраїчних рівнянь, що описують динамічну поведінку ФЕМ, яка містить нелінійні елементи (ФЕП, байпасні діоди).

Вибір розв'язувача для імітаційного моделювання ФЕМ здійснювався згідно з рекомендаціями розробника середовища MATLAB/Simulink [171], враховуючи наявність швидкоплинних процесів при зміні кроку вибірки радіації.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку ФЕМ, обрано розв'язувач *ode23s* (модифікована формула Розенброка 2-го порядку). Даний вибір зумовлений властивістю "жорсткості" моделі та необхідністю забезпечення високої швидкості обчислень при збереженні стійкості в умовах динамічної зміни кадрів затінення. ФЕМ з МРРТ-контролером має високу жорсткість (Stiffness) - контролер постійно «шукає» точку максимальної потужності, змінюючи напругу, що викликає швидкі перехідні процеси. Використання *ode23s* може бути ефективнішим при симуляції швидкостей 2х, 3х та 4х, оскільки він краще справляється з чисельною стійкістю, коли вхідні дані змінюються більш дискретно (з кроком  $S = 2, 3, 4$ ).

Оскільки відбувається симуляція динамічної тіні, великий крок симуляції може призвести до того, що розв'язувач проскочить момент входу тіні на конкретний

ФЕП. Обмеження кроку  $Max\ Step\ Size = 0.1$  с гарантує:

- Дискретизація руху тіні буде достатньою для коректних розрахунків, не дозволяючи алгоритму робити занадто великі стрибки у часі на ділянках з постійною радіацією.
- Забезпечення високої роздільної здатності при моделюванні руху полоси затінення та отримання достовірних значень енергетичних показників системи.

Система рівнянь, що розв'язується, у просторі станів має загальний вигляд

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t),$$

де:

- $\dot{x}(t)$  - вектор змінних стану, що описують енергетичні та електричні стани системи.
- $u(t)$  - вектор вхідних впливів, який у даному дослідженні є нестационарним:  $u(t) = [G(t), T(t)]$ , де  $G(t)$  — матриця радіації, що змінюється в часі (імітація руху тіні),  $T(t)$  — температура ФЕП.
- $f$  - нелінійна вектор-функція, що визначається топологією електричної схеми (конфігурацією масиву).

Особливістю даної задачі є те, що ФЕП описується трансцендентним рівнянням (однодіодна модель), параметри якого ( $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ) залежать від вхідного вектора  $u(t)$ . Розв'язувач *ode23s* на кожному кроці інтегрування виконує сумісне розв'язання диференціальних рівнянь перехідних процесів та рівнянь балансу потужності ФЕМ.

### ***Розрахунок середньозваженої радіації ФЕМ***

Для кількісної оцінки впливу динамічного затінення на кожному  $k$ -му кроці ітераційного процесу розраховується середньозважена радіація масиву  $G_{step\_mean}$ . Фізично цей показник відображає середню густину потоку сонячного випромінювання, що падає на всю площу масиву в момент часу  $t_k$  і обчислюється як середнє арифметичне всіх елементів матриці поточного кадру затінення. Використання зміщення вікна вибірки пропорційно коефіцієнту швидкості  $v$

дозволяє адекватно моделювати динаміку енергетичних процесів у ФЕС при різних метеорологічних сценаріях. Розрахунок середнього значення радіації по кадру  $G_{step\_mean}$  є критично важливим, оскільки він дозволяє оцінити загальний енергетичний потенціал затіненого масиву в конкретний момент часу.

Математично цей процес (файл *PV\_16\_Degrees\_All.m* Б.8 Додаток Б) можна описати наступним чином: нехай  $G_{full}$  — глобальна матриця радіації для заданого кута  $\theta$ , а  $speed(v)$  — коефіцієнт швидкості руху тіні. Тоді для кожного кроку симуляції  $k$  (де  $k = 1, 2, \dots, PSC$ ) формується кадр радіації  $G_k$  розмірністю  $N_{row} \times N_{col}$ .

Середнє значення радіації для  $k$ -го кроку розраховується за формулою

$$G_{step\_mean}(k) = \frac{1}{N_{row} \cdot N_{col}} \sum_{i=1}^{N_{row}} \sum_{j=1}^{N_{col}} G_k(i, j), \quad (3.8)$$

де значення елементів кадру  $G_k(i, j)$  вибираються з глобальних матриць  $G_{full}(\theta)$  згідно (3.8) (файл *arraySwitchDeg16.m*, Б.9 Додаток Б) з урахуванням зміщення по рядках, що залежить від швидкості

$$G_k(i, j) = G_{full}(i + k \cdot v, j).$$

### ***Розрахунок напруги холостого ходу та струму короткого замикання ФЕ масиву***

У розробленому алгоритмі значення напруги холостого ходу ( $U_{OC\_array}$ ) та струму короткого замикання ( $I_{SC\_array}$ ) не є статичними величинами. Вони розраховуються ітераційно для кожного  $k$ -го кадру динамічного затінення згідно (3.9) і (3.10) ( $k = 1, \dots, PSC$ ) (файл *OutputDataPlot.m*, Б.10 Додаток Б).

На кожному кроці симуляції  $k$  значення струму короткого замикання всього масиву визначається як максимальний струм, що генерується при нульовому опорі навантаження

$$I_{SC\_array}(k) = \max(I_k), \quad (3.9)$$

де  $I_k$  — вектор миттєвих значень струму масиву, отриманий при симуляції  $k$ -го стану затінення. Фізично це значення відповідає точці перетину  $I - U$

характеристики з віссю ординат.

Напруга холостого ходу масиву для кожного кроку  $k$  визначається як максимальна напруга, яку здатна згенерувати обрана конфігурація при розірваному колі (нульовому струмі)

$$U_{OC\_array}(k) = \max(U_k), \quad (3.10)$$

де  $U_k$  — вектор миттєвих значень напруги масиву для  $k$ -го кроку. Ця величина враховує логарифмічну залежність напруги від рівня радіації та температурний вплив на напівпровідникові переходи ФЕМ. Фізично це значення відповідає точці перетину  $I - U$  характеристики з віссю абсцис.

Шляхом знаходження максимальних значень векторів напруги та струму на кожному кроці  $k$ , досягається висока адаптивність розрахунку енергетичних показників до будь-якої складної форми ВАХ, викликаній нерівномірним динамічним затіненням.

В алгоритмі ці параметри забезпечують узгоджене порівняння енергетичних характеристик і визначають допустимі межі симуляції. Ці значення визначають границі осей на графіках  $P(U)$  та  $I(U)$ .

### ***Розрахунок неузгоджених втрат потужності***

Неузгоджені втрати потужності  $\Delta P_L$  (Mismatch Losses) характеризують втрати, що виникають через нерівномірний розподіл радіації, що призводить до різних робочих точок окремих ФЕМ. У конфігураціях з послідовним або змішаним з'єднанням це спричиняє:

- появу локальних максимумів на  $P - U$  характеристиці,
- активацію байпасних діодів,
- зниження загальної потужності ФЕМ,
- збільшення дисбалансу по струмам та напругам.

У динамічних умовах (рух тіні від хмар, дерев, інфраструктурних об'єктів) величина  $\Delta P_L$  змінюється в часі та може досягати 30 – 60 % залежно від топології масиву (Рис. 3.19).

Математично це нормалізована різниця між потенційно можливою потужністю (якщо кожна ФЕП працювала би у своїй індивідуальній GMPP) та реальною потужністю всього масиву згідно (3.11) (файл *OutputDataPlot.m*, Б.10 Додаток Б).

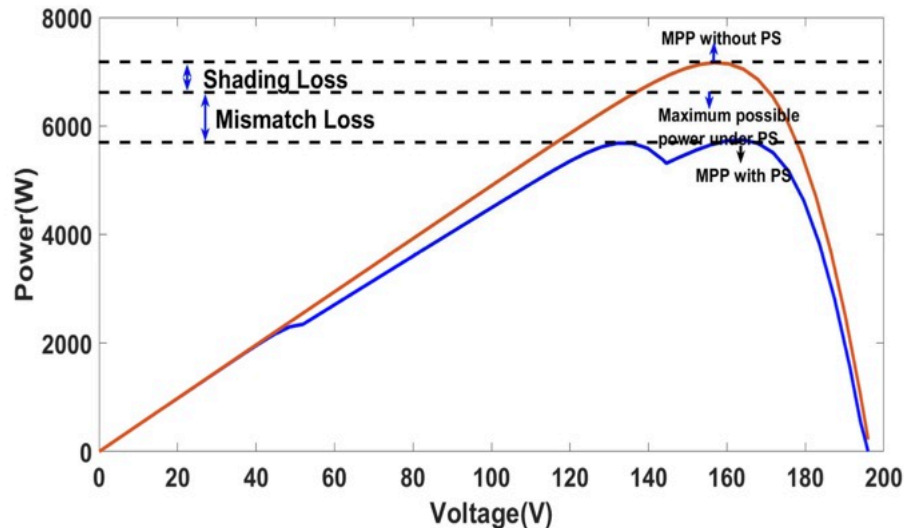


Рис. 3.19 Різні типи втрат при частковому затіненні [172]

Для кожного кроку  $k$  розрахунок проводиться за формулою

$$\Delta P_L(k) = \left( 1 - \frac{P_{gmpp}(k)}{\sum_{i=1}^{N_{row}} \sum_{j=1}^{N_{col}} P_{mpp\_ideal}(i,j,k)} \right) \cdot 100\%, \quad (3.11)$$

де:

- $P_{gmpp}(k)$  - реальна потужність у GMPP масиву, отримана в Simulink.
- $P_{mpp\_ideal}(i, j, k)$  - максимальна потужність окремої  $(i, j)$ -ї ФЕП за поточної радіації  $G_k(i, j)$ , яку він міг би видати за відсутності впливу сусідніх ФЕП.
- $N_{row}$  - геометрична кількість ФЕП в рядку ФЕМ.
- $N_{col}$  - геометрична кількість ФЕП в стовпці ФЕМ.

#### **Розрахунок фактору заповнення**

Фактор заповнення ( $FF$ ) математично описує ступінь спотворення  $I - U$  характеристики масиву під впливом затінення. Фактор заповнення характеризує якість  $I - U$  характеристики та ступінь наближення її форми до ідеального прямокутника (Рис. 3.20). Під впливом затінення  $FF$  зменшується через:

- зсув робочої точки,

- появу «ступінчастої» форми  $I - U$  кривої,
- збільшення послідовного опору,
- активацію байпасних діодів.

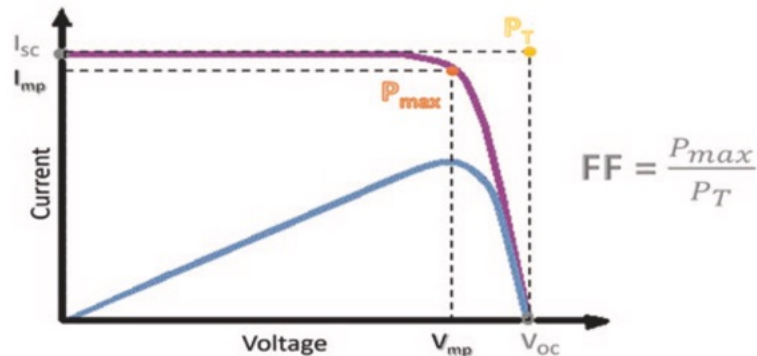


Рис. 3.20 Коефіцієнт заповнення сонячного елемента [173]

Для кожного кроку симуляції  $k$  (кожного положення тіні)  $FF$  розраховується як відношення реальної максимальної потужності до добутку напруги холостого ходу та струму короткого замикання всього масиву згідно (3.12), (3.19), (3.20) (файл *OutputDataPlot.m*, Б.10 Додаток Б).

Коефіцієнт заповнення для кроку  $k$

$$FF(k) = \frac{P_{GMPP}(k)}{U_{OC\_array}(k) \cdot I_{SC\_array}(k)} \cdot 100, \quad (3.12)$$

де:

- $P_{GMPP}(k)$  - розрахована потужність у GMPP.
- $U_{OC\_array}(k)$  - напруга холостого ходу всього масиву при поточному розподілі тіні.
- $I_{SC\_array}(k)$  - струм короткого замикання масиву при поточному розподілі тіні.

### **Розрахунок ефективності системи**

Ефективність системи  $\eta$  (ККД) фізично дозволяє оцінити, наскільки ефективно обрана конфігурація конвертує доступну енергію в умовах затінення. У динамічних умовах ефективність знижується через:

- неузгоджені втрати,
- втрати MPPT (невихід на GMPP),
- втрати в топології масиву,

- активацію байпасних діодів.

Математично ефективність є інтегральним критерієм оцінки якості конфігурації масиву і розраховується на кожному кроці  $k$  як відношення генерованої електричної потужності до сумарної потужності сонячного випромінювання, що падає на всю площу масиву згідно (3.13) (файл *OutputDataPlot.m*, Б.10 Додаток Б)

$$\eta(k) = \frac{P_{GMPP}(k)}{G_{step\_mean}(k) \cdot A_{total}} \cdot 100, \quad (3.13)$$

де:

- $G_{step\_mean}(k)$  - середня радіація по кадрі (Вт/м<sup>2</sup>).
- $A_{total} = N_{total} \cdot A_{module}$  - загальна площа ФЕМ (м<sup>2</sup>).
- $A_{module} = w_{module} \cdot h_{module}$  - загальна площа ФЕП (м<sup>2</sup>).

### **Розрахунок нормованого розмаху напруги ШІМ**

Нормований розмах напруги ШІМ ( $\delta U_{pwm}$ ) - це один із ключових показників, що характеризує стабільність роботи інвертора. Нормування використовується відносно сумарної напруги холостого ходу послідовно з'єднаних ФЕП для забезпечення порівнюваності різних масивів. Фізично цей показник демонструє "амплітуду стрибків" робочої напруги. Чим менший  $\delta U_{norm}$ , тим стабільнішим є режим роботи вхідних кіл інвертора, що прямо впливає на його ККД, надійність та термін служби.

Математично спочатку визначається миттєве значення напруги в GMPP ( $U_{gmpp}$ ) для кожного кроку  $k$ . Після завершення всього циклу проходження тіні для певного кута обчислюється розмах згідно (3.14) і (3.15) (файл *OutputDataPlot.m* Б.10 Додаток Б)

$$\Delta U_{pwm} = \max(U_{gmpp}(k)) - \min(U_{gmpp}(k)). \quad (3.14)$$

Нормований розмах

$$\delta U_{norm} = \frac{\Delta U_{pwm}}{N_s \cdot U_{oc\_STC}} \cdot 100\%, \quad (3.15)$$

де:

- $N_s$  - кількість ФЕП, з'єднаних послідовно в одну струну.

–  $U_{oc\_STC}$  - напруга холостого ходу ФЕП за STC (файл *PV\_Panel.m*, Б.6 Додаток Б).

### ***Розрахунок усереднених значень***

Всі вищезазначені показники розраховуються ітераційно для кожного положення смуги тіні. У фінальній таблиці Excel вони потрапляють у вигляді усереднених значень для всього циклу згідно (3.16) - (3.18) (файл *exportExcel.m*, Б.13 Додаток Б)

$$Avg \Delta P_L = \frac{1}{PSC} \sum_{k=1}^{PSC} \Delta P_L(k), \quad (3.16)$$

$$Avg FF = \frac{1}{PSC} \sum_{k=1}^{PSC} FF(k), \quad (3.17)$$

$$Avg \eta = \frac{1}{PSC} \sum_{k=1}^{PSC} \eta(k), \quad (3.18)$$

де  $PSC$  - кількість розрахованих кадрів з матриці радіації для завантаження в моделі ФЕМ.

Така багатоступенева узагальнена обробка дозволяє об'єктивно порівняти різні конфігурації, доводячи перевагу в абсолютних і відносних одиницях.

### ***Температурна корекція напруги холостого ходу і струму короткого замикання***

Математична модель алгоритму побудована з урахуванням температурних умов напівпровідникових структур. Використання температурних коефіцієнтів  $K_v$  та  $K_i$  (файл *PV\_Panel.m*, Б.6 Додаток Б) дозволяє адаптувати результати симуляції для різних кліматичних зон. Симуляції проведено при  $T = 30^\circ C$ , що відповідає типовому режиму роботи ФЕС в літній період, проте архітектура коду передбачає можливість динамічного введення температурного профілю  $T(t)$  разом із профілем затінення  $G(t)$ . Зміна температурних режимів безпосередньо впливає на  $U_{oc}$  та  $I_{sc}$  кожного ФЕП, що, у свою чергу, змінює  $FF$  та  $\eta$  всього масиву.

Температурна корекція  $U_{oc}$  - напруга ФЕП є найбільш чутливою до температури і зменшується із зростанням  $T$ , що описується формулою

$$U_{oc}(T, G) = U_{oc\_STC} + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) + K_v \cdot (T - T_{STC}). \quad (3.19)$$

Температурна корекція  $I_{SC}$  - струм ФЕП незначно зростає при підвищенні температури

$$I_{SC}(T, G) = I_{SC\_STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot (1 + K_i \cdot (T - T_{STC})). \quad (3.20)$$

### *Алгоритм моделювання*

Розроблений алгоритм автоматизованого дослідження енергетичної ефективності ФЕМ реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink. Процес складається з семи послідовних етапів (Рис. 3.21):

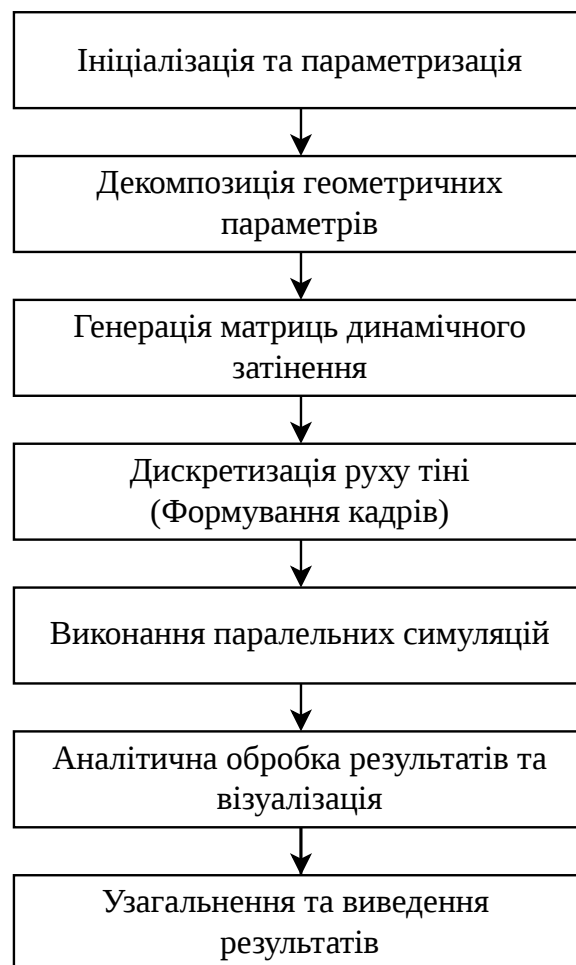


Рис. 3.21 Алгоритм автоматизованого дослідження енергетичної ефективності ФЕ масивів

Опис алгоритму автоматизованого дослідження енергетичної ефективності ФЕ масивів:

1. Ініціалізація та параметризація. На початку роботи завантажуються фізичні константи та електротехнічні параметри обраного типу ФЕП (файл

*PV\_Panel.m*, Б.6 Додаток Б). Формується список моделей (*modellList*), що підлягають дослідженню, та масив кутів орієнтації тіні (*degList*).

2. Декомпозиція геометричних параметрів. Для кожної ітерації алгоритм автоматично розпізнає конфігурацію масиву з назви файлу моделі (наприклад, *PV\_6S\_4P\_3\_3x8*) за допомогою регулярних виразів. Визначаються висота  $H_{geom} = 3$  ширина  $W_{geom} = 8$ , кількість послідовних ( $S = 6$ ) та паралельних ( $P = 4$ ) з'єднань.
3. Генерація матриць динамічного затінення. На основі обраного кута (з масиву *degList*) та геометрії масиву формується глобальна карта затінення (*Gfull*). Використовується скрипт (файл *arraySwitchDeg16.m*, Б.9 Додаток Б), який містить попередньо розраховані шаблони проходження тіні для різних кутів. Матриці адаптуються під розмір конкретного масиву шляхом "зрізання" зайвих рядків/стовпців і використання гаусівського згладжування.
4. Дискретизація руху тіні (Формування кадрів). Рух тіні моделюється як послідовність статичних кадрів. Для кожної швидкості руху тіні (від 1х до 4х) розраховується кількість кроків симуляції (*PSC*).
  - Великий масив *Gfull* розбивається на підмасиви *G* розміром  $N_{row} \times N_{col}$ .
  - Кожен наступний кадр формується зміщенням вікна вибірки на визначену кількість рядків (*speed*).
5. Виконання паралельних симуляцій. Для кожного кадру (кроку *PSC*) створюється об'єкт *Simulink.SimulationInput*. Замість послідовного запуску, масив вхідних даних передається у функцію *parsim*, що дозволяє розраховувати перехідні процеси для різних положень тіні одночасно на різних ядрах процесора.
6. Аналітична обробка результатів та візуалізація. Отримані дані (об'єкт *out*) обробляються скриптом (файл *OutputDataPlot.m*, Б.10 Додаток Б):
  - Фільтруються шуми та перехідні процеси запуску.
  - Визначаються локальні та глобальні максимуми потужності ( $P_{GMPP}$ ).
  - Будується графік сімейства  $P(U)$  для всього проходу тіні.
  - На графік наноситься траєкторія руху точки GMPP (з'єднання точок

чорною штриховою лінією).

7. Узагальнення та виведення результатів. Обчислюються інтегральні характеристики ефективності з експортом підсумкових даних у формат Excel (файл *dataPSC\_16.xlsx*) для порівняльного аналізу: ККД ( $\eta$ ), фактор заповнення ( $FF$ ), неузгоджені втрати ( $\Delta P_L$ ), максимальний розмах робочої напруги ( $\Delta U_{PWM}$ ).

Програмний комплекс реалізовано за модульним принципом, де головний керуючий скрипт (файл *PV\_16\_Degrees\_All.m*, Б.8 Додаток Б) виступає диспетчером завдань. Ключовою особливістю програмного коду є повна відсутність необхідності ручного втручання в налаштування моделей Simulink при зміні конфігурації. Блок  $G$  у моделі Simulink параметризований змінною робочого простору, яка оновлюється скриптом перед кожним запуском розв'язувача.

Спеціалізований модуль (файл *ArrayRGB.m*, Б.12 Додаток Б) генерує контрастні кольори для кожної кривої на графіку, що дозволяє візуально розділити десятки станів затінення на одній діаграмі. Скрипт візуалізації автоматично масштабує осі та додає цифрові мітки (1, 2, 3...), які відповідають номеру кадру проходження тіні, що дозволяє відстежити часову динаміку "блукання" точки MPPT.

Використання структур даних *table* у MATLAB та функції *writetable* забезпечує збереження не лише числових значень, а й метаданих (назва конфігурації, кут), що спрощує подальшу статистичну обробку.

У симуляціях використано функцію паралельної симуляції *parsim* замість класичного циклу *for*, де наступна симуляція починається тільки після завершення попередньої. Функція *parsim* розподіляє об'єкти симуляції між доступними "воркерами" (ядрами процесора), створюючи ізольовані сесії Simulink для кожного розрахунку (файл *ParSimDegAll.m*, Б.11 Додаток Б).

Переваги методу:

- Швидкодія - час моделювання проходження полоси затінення зменшується пропорційно кількості ядер процесора (у 2 – 4 – 6 разів), що є критичним при великій кількості ітерацій (6 кутів  $\times$  4 швидкості  $\times$  14 моделей  $\approx$  336 циклів моделювання, кожен з яких має сотні підкроків).

- Ізольованість - помилка або збій в одній симуляції не зупиняє весь процес симуляції, оскільки *parsim* продовжує виконання інших завдань.

Недоліки методу:

- Витрати оперативної пам'яті - кожен паралельний процес потребує завантаження власної копії моделі Simulink у пам'ять.
- Накладні витрати часу - ініціалізація паралельного пулу (*parpool*) займає певний час, тому для дуже коротких симуляцій послідовний метод може бути швидшим.

Обраний підхід до моделювання є обґрунтованим з наступних причин:

- При дослідженні електричної сумісності та режимів роботи інверторів розрахунок розмаху напруги ШІМ  $dU_{PWM}$  дозволяє оцінити вимоги до вхідного діапазону МРРТ-контролерів інверторів. Великі перепади напруги при динамічному затіненні, виявлені в ході симуляцій, вказують на ризики виходу робочої точки за межі регулювання, що є прямою задачею проєктування надійної енергосистеми.
- Для оцінки енергетичної ефективності в реальних умовах стандартних методик, які не враховують перехідних процесів при нерівномірній радіації, недостатньо. Застосування динамічних шаблонів затінення дозволяє отримати інтегральну оцінку втрат потужності ( $\Delta P_L$ ) та ефективності ( $\eta$ ), що відповідає реальним умовам експлуатації СЕС, на відміну від статичних розрахунків.
- При аналізі стійкості систем керування, використання жорсткого розв'язувача *ode23s* для моделювання зв'язки "ФЕ масив – перетворювач", дозволяє дослідити поведінку системи при різких збуреннях. Це дає можливість розробляти алгоритми керування навантаженням, які базуються не на ідеалізованих, а на найгірших сценаріях генерації.

### **3.2.5. Оцінка впливу напрямку та швидкості руху смуги для вибраних конфігурацій**

Розглянуто можливість чотирикратного варіювання швидкості руху смуги затінення через зміну кроку вибірки кадрів із кратністю  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$  рядків.

Розглянута симуляція проходження полоси затінення через три конфігурації ФЕМ: 16S-1P\_1 (1×16), 8S-2P\_4 (2×8) і 8S-2P\_7 (4×4) з кутами смуги затінення до фронту масиву  $45^\circ$  і  $0^\circ$  на швидкостях  $1x...4x$ . На рис. Б3 Додатку Б показано приклад повних змодельованих вихідних характеристик  $P(U)$  ФЕМ конфігурації 8S-2P\_1 (2×8).

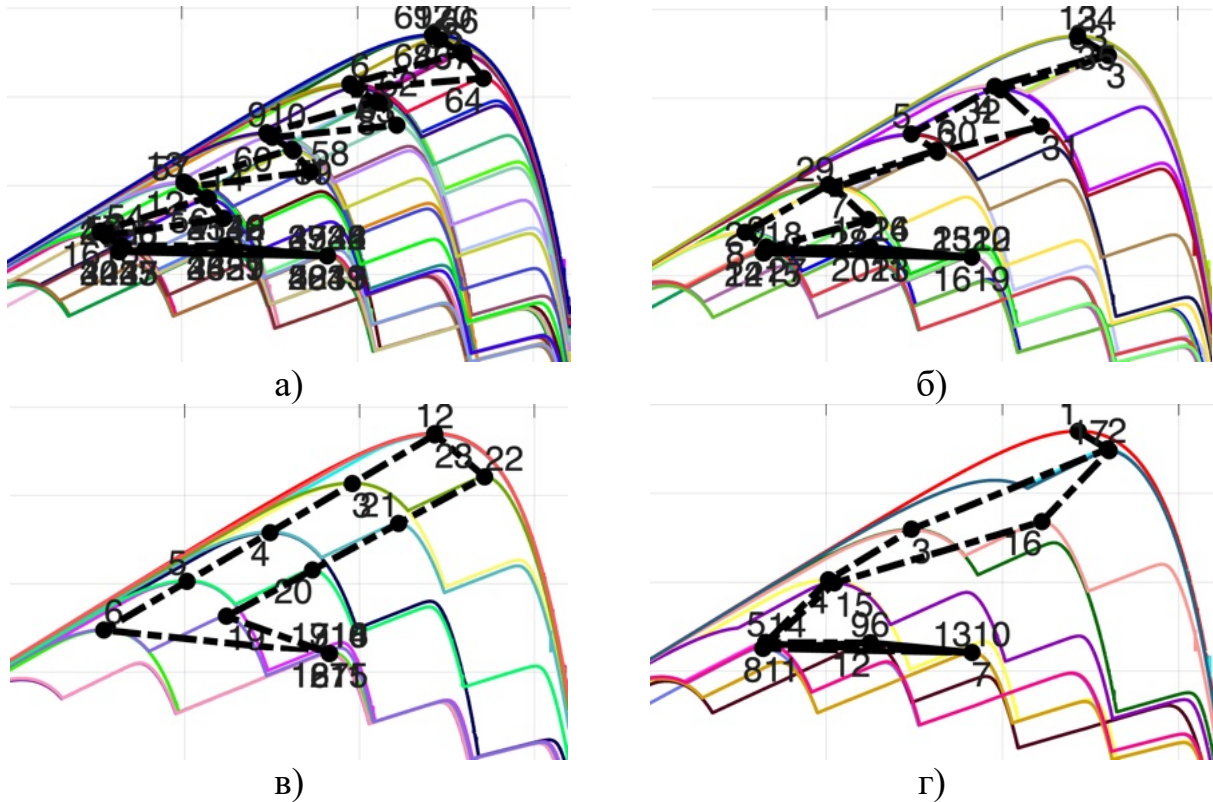


Рис. 3.22 Криві  $P(U)$  і траєкторія GMPP для ФЕМ з конфігурацією 16S-1P\_1 (1x16), напрям руху смуги затінення  $45^\circ$  зі швидкістю: а)  $1x$ , б)  $2x$ , в)  $3x$ , г)  $4x$

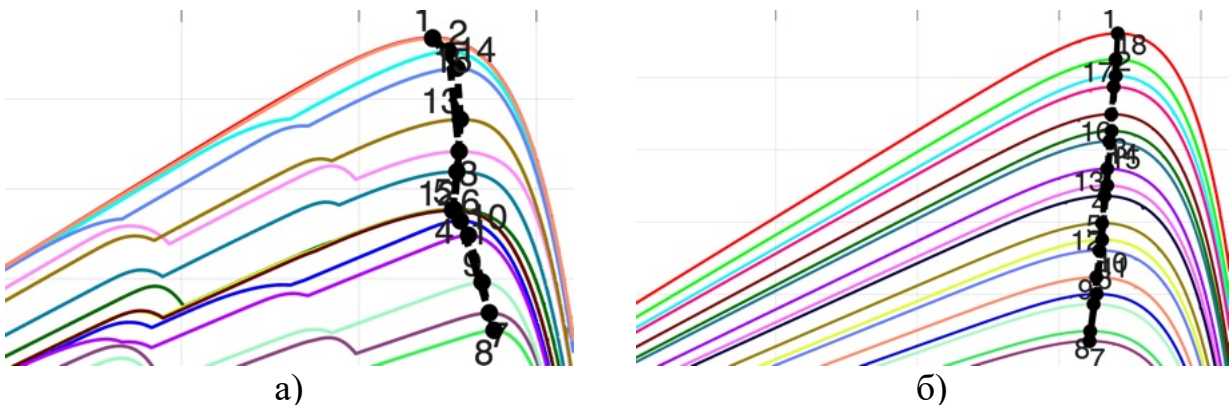


Рис. 3.23 Криві  $P(U)$  і траєкторія GMPP для ФЕМ з конфігураціями: а) 8S-2P\_4 (2x8), кут  $45^\circ$ , швидкість  $3x$ , б) 8S-2P\_7 (4x4), кут  $0^\circ$ , швидкість  $4x$ .

У подальшому на рисунках наведено результати, що включають лише ключові

ділянки кривих  $P(U)$  та траєкторії руху GMPP. З метою порівняння траєкторій GMPP на Рис. 3.22 показані повні результати симуляцій на швидкостях  $1x...4x$  з кутом  $45^\circ$  в конфігурації 16S-1P\_1 ( $1 \times 16$ ). Для конфігурацій 8S-2P\_4 ( $2 \times 8$ ) і 8S-2P\_7 ( $4 \times 4$ ) наведені криві з кутами смуги затінення  $45^\circ$  і  $0^\circ$  на швидкостях  $3x$  і  $4x$  відповідно (Рис. 3.23).

Результати симуляцій зведені в Таблиця 3.3.

Таблиця 3.3 Результати усередненої генерації для різних швидкостей і напрямів руху смуги затінення для трьох конфігурацій

Напрямок руху	Швидкість руху	Конфігурація								
		16S-1P_1 (16x1)			8S-2P_4 (8x2)			8S-2P_7 (4x4)		
		$P_{CPn}$ (Вт)	$\Delta P_{CPn}$ (Вт)	$\delta P_{CPn}$ (%)	$P_{CPn}$ (Вт)	$\Delta P_{CPn}$ (Вт)	$\delta P_{CPn}$ (%)	$P_{CPn}$ (Вт)	$\Delta P_{CPn}$ (Вт)	$\delta P_{CPn}$ (%)
$45^\circ$	1	6981	0	0,0	7137	0	0,0	6480	0	0,0
	2	6980	-1	0,0	7103	-34	-0,5	6407	-73	-1,1
	3	6934	-47	-0,7	7137	0	0,0	6401	-79	-1,2
	4	6924	-57	-0,8	7091	-46	-0,6	6272	-208	-3,3
$0^\circ$	1	6552	0	0,0	6502	0	0,0	6443	0	0,0
	2	6552	0	0,0	6473	-29	-0,4	6414	-29	-0,5
	3	6523	-29	-0,4	6501	-1	0,0	6415	-28	-0,4
	4	6553	1	0,0	6419	-83	-1,3	6416	-27	-0,4

Найвища середня потужність 7137 Вт спостерігається для 8S-2P\_4 при  $45^\circ$ , найнижча 6443 Вт — для 8S-2P\_7 при  $0^\circ$ . Це вказує, що конфігурація з паралельними гілками ( $2 \times 8$ ) при певному куті дає вищу усереднену генерацію.

Для однієї конфігурації і одного кута форма траєкторії GMPP при різних швидкостях залишається структурно подібною: основні «гілки» і локальні екстремуми  $P(U)$  зберігаються, змінюється лише щільність точок і «шум» траєкторії через дискретну вибірку кадрів (Рис. 3.22).

Простіші траєкторії GMPP спостерігаються при куті  $0^\circ$  (Рис. 3.23 б) і для конфігурацій з більшим числом паралельних гілок (Рис. 3.23 а). Особливо це помітно в ФЕМ  $4 \times 4$ , де рух смуги паралельно рядами дає більш однорідне затінення. Найскладніші траєкторії GMPP присутні при куті  $45^\circ$  послідовної конфігурації

(1×16) на Рис. 3.22 - часті локальні максимуми і мінімуми через часткове затінення окремих ФЕП. При більшому куті (45°) тінь перетинає рядки/стовпці під різними кутами, створюючи складніші нерівномірності освітлення по підмасивах і це породжує багато LMPP на кривих  $P(U)$  і складні траєкторії GMPP. При 0° затінення «ковзає» вздовж рядків, вплив на кожну гілку більш синхронний — траєкторія простіша.

### ***Незалежність усередненої генерації від швидкості руху полоси затінення***

Більшість відносних змін середньої генерованої потужності  $\delta P_{CP,n}$  лежать у межах  $\pm 0.5\%$  (малий вплив швидкості). Наприклад, для 16S-1P\_1 при 45°  $\delta \leq 0.8\%$  (максимум  $-0.8\%$ ), при 0°  $\delta \leq 0.4\%$ . Для 8S-2P\_4 і 8S-2P\_7 також переважно  $\delta$  в межах  $\pm 0.5\%$ , за винятком кількох випадків (наприклад, 8S-2P\_7 при 45°, 4x:  $-3.3\%$ ). Середнє відхилення по більшості комбінацій невелике (порядку часток відсотка), отже швидкість руху смуги затінення не змінює істотно усереднену потужність. Якщо б швидкість мала суттєвий вплив на середню потужність, то спостерігались би систематичні великі зміни середньої генерованої потужності  $P_{CP,n}$  при переході від 1x до 4x для всіх конфігурацій. Натомість зміни випадкові, невеликі і локалізовані, викликані дискретністю вибірки та обмеженою довжиною траєкторії.

Фізично миттєва потужність ФЕМ визначається лише розподілом радіації та нелінійною характеристикою ФЕ елемента. В ФЕП відсутні реактивні накопичувачі енергії, які б викликали фазову або часову залежність від швидкості руху тіні. Тому при усередненні по траєкторії швидкість руху не вводить додаткового середнього зсуву потужності - змінюється лише миттєвий розподіл, але не його середнє за повний прохід.

Отже  $P_{CP,n}$  практично не залежить від швидкості руху полоси затінення, а відмінності в результатах симуляції пояснюються дискретністю вибірки і кінцевою довжиною масиву радіацій:

- Імітація швидкості через збільшення кроку вибірки призводить до втрати траєкторій, коли при великих кроках деякі положення смуги не враховуються, що дає похибку в сумарній інтегральній генерації.
- Обмеження довжини масиву затінення для довгих ФЕМ (4×4) при великих

кроках приводить до зменшення кількості розрахованих кривих, що підвищує нестабільність середнього.

Для подальших розрахунків по кутах ( $76^\circ, 63^\circ, 45^\circ, 27^\circ, 14^\circ, 0^\circ$ ) достатньо використовувати швидкість  $2x$  - вона дає компроміс між точністю (наближення до  $1x$ ) і зменшенням обчислювального навантаження, що підтверджується невеликими відхиленнями  $\delta$  при  $2x$  в табл.3.3.

### **Моделювання конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП**

Далі представлено узагальнений аналіз результатів моделювання різних геометричних конфігурацій ФЕМ (рис.3.1) з однаковою кількістю елементів (16 ФЕП) та їх зіставлення. Оцінювання здійснюється на основі усереднених значень параметрів у процесі проходження смуги затінення, використовуючи дані та графічні матеріали симуляцій. Основна мета полягає у виявленні конфігурацій, що забезпечують найкращий компроміс між сумарною генерацією, мінімізацією втрат, стабільністю точки MPPT та високим фактором заповнення. Результати симуляцій зведені в Таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 Усереднені параметри ФЕМ за час проходження полоси затінення

Конфігурація ФЕМ			Параметри ФЕМ					
Елект-рично	Геомет-рично	Назва	$P_{GMPP}$ (Вт)	$\Delta P_L$ (%)	$FF$ (%)	$\eta$ (%)	$\Delta U_{PWM}$ (В)	$\delta U_{PWMp}$ (%)
1x16 (1P-16S)	1x16	16S_1P_1_1x16	6744	22,6	67,8	21,3	325	39,6
	2x8	16S_1P_2_2x8	6410	26,3	66,2	21,5	396	48,3
		16S_1P_3_2x8	6467	25,6	66,2	21,5	326	39,7
	4x4	16S_1P_4_4x4	6354	24,8	68,6	22,4	201	24,5
		16S_1P_5_4x4	6354	24,8	68,6	22,4	201	24,5
2x8 (2P-8S)	2x8	8S_2P_1_2x8	6495	25,1	66,8	21,6	159	38,8
		8S_2P_2_2x8	7013	19,3	74,7	23,4	19	4,6
		8S_2P_3_2x8	7013	19,3	74,7	23,4	19	4,6
		8S_2P_4_2x8	7013	19,3	74,7	23,4	19	4,6
	4x4	8S_2P_5_4x4	6379	24,5	69,5	22,5	101	24,7
		8S_2P_6_4x4	6411	25,3	70,6	22,7	106	25,8
		8S_2P_7_4x4	6411	25,3	70,6	22,7	106	25,8

Діаграми сумарної генерації ФЕМ досліджуваних конфігурацій за час проходження полоси затінення показані на Рис. 3.24.

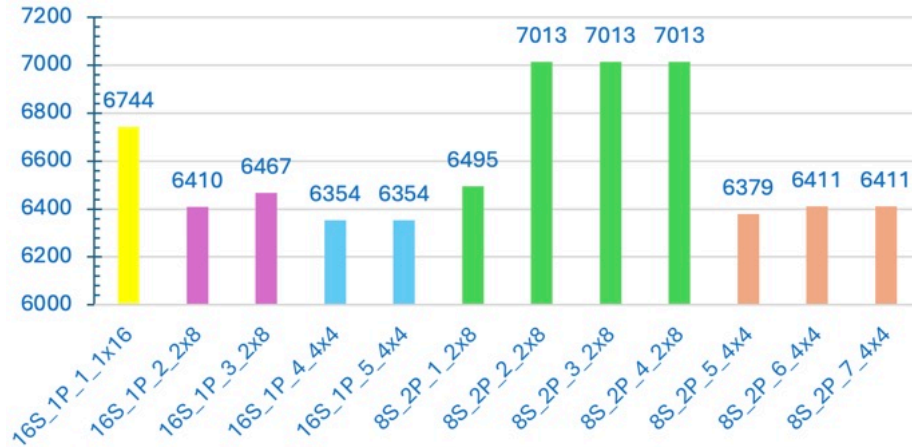


Рис. 3.24 Сумарна генерація  $P_{GMPP}$  (Вт) ФЕМ за час проходження полоси затінення

Для порівняння конфігурацій вибрано шість ключових параметрів:

- $P_{GMPP}$  (Вт) — чим більше, тим краще;
- $\Delta P_L$  (%) — чим менше, тим краще;
- $FF$  (%) — чим більше, тим краще;
- $\eta$  (%) — чим більше, тим краще;
- $\Delta U_{PWM}$  (В) — чим менше, тим краще;
- $\delta U_{PWM_p}$  (%) — чим менше, тим краще.

Нормалізація отриманих результатів моделювання наведена в Додатку Б.4. Після нормалізації кожна конфігурація отримала сумарний бал для оцінки найкращої і найгіршої, що візуалізовано діаграмою на Рис. 3.25.

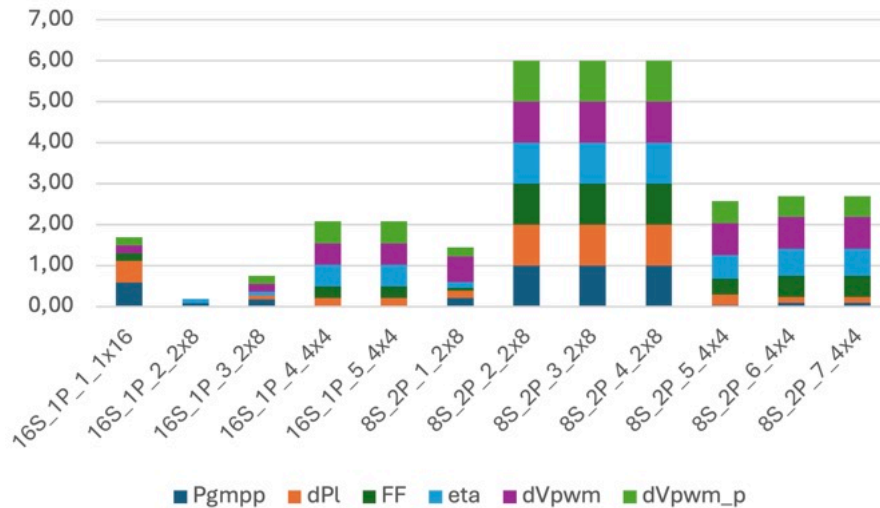


Рис. 3.25 Нормалізовані параметри ФЕМ

### 3.2.6. Визначення рекомендованих типів конфігурацій в умовах часткового затінення

Результати нормалізації та порівняльного аналізу дозволяють виділити групу найбільш ефективних топологій, до якої увійшли конфігурації PV\_8S\_2P\_2\_2x8, PV\_8S\_2P\_3\_2x8 та PV\_8S\_2P\_4\_2x8. Дані рішення продемонстрували ідентичні високі показники, що свідчить про їхню стійкість до умов динамічного затінення в межах обраної геометричної сітки 2x8:

- Максимальна генерація ( $P_{GMPP}$ ): досягає значення 7013 Вт, що є абсолютним максимумом у досліджуваній вибірці.
- Рівень неузгоджених втрат ( $\Delta P_L$ ) становить лише 19,3 %, що на 7 % менше, ніж у найгірших варіантів.
- Коефіцієнт заповнення ( $FF$ ) зафіксовано на рівні 74,7 %, що вказує на високу якість вольт-амперної характеристики (ВАХ).
- Амплітуда коливань робочої точки МРРТ-контролера ( $\Delta U_{PWM}$ ) становить лише 19 В. Відносне відхилення напруги ( $\delta U_{PWM}$ ) на рівні 4,6 % мінімізує динамічне навантаження на силові ключі інвертора та підвищує загальний ККД перетворення.

Найменш придатними для практичного застосування в умовах PSC визначено конфігурації PV\_16S\_1P\_2\_2x8, PV\_16S\_1P\_3\_2x8 та PV\_8S\_2P\_1\_2x8. Особливо критичні показники зафіксовано у топології 16S\_1P\_2\_2x8:

- Зниження генерації до 6410 Вт, що призводить до недоотримання понад 600 Вт потужності порівняно з оптимальними схемами.
- Показник втрати енергії сягає максимуму у 26,3 %.
- Зафіксовано екстремальний діапазон коливань робочої точки — 396 В, що відповідає 48,3 % від напруги холостого ходу. Така нестабільність створює ризик виходу МРРТ-алгоритму з режиму відстеження глобального максимуму та спричиняє прискорений знос конденсаторів вхідного фільтра інвертора.

Оптимальним вибором для ФЕМ є послідовно-паралельна конфігурація типу 8S-2P (2x8). Вона забезпечує максимальну пристосованість до переміщення смуг затінення та стабільну вихідну напругу. При виборі топології слід орієнтуватися на

показник  $\delta U_{P_{WMP}}$ , який не повинен перевищувати 5 – 7 %. Це гарантує роботу інвертора в межах його номінального ККД без перегріву елементної бази. Рекомендується уникати використання конфігурацій з трьома і більше паралельними стрінгами (3Р і вище). Це обґрунтовано зростанням омичних втрат і перегрівом кабельних ліній та контактних з'єднань. Окрім того більшість сучасних стрінгових та гібридних інверторів мають жорстке обмеження за максимальним струмом на один МРРТ-вхід (зазвичай 12 – 28 А). Використання 3-х паралельних ланцюгів сучасних потужних ФЕП призведе до перевищення цього порогу, активації режиму обмеження потужності або аварійного вимкнення обладнання. У конфігураціях з великою кількістю паралельних гілок значно складніше ідентифікувати вихід з ладу або зниження ефективності окремого модуля без встановлення поблочних систем моніторингу.

Отже за обраного значення потужності ФЕС з 16 ФЕП в якості рекомендованих можна обрати конфігурації з двох рядків: 8S-2P\_2\_2x8, 8S-2P\_3\_2x8, 8S-2P\_4\_2x8 (рис. 3.1, г, е, ж). За цього паралельно з'єднані гілки містять по 8 ФЕП з двох рядків.

Таким чином, загальною рекомендацією є використання 2 паралельних рядків з обмеженням кількості послідовних ФЕП в рядку не більше 4 для гілки.

### **3.3. Визначення рекомендованих конфігурацій масиву за різної кількості фотоелектричних панелей**

#### **3.3.1. Визначення загальних рекомендацій для конфігурацій масиву з різною кількістю фотоелектричних панелей та діапазон потужності фотоелектричних станцій, для якого це можливо.**

В залежності від геометричної конфігурації ФЕМ, максимальної ФЕ потужності, обмеження по вхідній напрузі і струму інвертора, кількість ФЕП відрізняється. В разі складання масиву з обмеженням до двох ФЕП на рядок в гілці розроблені конфігурації з 2 і 3 рядків, показані на Рис. 3.26:

- три дворядні послідовні: а) 2x4, б) 2x5, в) 2x6;
- сім дворядних послідовно-паралельних: г) 2x4, д) 2x5, е) 2x6, є) 2x7, ж) 2x8, з) 2x9, и) 2x10;

– три трирядні послідовно-паралельні: і) 3x4, к) 3x6, л) 3x8.

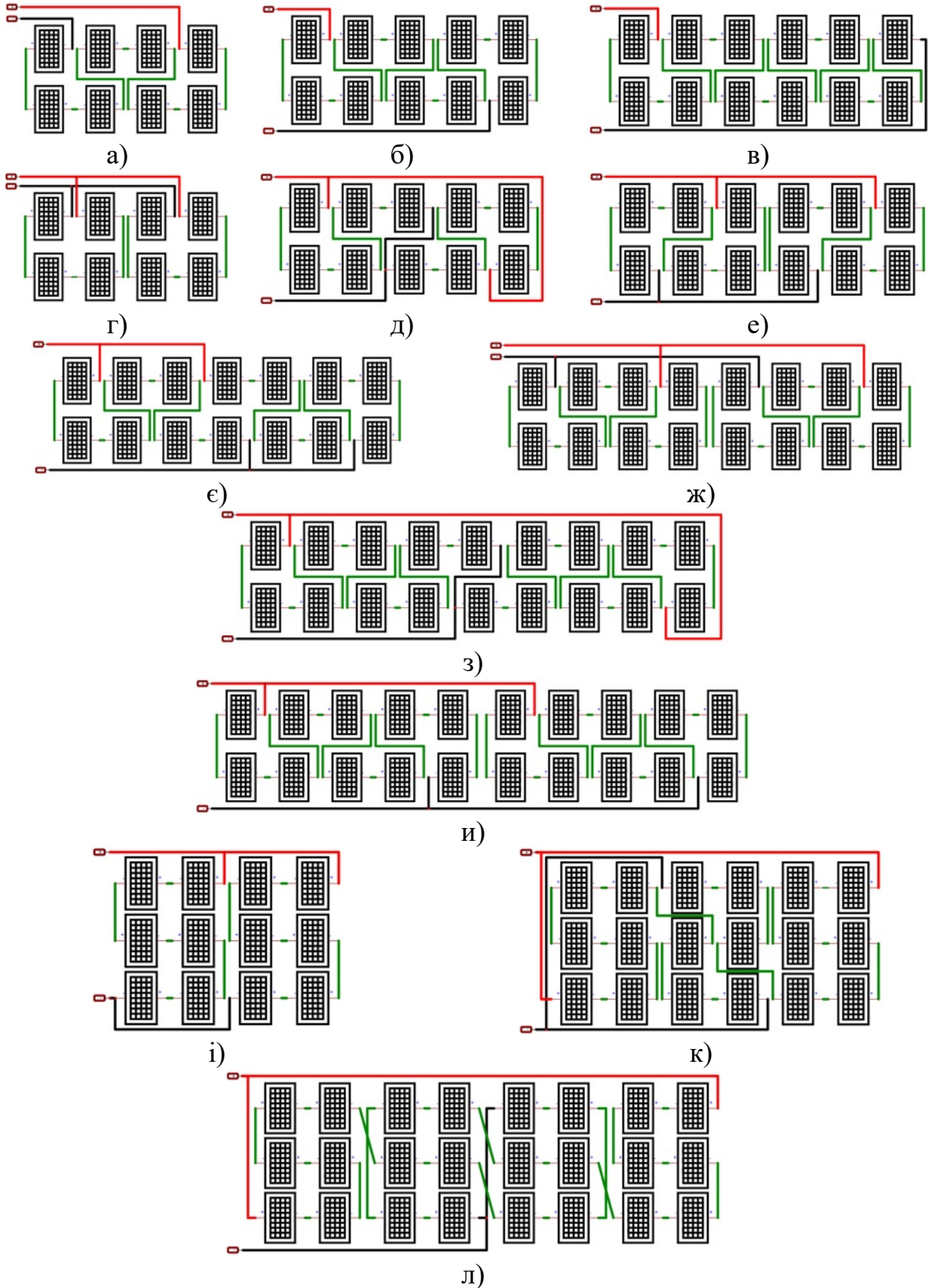


Рис. 3.26 Конфігурації масивів ФЕП: є) PV\_7S\_2P\_2x7, ж) PV\_8S\_2P\_2x8, з) PV\_9S\_2P\_2x9, и) PV\_10S\_2P\_2x10, і) PV\_6S\_2P\_3x4, к) PV\_9S\_2P\_3x6, л) PV\_12S\_2P\_3x8

Результати симуляцій порівняні з класичними послідовно-паралельними конфігураціями PV\_4S\_2P\_C\_2x4, PV\_5S\_2P\_C\_2x5, PV\_6S\_2P\_C\_2x6, PV\_7S\_2P\_C\_2x7, PV\_8S\_2P\_C\_2x8, PV\_8S\_2P\_C\_4x4, PV\_9S\_2P\_C\_2x9, PV\_10S\_2P\_C\_2x10, PV\_12S\_2P\_C\_2x12.

### 3.3.2. Моделювання та оцінка показників

Результати моделювання розглянутих конфігурацій підтверджують забезпечення придатного характеру траєкторії руху GMPP для всіх кутів руху смуги затінення  $0^\circ, \pm 14^\circ, \pm 27^\circ, \pm 45^\circ, \pm 63^\circ, \pm 76^\circ$ , що підтверджено моделюванням запропонованих конфігурацій з інвертованою на  $180^\circ$  матрицею затінення.

На Рис. 3.27 наведені траєкторії руху GMPP для кута  $76^\circ$  для класичних (зліва) і розроблених (справа) конфігурацій: 6S-2P (2x6) (а, б), 8S-2P (2x8) (в, г), 9S-2P (2x9) (д), (3x6) (е), 12S-2P (2x12) (є), (3x8) (ж).

Аналіз траєкторій руху GMPP на Рис. 3.27 демонструє суттєву перевагу розроблених конфігурацій над класичними варіантами. У класичних схемах траєкторія характеризується хаотичними та широкими стрибками між LMPP, що змушує MPPT-контролер працювати в екстремально широкому діапазоні напруг. Натомість у розроблених структурах спостерігається чітка вертикальна стабілізація точок максимуму, що мінімізує «блукання» робочої точки по осі напруги та дозволяє системі залишатися в зоні високої ефективності протягом усього часу затінення.

Для конфігурацій малої та середньої потужності, таких як 6S-2P (2x6) та 8S-2P (2x8), розроблені схеми забезпечують якісне вирівнювання траєкторії. Візуально це проявляється у зближенні точок GMPP у вузький вертикальний коридор, що забезпечує мінімальний робочий діапазон MPPT-контролера при переміщенні смуги затінення через ФЕМ.

В ФЕМ середньої потужності з різною геометрією (9S-2P класична 2x9 та розроблена 3x6) також помітне покращення динаміки руху робочої точки. Розроблені конфігурації демонструють значно меншу амплітуду коливань напруги. Траєкторія стає більш передбачуваною та зосередженою в зоні вищих напруг, що безпосередньо знижує навантаження на MPPT-контролер та підвищує загальну швидкість

відстеження максимуму енергії.

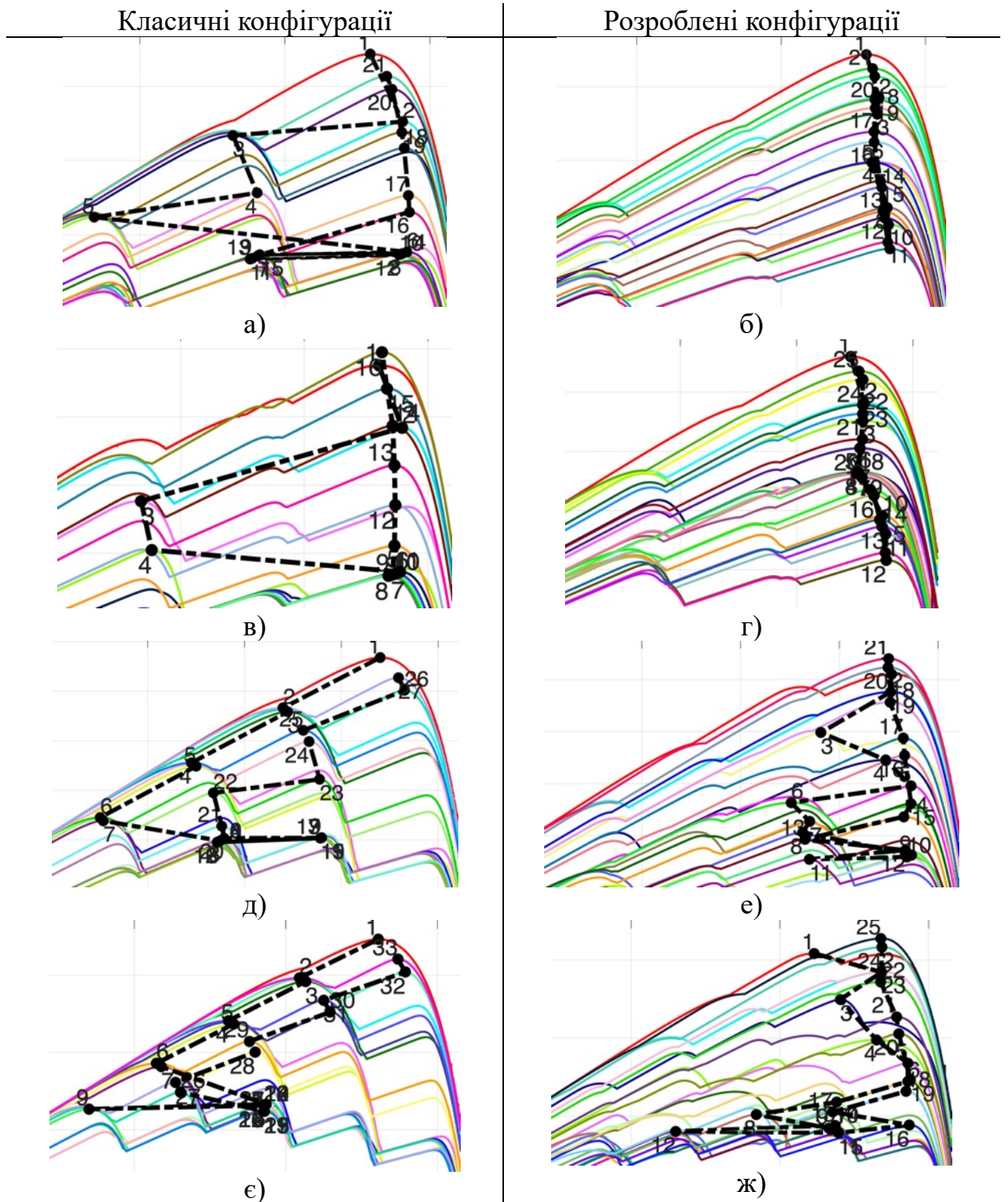


Рис. 3.27 Криві  $P(U)$  і траєкторії руху GMPP для кута  $76^\circ$  класичних і розроблених конфігурацій: 6S-2P (2x6) (а, б), 8S-2P (2x8) (в, г), 9S-2P (2x9) (д), (3x6) (е), 12S-2P (2x12) (е), (3x8) (ж)

Для систем високої потужності 9S-2P і 12S-2P візуалізація підтверджує значну перевагу нової конфігурації, особливо при невеликих та середніх рівнях затінення. Хоча при глибокому затіненні може спостерігатися незначне відхилення, загальний робочий діапазон напруг МРРТ-контролера залишається значно кращим, ніж у класичного аналога. Це дозволяє підтримувати високу середню ефективність генерації енергії навіть у складних погодних умовах.

### 3.3.3. Аналіз результатів моделювання та загальні рекомендації щодо конфігурацій фотоелектричних масивів

У цьому розділі подано систематизований аналіз результатів моделювання розроблених геометричних конфігурацій ФЕМ та їх порівняння з класичними послідовно-паралельними схемами. Аналіз базується на усереднених значеннях параметрів під час проходження полоси затінення і опирається на дані та графіки симуляцій. Метою є визначення конфігурацій, які забезпечують оптимальний баланс сумарної генерації, мінімізації неузгоджених втрат, стабільності робочої точки МРРТ та високого фактора заповнення.

Детальний опис усереднених параметрів ФЕМ (Таблиця 3.5) і аналіз моделювання наведено в Додатку Б.5. Усі конфігурації оцінювалися за набором усереднених і максимальних параметрів:

- Усереднена генерація,  $P$  (стовпчик 4).
- Відносне збільшення генерації ФЕМ  $\delta_P$  відносно відповідної класичної конфігурації (стовпчик 5).
- Зміни неузгоджених втрат потужності ФЕМ  $\delta_{P_L}$ , (стовпчик 7).
- Зміни фактора заповнення ФЕМ  $\delta_{FF}$  (стовпчик 9).
- Зміни ефективності ФЕМ  $\delta_\eta$  (стовпчик 11).
- Амплітуда відхилень робочої точки МРРТ (різниця максимальної і мінімальної)  $\Delta_U$  (стовпчик 12)
- Відносна амплітуда відхилень робочої точки МРРТ  $\frac{\Delta_U}{U_{OC}}$  (стовпчик 14).

На Рис. 3.28 показані відносні (по відношенню до відповідного параметра класичної конфігурації) усереднені дані по генерації (стовпчик 5), неузгодженим

втратам потужності (стовпчик 7), фактору заповнення (стовпчик 9) і ефективності (стовпчик 11) ФЕМ по всім розробленим конфігураціям ФЕМ з обмеженням до двох ФЕП на рядок в гілці, для всіх кутів полоси затінення відносно фронту масиву, за весь час проходження. Базові класичні послідовно-паралельні конфігурації не відмічені кольором (значення 0,0 на графіку).

Таблиця 3.5 Усереднені параметри ФЕМ за час проходження полоси затінення

Конфігурація ФЕМ			Параметри ФЕМ										
			Усереднені								Максимальні		
Електрично	Геометрично	Назва	Генерація		Неузгоджені втрати потужності		Фактор заповнення		Ефективність		Робоча точка МРРТ (max-min)		
			$P$ , Вт	$\delta_P$ , %	$\Delta_{PL}$ , %	$\delta_{PL}$ , %	$\Delta_{FF}$ , %	$\delta_{FF}$ , %	$\eta$ , %	$\delta_\eta$ , %	$\Delta_U$ , В	$\delta_U$ , В, %	$\frac{\Delta_U}{V_{oc}}$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1P-8S	2x4	PV_8S_1P_2x4	3269	-0,2	24,8	-2,1	71,7	-1,2	22,9	-0,4	106	-107,8	25,9
2P-4S		PV_4S_2P_2x4	3496	6,7	19,4	20,2	79,8	9,9	24,2	5,2	6	88,2	2,7
		PV_4S_2P_C_2x4	3277	0,0	24,3	0,0	72,6	0,0	23,0	0,0	51	0,0	25
1P-10S	2x5	PV_10S_1P_2x5	4086	-0,3	24,8	-2,1	68,6	-1,2	22,3	-0,4	117	-105,3	22,7
2P-5S		PV_5S_2P_2x5	4328	5,6	20,2	16,9	75,7	9,1	23,7	5,8	52	8,8	20,4
		PV_5S_2P_C_2x5	4097	0,0	24,3	0,0	69,4	0,0	22,4	0,0	57	0,0	22,3
1P-12S	2x6	PV_12S_1P_2x6	4860	-0,4	25,5	-2,0	68,0	-1,0	22,0	-0,9	218	-100,0	35,5
		PV_6S_2P_2x6	5219	7,0	19,8	20,8	75,2	9,5	23,6	6,3	11	89,9	3,4
2P-6S	3x4	PV_6S_2P_3x4	5161	5,8	18,8	24,8	78,4	14,1	24,1	8,6	9	91,7	2,8
	2x6	PV_6S_2P_C_2x6	4879	0,0	25,0	0,0	68,7	0,0	22,2	0,0	109	0,0	35,3
2P-7S	2x7	PV_7S_2P_2x7	6072	6,4	20,1	19,0	72,9	9,1	23,1	6,5	60	45,5	16,8
		PV_7S_2P_C_2x7	5708	0,0	24,8	0,0	66,8	0,0	21,7	0,0	110	0,0	30,7
2P-8S	2x8	PV_8S_2P_2x8	7013	8,0	19,3	23,1	74,7	11,8	23,4	8,3	19	88,1	4,6
		PV_8S_2P_C_2x8	6495	0,0	25,1	0,0	66,8	0,0	21,6	0,0	159	0,0	38,8
	4x4	PV_8S_2P_C_4x4	6411	-1,3	25,3	-0,8	70,6	5,7	22,7	5,1	106	33,3	25,8
2P-9S	2x9	PV_9S_2P_2x9	7848	7,0	19,7	20,9	72,3	9,9	23,0	8,0	64	60,5	13,8
	3x6	PV_9S_2P_3x6	7509	2,4	21,1	15,3	72,2	9,7	23,0	8,0	62	61,7	13,3
	2x9	PV_9S_2P_C_2x9	7336	0,0	24,9	0,0	65,8	0,0	21,3	0,0	162	0,0	35,2
2P-10S	2x10	PV_10S_2P_2x10	8715	7,1	19,8	20,8	72,1	9,6	22,9	8,0	111	33,1	21,5
		PV_10S_2P_C_2x10	8140	0,0	25,0	0,0	65,8	0,0	21,2	0,0	166	0,0	32,3
2P-12S	3x8	PV_12S_2P_3x8	9835	-0,2	23,1	5,3	68,7	4,7	22,0	4,8	159	25,7	25,8
	2x12	PV_12S_2P_C_2x12	9858	0,0	24,4	0,0	65,6	0,0	21,0	0,0	214	0,0	34,8

Розроблені конфігурації з обмеженням до двох ФЕП на рядок демонструють покращення енергетичних характеристик по відношенню до класичних еталонів:

- Збільшення генерації (стовпчик 5) у більшості розроблених схем;
- Зменшення неузгоджених втрат (стовпчик 7) - у середньому помітне зниження;

- Підвищення фактора заповнення (стовпчик 9) і ефективності (стовпчик 11).  
Загальні рекомендації для проектування масивів:
- Для максимізації генерації при затіненні віддавати перевагу розробленим дворядним конфігураціям (2x8...2x10) або трирядним (3x4, 3x6), які забезпечують помітне підвищення усередненої генерації та покращують фактор заповнення і ефективність (стовпчики 4, 5, 9, 11).
- Для мінімізації флуктуацій МРРТ обирати конфігурації з найменшими абсолютними та відносними амплітудами - оптимізовані дво- і трирядні варіанти, для великих масивів розглянути 12S-2P(3x8) як компроміс між потужністю і стабільністю (стовпчики 12–13).
- Уникати послідовних ланцюгів у середовищах з високою ймовірністю локального затінення - вони показують зниження генерації і не дають переваг по стабільності МРРТ.
- При проектуванні великих масивів враховувати, що збільшення площі підвищує сумарну потужність, але також посилює вплив полоси затінення, оптимізація геометрії розподілом по рядках/стовпчиках дозволяє зменшити неузгоджені втрати і амплітуду МРРТ.

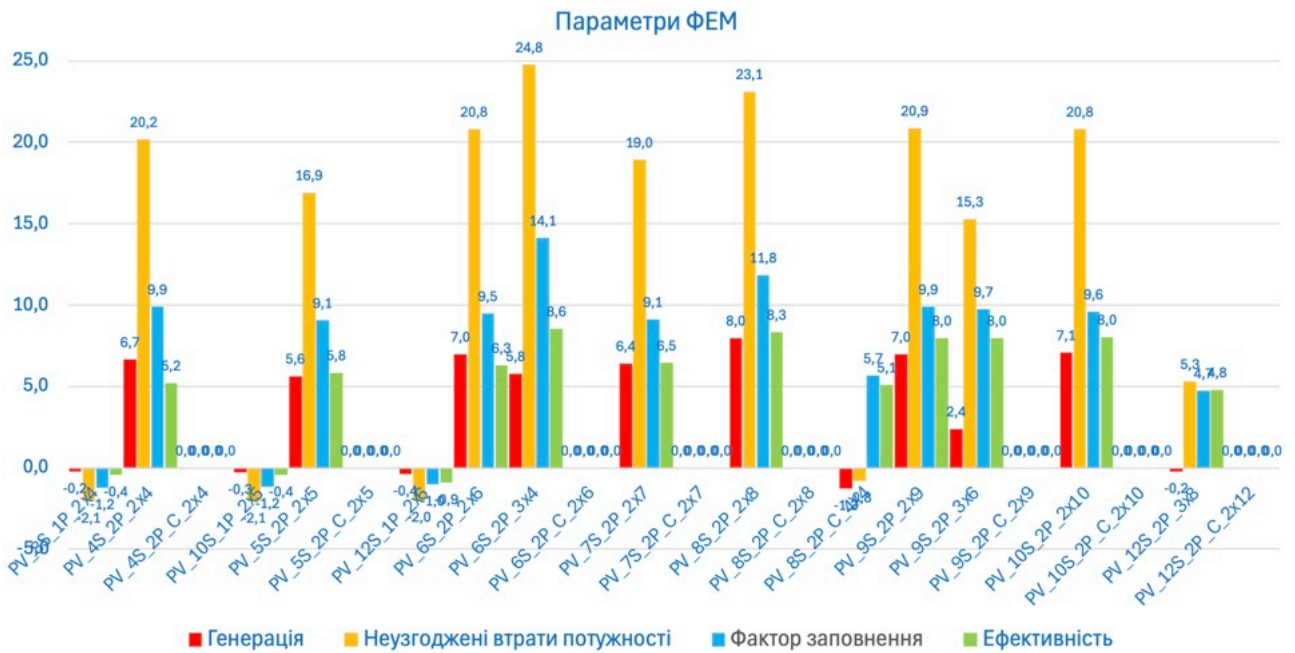


Рис. 3.28 Відносні усереднені значення за час проходження полоси затінення, %

Можливість підвищення енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву для ФЕС локального об'єкта досягається:

- за рахунок врахування переважних напрямів вітру і, відповідно, напрямів руху смуги затінення для конкретного розташування ФЕС;
- використання послідовно-паралельних конфігурацій ФЕП, що найменш критичні к напрямку руху смуги затінення без зниження енергетичної продуктивності (Таблиця 3.5 Усереднені параметри ФЕМ за час проходження полоси затінення);
- використання рекомендованих дворядних конфігурацій з обмеженням кількості ФЕП до 4 на рядок в гілці. Ці конфігурації за траєкторією руху GMPP (Рис. 3.26) не мають ускладнень, діапазон роботи ШІМ МРРТ невеликий і можуть відстежуватись найпростішими алгоритмами МРРТ.

Оцінювання виконано за однакових умов для конфігурацій з кількістю ФЕП 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, що складені за отриманих рекомендацій. В разі використання ФЕП з максимальною потужністю 655 Вт (радіація  $W_{STC} = 1000 \text{Вт/м}^2$ ) це дає можливість узагальнити отримані результати для різних потужностей ФЕС 3 – 10 кВт (реальний діапазон потужностей ФЕМ з врахуванням кліматичних особливостей Київського регіону з радіацією  $W_{MAX} < 860 \text{Вт/м}^2$ ), що є достатніми для приватних домогосподарств та інших малих об'єктів.

Використання запропонованої моделі з урахуванням смуги затінення дозволить оцінювати ефективність рішень щодо конфігурації масиву ФЕП при проектуванні ФЕС та для вдосконалення МРРТ. За цього вдосконалення моделі з розширенням її функціональності є подальшим продовженням роботи.

### **3.4. Висновки до розділу 3.**

1. Обґрунтовано методику динамічного моделювання, що враховує кліматичні особливості Київського регіону (хмарність 25 – 35 %, західний та північний вітри). Розроблено цифрові шаблони затінення (кути  $0^\circ - 76^\circ$ ) з математичним згладжуванням країв тіні та механізмом покадрового зсуву, що імітує реальний рух хмар.

2. Розроблено математичну модель ФЕМ (до 16 модулів) з автономною адресацією параметрів кожного ФЕП. Впровадження паралельних обчислень на кількох ядрах процесора дозволило пропорційно скоротити час симуляції та забезпечити ізольованість ітерацій при масових розрахунках.
3. Доведено незалежність середньої генерації від швидкості руху затінення (відхилення  $\delta \leq 0,5\%$ ), що дозволяє поширювати результати динамічного моделювання на статичні режими. Для оптимізації обчислень встановлено раціональність використання швидкості 2x.
4. Енергетична ефективність системи покращується від використання базових послідовних конфігурацій (16S-1P) до рекомендованих топологій 8S-2P: генерація зростає з 6410 Вт до 7013 Вт, рівень незгоджених втрат знижується з 26,3 % до 19,3 %, а коефіцієнт заповнення  $I - U$  характеристики підвищується до 74,7 %,.
5. Стабільність роботи інвертора покращується від класичних схем до запропонованих топологій: амплітуда коливань робочої точки MPPT зменшується з 396 В (48,3 %  $U_{OC}$ ) до 19 В (4,6 %  $U_{OC}$ ), що мінімізує навантаження на силові ключі та підвищує ККД перетворення,.
6. Визначено граничні параметри топологій: для мінімізації впливу PSC кількість послідовних ФЕП у рядку не повинна перевищувати чотирьох модулів. Запропоновано сітку дво- та трирядних конфігурацій (від 2x4 до 3x8), які забезпечують приріст генерації на 6,7 – 8,0 % та охоплюють діапазон потужностей 3 – 10 кВт для приватних ФЕС.
7. Відносна стабільність MPPT-контролера покращується від 2,7 % у малих масивах (4S-2P) до 25,8 % у великих трирядних структурах (12S-2P), що підтверджує ефективність обраних рішень для складних умов затінення.

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Апаратна реалізація рішень щодо управління ФЕС пов'язана з дослідженнями роботи системи з реальними пристроями в різних умовах генерації ФЕ за сезонами року та навантаження. Мінімізація витрат матеріальних і часу можлива з використанням експериментальної установки з напівпровідниковим емулятором ФБ. Розглянута структура є базою для реалізації програмно-технічного комплексу управління ФЕС з гібридним інвертором.

### 4.1. Розробка експериментальної установки з програмно технічним комплексом управління

#### 4.1.1. Структура експериментальної установки

Рішення базується на використанні стандартного гібридного інвертору (VSI) Ахіота Energy ISMPPT 3000 (3 кВА) з вбудованим MPPT контролером для підключення ФБ і контролером заряду АКБ [3].

Загальна структура експериментальної установки (ЕУ) (Рис. 4.1) містить ПК, блок програмного керування (БК), набір АКБ (GB) типу RITAR RT12140H напругою 12 В і ємністю  $C_B$  12 А · год, емулятор ФБ (PVE), блок вимірювання (MM) з датчиками струму (CS) та напруги (VS). PVE отримує живлення від мережі DG і підключений до VSI через реле K1, що шляхом відключення на певний час PVE забезпечує можливість регулювання генерації енергії. Елементи, що входять до складу ПТК на Рис. 4.1 виділені кольором.

Навантаження (LE) ЕУ складається з п'яти ламп розжарювання (L1-L5) різної потужності з індивідуальним підключенням (блок реле (K1-K5)). Програмне перемикання комбінацій ламп дозволяє сформувати необхідний графік зміни потужності навантаження у часі. Всі функції програмного керування здійснює БК з ПК. БК містить низку контролерів, що реалізовані на MCU Arduino. Їхнє програмування згідно заданим умовам здійснюється через ПК. За цього реалізуються наступні функції:

- формування залежності в часі для сонячної радіації  $G(t)$  і температури повітря

$t_{ai}(t)$ , згідно яким визначається генерація PVE;

- формування графіку потужності навантаження  $P_H(t)$ ;
- отримання та обробка даних вимірювань;
- керування режимом роботи: нормальний автономний з живленням навантаження ЛО від ІН; живлення навантаження від РМ з одночасним зарядом АКБ від РМ і ФБ; аварійний автономний у разі відсутності напруги в РМ;
- керування реле К6 з можливістю відключення PVE від ІН (зазвичай це функція передається програмно-апаратному засобу, що досліджується);
- імітація роботи метеосайту з використанням Wi-Fi модуля, що формує стандартний файл метеопрогнозу з визначеними даними для програмно-апаратних засобів, які використовують в роботі звернення до метеосайту для визначення рекомендацій щодо графіка навантаження.

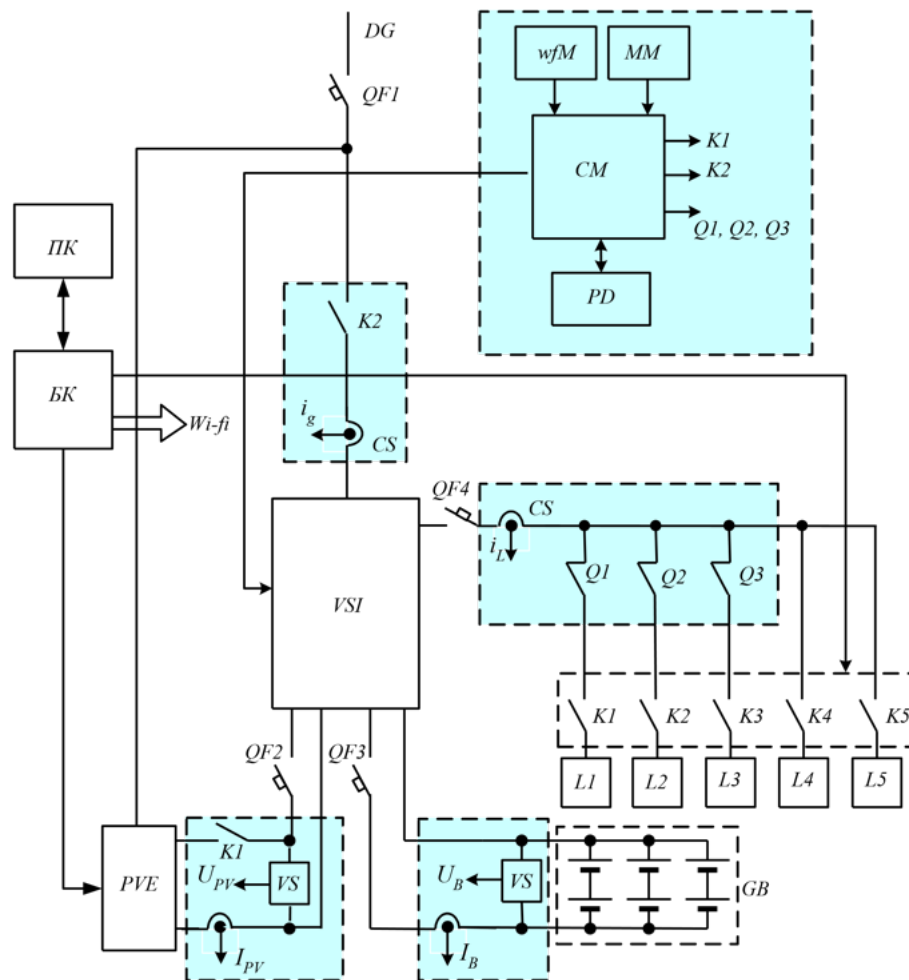


Рис. 4.1 Структура експериментальної установки

Зовнішній вигляд експериментального стенду показаний на Рис. 4.2.

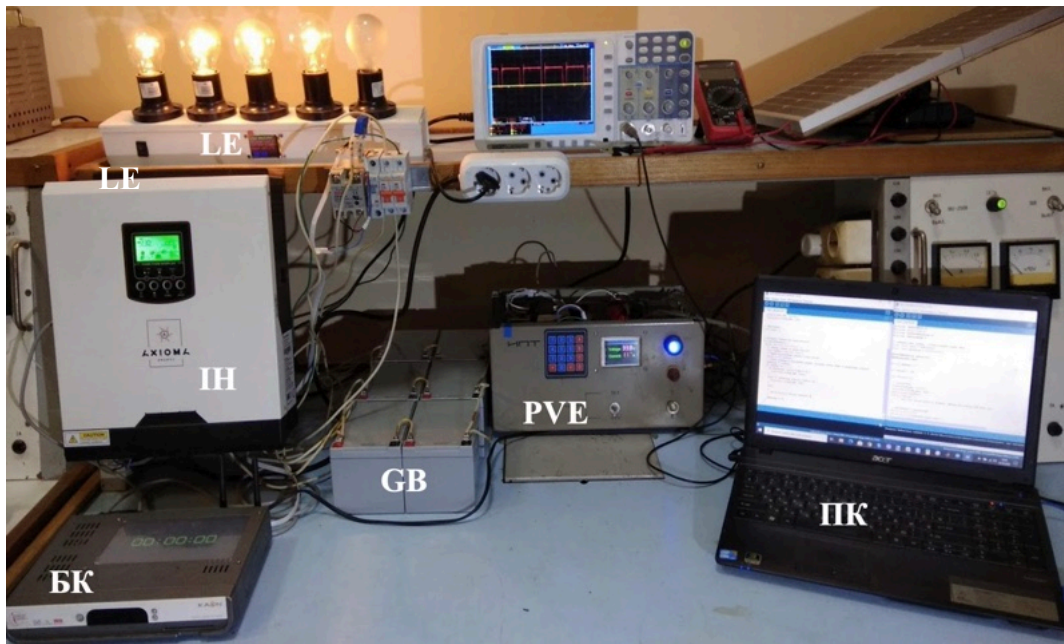


Рис. 4.2 Зовнішній вигляд експериментальної установки

### *Емулятор фотоелектричної батареї*

Розроблений для стенду PVE є перетворювачем постійної напруги, що забезпечує характеристики  $I(U)$  аналогічні реальній фотоелектричній панелі (Рис. 4.3).

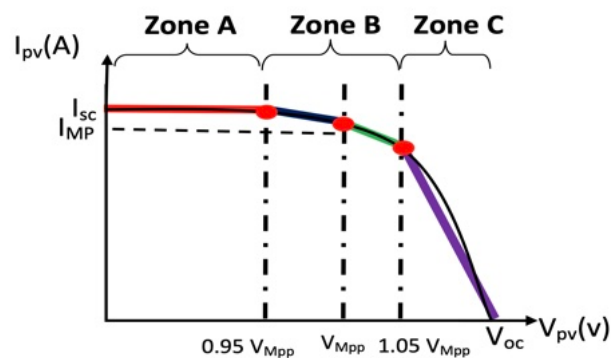


Рис. 4.3 ВАХ фотоелектричної панелі

На Рис. 4.4 представлена структура емулятора ФБ, який складається з силового кола і системи управління [174]. Алгоритм цифрового управління (В.11 Додаток В) реалізований на платі розробника MCU Arduino Mega 2560. Його вихідними параметрами є вихідна напруга  $U_{PV_{emul}}$  і струм  $I_{PV_{emul}}$ .

Система управління включає в себе два контури управління: внутрішній контур струму, який генерує сигнали широтної-імпульсної модуляції (ШІМ) для перемикання силових транзисторів; зовнішній контур управління напругою, що

використовує метод лінеаризації (розкладання ВАХ на чотири лінійних інтервали) для моделювання кривої  $I(U)$  сонячної панелі (Рис. 4.3). У кожному інтервалі поточне завдання регулюється рівнянням. Алгоритм реалізований з можливістю коригування кривої відповідно до змін температури і освітленості. Основне завдання емулятора полягає в тому, щоб відтворити ВАХ реального модуля фотоелектричної панелі [175].

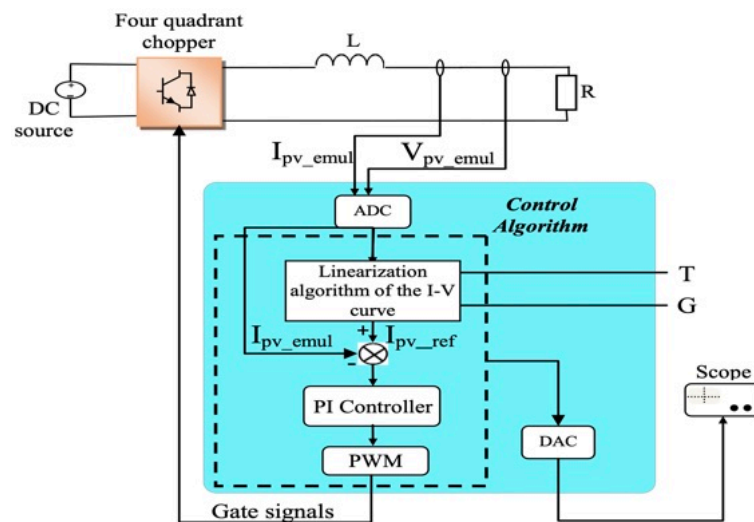


Рис. 4.4 Структура емулятора

Контур струму включає в себе ПІ-регулятор, який регулює  $I_{PV_{emul}}$  відповідно до його опорного значення, обчисленого в контурі напруги. Контур напруги вимагає два алгоритми: алгоритм впливу  $T$  і  $G$  і алгоритм лінеаризації кривої  $I(U)$ , щоб управляти  $U_{PV_{emul}}$  і оцінювати поточний еталонний  $I_{PV_{ref}}$ . Блок-схема циклу наведена на Рис. 4.5

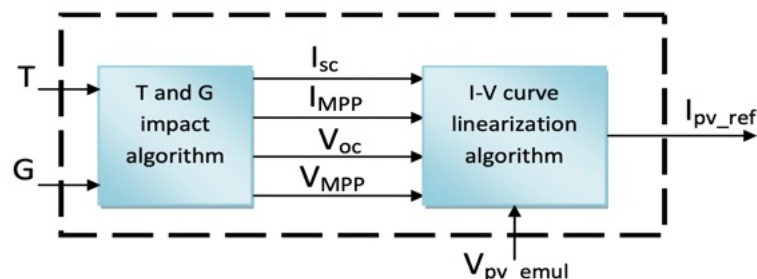


Рис. 4.5 Блок-схема контуру напруги

Алгоритм впливу  $T$  і  $G$  обчислює параметри  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $U_{MPP}$  і  $I_{MPP}$  в залежності від  $T$ ,  $G$ ,  $T_{STC}$ ,  $G_{STC}$  і параметрів ФЕП. Ці параметри розраховуються за рівняннями,

наведеними в [175]. Алгоритм лінеаризації кривої  $I(U)$  заснований на принципі її сегментації, показаної на Рис. 4.3. Цей алгоритм розглядає криву  $I(U)$  як чотири лінійних інтервали:

- два лінійні із зон А ( $[0 \dots 0,95U_{MPP}]$ ) і С ( $[1,05U_{MPP} \dots U_{OC}]$ );
- нелінійна зона В, характеризується нелінійною кривою, тому вона розкладена на два лінійних сегмента ( $[0,95U_{MPP} \dots U_{MPP}]$  і  $[U_{MPP} \dots 1,05U_{MPP}]$ ).

У кожному інтервалі крива ВАХ апроксимується сегментом, який обчислює поточний еталон струму  $I_{PV,ref}$  [175].

У відповідності до зазначеного вище підходу була розроблена принципова електрична схема емулятора сонячної батареї (PVE), яка наведена на рис. В.1, В.2 Додатку В. Здійснено макетування емулятора фотоелектричної батареї та його експериментальна перевірка для довільної робочої точки.

Управління роботою PVE реалізовано за допомогою багатоступінчастого меню, що виводиться на TFT дисплей. Вибір пунктів меню здійснюється за допомогою енкодеру (рис. В.3, Додаток В). Величина максимальної потужності емулятора, що передається в ІН, становить близько 500 Вт. Зовнішній і внутрішній вигляд PVE наведено на рис. В.4, Додаток В.

### ***Імітатор навантаження***

Імітатор навантаження (В.5 Додаток В) призначений для використання в якості масштабної моделі навантаження для перевірки алгоритмів роботи ПТК [176]. Імітатор підключається безпосередньо на вихід інвертора. Навантажувальний струм задається підключеними до п'яти окремих ліній навантаження лампами розжарювання або ж іншими потужними споживачами струму і може змінюватися в межах від 0 до 10 А, що становить еквівалентно 2,5 кВт споживаної потужності.

На передній панелі імітатора навантаження є TFT дисплей з діагоналлю 1.8" з роздільною здатністю 128x160 dpi, на якому відображаються результати поточних вимірювань:

- величини діючої напруги мережі живлення, В;
- величини діючого струму, що протікає через навантаження, А;
- потужності, споживаної навантаженням, Вт;

– режиму роботи імітатора.

Імітатор працює в двох режимах:

1. Автоматичний циклічний режим, коли задається погодинний графік споживаної потужності на локальному об'єкті за добу (Рис. 4.6) з масштабуванням часу. Один канал навантаження включений завжди, що відповідає невеликому споживанню електроенергії у нічний час. Інші канали вмикаються або вимикаються у відповідний час. Години та хвилини часу у масштабі відображаються на дисплеї.
2. Режим підключення навантаження на вимогу. За необхідності зміни навантаження сонячного інвертора через радіомережу в неліцензованому діапазоні радіохвиль 2,4 ГГц за допомогою радіомодулю nRF24L01 надходить команда від управляючого мікроконтролера на підключення або відключення каналу з навантаженням.

Hours №	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
always	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0								1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1										1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
2											1	1	1	1			1	1	1	1				
3													1	1			1	1						
$\Sigma 2^A$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	7	7	15	15	3	3	15	15	7	7	3	1	1	0

Рис. 4.6 Приклад завдання графіку навантаження

#### 4.1.2. Дослідження програмно-технічного комплексу на експериментальному стенді

*Масштабування параметрів ФЕС.* Згідно даним Європейської геоінформаційної бази даних PVGIS [146] для ФБ з номінальною потужністю  $P_{PVНОМ} = 500$  Вт для ясного дня червня в Києві максимальне значення потужності, що генерується ФБ о 12-й годині, становить  $P_{PVМАХ} = 384$  Вт (табл. 1), відносне значення  $P_{PVМАХ}^* = 0,768$ . Загальна добова генерація енергії  $W_{PV}$  складає  $3019,2$  Вт · год, середньодобова потужність генерації ФБ  $P_{PVСД} = \frac{W_{PV}}{24} = 125,8$  Вт (відносне значення  $P_{PVСД}^* = \frac{P_{PVСД}}{P_{PVНОМ}} = 0,252$ ), середня за світловий день потужність генерації

ФБ  $P_{PVCDH} = \frac{W_{ФБ}}{12} = 251,6$  Вт (відносне значення  $P_{PVCDH}^* = \frac{P_{PVCDH}}{P_{PVНОМ}} = 0,50$ ).

Максимальна потужність емулятору установки  $P_{PVEМАХ} = 480$  Вт і відносно  $P_{PVМАХ} = 384$  Вт становить  $\frac{P_{PVEМАХ}}{P_{PVМАХ}} = 1,25$ . Це еквівалентно ФБ з потужністю  $P_{PVНОМ} = 625$  Вт, відповідно, значення  $P_{PVBСД} = 157,5$  Вт і  $P_{PVCDH} = 312,5$  Вт.

За ємності АКБ  $C_B = 36$  А · год, напрузі  $U_B = 24$  В і в разі ККД  $\eta_B = 0,9$  її енергоємність  $W_B = U_B \cdot I_B = 24 \cdot 36 = 864$  Вт · год. Для більшості типів гелевих АКБ, що використовуються в ФЕС, без суттєвого зменшення терміну експлуатації припускається ступінь розряду на 30 – 50%, у літій-іонних АКБ – до 80 – 90%. Якщо енергія АКБ використовується для живлення навантаження в години вечірнього піка, коли сонячна генерація відсутня, при розряді на 30% –  $W_{B1} = 0,3W_B \cdot \eta_B = 233$  Вт · год, при розряді на 50% –  $W_{B2} = 0,5W_B \cdot \eta_B = 389$  Вт · год. За тривалості розряду 2 години з урахуванням ККД перетворювача на рівні  $\eta_B = 0,94$  потужність, відповідно,  $P_1 = 110$  Вт і  $P_2 = 183$  Вт.

В разі гелевих АКБ є можливість забезпечувати живлення навантаження ЛО з потужністю PLC на рівні середньодобової генерації ФБ ( $P_{LC} \approx P_{PVCD}$ ) без споживання електроенергії з РМ. В разі використання більш дорогих літій-іонних АКБ потужність можна підвищити, або зменшити ємність і, відповідно, вартість.

Отже, в даному разі маємо співвідношення потужностей  $\frac{P_{PVНОМ}}{P_{ВНОМ}} = 0,8 \dots 1$ . Відповідно, за  $P_{PVНОМ} = 20$ кВт значення  $P_{ВНОМ} = 25$ кВт. Співвідношення можна змінити шляхом зменшення ємності АКБ – замість трьох гілок GB на Рис. 4.1 використати 2 гілки [3].

*Масштабування за часом.* Здійснення лабораторних випробувань у добовому циклі має певні недоліки і потребує присутності персоналу. Обмеження часу випробувань можливо за пропорційного зменшення часу ( $m_t$ ), тобто замість 24 годин здійснювати випробування протягом 12 ( $m_t = 2$ ) або 8 ( $m_t = 3$ ) годин. За незмінного масштабу потужності загальна енергія споживання  $W_{Lt}$ , енергія спожита з мережі  $W_{gt}$  та ФЕ  $W_{Pvt}$

$$W_{Lt} = \sum \frac{P_i \cdot t_i}{m_t} = \frac{W_L}{m_t},$$

$$W_{gt} = \sum \frac{P_{gi} \cdot t_i}{m_t} = \frac{W_g}{m_t},$$

$$W_{PVt} = \int_{t_1}^{t_6} P_{PV} dt = \frac{W_{PV}}{m_t}.$$

Збереження графіку  $Q^*(t)$  та, відповідно, змін стану заряду АКБ  $\Delta Q_i^*$  на відповідних інтервалах часу потребує зміну енергії АКБ  $\Delta W_{Bti}$ . Так при розряді АКБ  $\Delta W_{Bti} = 0.01 \Delta Q_i^* \cdot W_B \cdot \eta_B = (W_{PVti} \cdot \eta_C - W_{Lti})$ .

Таким чином, значення  $W_{Bt} = \frac{W_B}{m_t}$  і ємність АКБ  $\frac{C_B}{m_t}$  змінюється згідно масштабу за часом.

Певним недоліком є те, що потужність інвертору (3 кВА) значно перевищує потужність PVE (в даному разі 241.3 Вт). За цього в разі визначення інтегральних показників, зокрема, коефіцієнта зниження витрат  $k_E$ , слід враховувати потужність  $P_B$ , що споживається власно інвертором (блок живлення, вентилятор, тощо) і є достатньо великою. Її вимірне значення становить  $P_B = 40$  Вт. В режимі байпасу це призведе до збільшення потужності, що мала б споживатися з DG за відповідності потужностей ФБ і інвертору.

З урахуванням масштабування за потужністю значення  $P_B$  слід перерахувати до відповідної потужності  $P_{PVНОМ}$ , у даному випадку 241.3 Вт (приймаємо  $P_{B1} = 3.5$  Вт). Тоді при визначенні потужності, що споживається з DG  $P_g$  за вимірним значенням  $P_{gB}$  використовуємо значення  $P_g = (P_{gB} - P_B + P_{B1})$ .

В автономному режимі  $P_B$  можна компенсувати за рахунок PVE, збільшивши потужність його генерації ( $P_{PVE}(t) + P_B$ ). За перемиканням в байпас компенсація  $P_B$  відключається [2].

Можливість завдання різних графіків  $P_{PVE}(t)$  дозволила здійснити дослідження за сценаріїв SC1, SC, SC3 в статичних режимах і денному циклі. За цього навантаження задавалось у відповідності до максимальної потужності емулятору. Здійснена таріровка схеми визначення стану заряду АКБ за струмом і напругою, оскільки градації стану заряду, що визначає гібридний інвертор згідно напрузі АКБ,

є недостатніми для використання в ПТК. В процесі підключення до системи управління інвертору визначено і скориговано протокол обміну даними.

#### **4.2. Випробування ПТК на діючій фотоелектричній системі**

Метою випробувань була перевірка функціональної працездатності дослідного зразка ПТК. Також оцінювалось зручність інтерфейсу для первинного налаштування и надання поточної інформації.

Випробування ПТК здійснювались в енергоцентрі КНУТД, де встановлено наступне обладнання (Рис. 4.7):

- гібридний мережевий інвертор MUST PV18-2K РК потужністю 2 кВА;
- сонячна фотоелектрична батарея з двох панелей з загальною максимальною потужністю 0.5 кВт;
- дві свинцево-кислотні (AGM) акумуляторні батареї ALVA AD12-80 (12 В, 80 А · год) на загальну напругу 24 В з енергоємністю 1920 Вт · год.
- ПТК складається з двох модулів: центральний модуль та модуль вимірювання та комутації (Рис. 4.7).
- Підключення дослідного зразка ПТК до обладнання ЦЕ КНУТД під час проведення випробувань відбувалося у відповідності до схеми з'єднань модулів ПТК, наведеної у Програмі та методиці випробувань ПТК (рис. В.9 Додаток В).

#### ***Прогноз генерації ФЕМ***

На стадії розробки ПТК розглядалось використання веб-ресурсу Solcast [177], що надає прогноз генерації ФЕ з дискретністю до 15 хвилин. Проте безкоштовний доступ для навчальних закладів обмежений лімітом у 10 запитів на добу з кроком дискретності 30 хвилин та глибиною прогнозу до кінця поточної доби.

Оскільки ПТК призначений для використання з комерційними інверторами використовувався ресурс з вільним доступом Forecast.Solar [178]. Розрахунок прогнозних показників генерації ФЕС для конкретної точки прогнозування (визначеної географічними координатами: широтою N та довготою E) з урахуванням орієнтації площини (кутів нахилу та азимута) та встановленої потужності

фотоелектричних модулів здійснюється шляхом запитів до API-інтерфейсу сервісу <https://forecast.solar/>. Реєстрація на ресурсі не потрібна.

Сервер формує відповідь в форматі JSON і відправляє клієнту. В інформації, отриманої з сервера, доступні дані про прогнозовану генеровану потужність з дискретністю в одну годину на поточну і наступну добу в Вт, Вт · год або сумарних Вт · год на день. Після парсинга мікроконтролер отримує данні прогнозу для подальшого аналізу і відображення. Форма запиту і обробки даних  $P_{PV}$  для подальшого використання надано В.8, В.10 Додатку В.



Рис. 4.7 Підключення ПТК під час випробувань в ЦЕ КНУТД

Під час випробувань здійснювалась перевірка реалізації наступних функцій ПТК:

- первинне налаштування у відповідності до обладнання ФЕС;
- завдання графіку навантаження;
- перемикання між режимами роботи системи в умовах проведення випробувань;
- підключення до сайту та формування сценарію управління з відповідними параметрами;
- виведення поточної інформації на екран сенсорного дисплею.

*Перемикання між режимами роботи системи в умовах проведення випробувань.* Під час проведення випробувань спостерігалися перемикання системи під управлінням ПТК з режиму автономної роботи на байпас і зворотне перемикання.

Випробування здійснені в період року з малою сонячною генерацією, коли ефективність використання системи є низькою і фактично визначається перерозподілом енергії за різними тарифами (нічним, денним і піковим), що здійснюється АКБ. За цього використовувався переважно сценарій SC3. Випробування підтвердили функціональну працездатність зразка ПТК. Але, випробування не дозволили оцінити роботу системи щодо ефективності використання сонячної енергії та її перерозподілу між навантаженням і АКБ.

#### **4.3. Висновки до розділу 4**

1. Розроблена експериментальна установка фотоелектричної системи з гібридним інвертором, акумуляторним накопичувачем і емулятором фотоелектричної батареї з програмним керуванням генерацією та потужністю навантаження, що дозволяє оцінювати працездатність випробуваних систем і коригувати алгоритми функціонування на апаратному рівні.
2. Розвинуто метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятору фотоелектричної батареї та навантаження з масштабуванням за потужністю та в часі. Це поряд з прискоренням експерименту дозволяє оцінювати ефективність випробуваних систем за різних співвідношень параметрів систем і коригувати алгоритми функціонування.
3. Розроблено структуру та схемні рішення щодо реалізації програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням ФЕС з використанням даних відкритих веб-ресурсів щодо прогнозу генерації, що може бути сумісним з комерційними інверторами;
4. Отримані рішення використані при розробці дослідного зразка програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням ФЕС. За результатами

випробування підтверджено функціональну працездатність ПТК відповідно до умов проведення випробувань. Здійснена перевірка функцій ПТК: перемикання між режимами роботи системи; підключення до сайту та формування сценарію управління; виведення поточної інформації на сенсорний екран дисплею ПТК. Підтверджено коректність та наочність відображення поточної інформації на сенсорному екрані ПТК: інформації про графік навантаження, ефективність функціонування та параметри системи.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішено науково-прикладне завдання щодо підвищення ступеню використання фотоелектричної енергії на споживання локальним об'єктом в разі управління за прогнозом фотоелектричної генерації та підвищення енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення.

1. Розвинуто управління фотоелектричною системою з перемиканням навантаження до мережі на визначених інтервалах часу та зміною алгоритму за прогнозом, що забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію. Введення релейного регулювання потужності фотоелектричної батареї за відсутності регулювання в MPPT контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації ФЕ.
2. Обґрунтовано механізм реалізації управління в разі використання програмно технічного комплексу разом зі стандартним гібридним інвертором з врахуванням комплексу питань щодо: вибору параметрів, рекомендованого сценарію навантаження та сценаріїв управління згідно прогнозу генерації ФЕ.
3. Обґрунтовано рекомендований сценарій навантаження зі зменшенням потужності в передвечірні години до початку вечірнього піку за відповідного збільшення пікового споживання, що забезпечує можливість підвищення стану заряду АКБ без додаткового споживання ЕЕ з мережі. Це забезпечує можливість додаткового зменшення вечірнього пікового споживання з мережі.
4. Розроблено алгоритм визначення параметрів та сценарію управління з формуванням стану заряду АКБ згідно прогнозу генерації ФЕ, що надає можливість підвищення рівня споживання за високої генерації ФЕ. В період високої генерації ФЕ АКБ працює в активному режимі заряду без обмеження потужності, заряд за постійної напруги здійснюється в передвечірні години. Глибина розряду АКБ із зменшенням генерації ФЕ за прогнозом знижується, що сприяє збільшенню терміну експлуатації АКБ.
5. Результати моделювання енергетичних процесів за прийнятих параметрів ФЕС підтверджують:

- коректність визначення параметрів управління щодо завдання сценаріїв управління для різної генерації ФБ та забезпечення балансу енергії за надлишкової генерації;
  - можливість зменшення витрат на спожиту з мережі електроенергію за рекомендованого графіку навантаження за тризонної тарифікації оплати до 29%, в разі одного тарифу до 10%.
  - можливість зменшення витрат на електроенергію до 28% за рахунок заряду АКБ в режимі байпасу перед початком вечірнього піку порівняно з варіантом без перемикавання на бай пас;
  - можливість забезпечення повного споживання ФЕ при генерації до 85% відносно ясного дня влітку за глибини розряду АКБ до 70%.
6. Розроблено алгоритми та рішення щодо реалізації програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням ФЕС з використанням даних відкритих веб-ресурсів щодо прогнозу генерації, що може бути сумісним з комерційними інверторами.
  7. Розвинуто метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятору фотоелектричної батареї та навантаження з масштабуванням за потужністю та в часі. Це поряд з прискоренням експерименту дозволяє оцінювати ефективність випробуваних систем за різних співвідношень параметрів систем і коригувати алгоритми функціонування.
  8. Запропоновано модель руху смуги часткового затінення фотоелектричного масиву з врахування напрямку та швидкості руху хмар за використання покадрових шаблонів затінення з їхньою інтерполяцією, що підвищує точність відтворення зміни радіації для елементів масиву. Розроблені шаблони затінення для напрямків руху з кутами до фронту масиву:  $0^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $63^\circ$  та  $76^\circ$ .
  9. Встановлено, що швидкість руху смуги затінення не впливає на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву, що дозволяє поширити отримані рекомендації і на статичні режими затінення.

10. Удосконалено математичну модель фотоелектричного масиву з можливістю дослідження різних його конфігурацій в процесі руху смуги затінення за рахунок програмної обробки даних з визначенням траєкторії глобального максимуму потужності, що дозволяє досліджувати енергетичні характеристики та можливості відстеження максимуму потужності.
11. Складено 12 можливих конфігурацій фотоелектричного масиву фіксованої потужності 10 кВт та виконано їх моделювання за різних напрямків руху смуги затінення, що дозволило сформулювати рекомендації щодо схем з'єднання та рядності розташування для мінімізації впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність масиву.
12. Запропоновано набір конфігурацій масиву за різної потужності - дворядні послідовні 2x4...2x6, дворядні послідовно-паралельні 2x4...2x10 та трирядні послідовно-паралельні 3x4, 3x6 і 3x8. Запропоновані рішення повністю перекривають діапазон потужностей 3-10 кВт, що відповідає найбільш поширеним запитам для приватних та малих комерційних ФЕС. Завдяки розробленій системі з'єднань ФЕМ підлаштовується під будь-яку геометрію розташування на дахах або наземних конструкціях.
13. Результати моделювання енергетичних процесів для запропонованих конфігурацій підтверджують покращення енергетичних характеристик відносно класичних еталонів - збільшення генерації до 8,0%, зменшення неузгоджених втрат до 24,8%, підвищення фактора заповнення до 14,1%, підвищення ефективності до 8,6%, покращення траєкторії GMPP, що дозволяє використовувати стандартні рішення MPPT контролерів комерційних інверторів. Розроблені топології дозволили зменшити амплітуду коливань MPPT як в абсолютних значеннях, так і відносно  $U_{OC}$  від 2.7% до 25.8%, що свідчить про підвищену стабільність робочої точки інвертора в розроблених схемах.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- [1] “Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року,” Офіційний вебпортал парламенту України. Accessed: May 14, 2026. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-%D1%80>
- [2] Kyiv National University of Technologies and Design, O. O. Shavolkin, I. O. Shvedchykova, G. V. Kruglyak, S. Stanovskiy, M. Pidgajnyy, “Програмно-технічний комплекс управління підключеною до мережі фотоелектричною системою з акумулятором для забезпечення власних потреб локального об’єкта,” *J. Electr. Power Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 20–27, Dec. 2020, doi: 10.31474/2074-2630-2020-2-20-27.
- [3] O. O. Shavolkin, I. O. Shvedchykova, G. V. Kruglyak, P. M. Marchenko, A. V. Pitsotskiy, “Розроблення експериментальної установки для випробувань програмно-апаратних засобів управління мікроенергетичними мережами локальних об’єктів,” *Bull. Kyiv Natl. Univ. Technol. Des. Tech. Sci. Ser.*, vol. 148, no. 4, pp. 14–24, Mar. 2021, doi: 10.30857/1813-6796.2020.4.1.
- [4] O. Shavolkin, P. Marchenko, M. Pidgajnyy, G. Kruglyak, “Визначення параметрів фотоелектричної системи з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Technol. Eng.*, no. 4, pp. 41–50, Jan. 2022, doi: 10.30857/2786-5371.2021.4.4.
- [5] O. Shavolkin, S. Stanovskiy, M. Pidgajnyy, P. Marchenko, G. Kruglyak, “Моделювання енергетичних процесів в гібридній фотоелектричній системі з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Technol. Eng.*, no. 3, pp. 28–38, Jan. 2022, doi: 10.30857/2786-5371.2021.3.3.
- [6] A. A. Shavelkin, J. Gerlici, I. O. Shvedchykova, K. Kravchenko, H. V. Kruhliak, “Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs,” *Electr. Eng. Electromechanics*, no. 2, pp. 36–42, Apr. 2021, doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.06.
- [7] O. Shavolkin, H. Kruhliak, I. Shvedchykova, T. Bila, A. Pisotskiy, “Determining photovoltaic array configurations with reduced impact of partial shading on energy

performance,” *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 1, no. 8 (139), pp. 27–36, Feb. 2026, doi: 10.15587/1729-4061.2026.352343.

- [8] “Гібридні сонячні електростанції - принцип роботи, переваги, вартість | Ecotech Ukraine.” Accessed: Apr. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.ecotech.ua/gibrydni-sonyachni-elektrostancziyi-vse-shho-potribno-znaty/>
- [9] S. Pater, “Increase of energy self-consumption in hybrid RES installations 1 with PV panels and air-source heat pumps,” *Chem. Process Eng. New Front.*, pp. 43–43, Nov. 2023, doi: 10.24425/cpe.2023.147402.
- [10] S. Pater, “Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems,” Apr. 17, 2023, *Chemistry and Materials Science*. doi: 10.20944/preprints202304.0455.v1.
- [11] A. Ciocia *et al.*, “Self-Consumption and Self-Sufficiency in Photovoltaic Systems: Effect of Grid Limitation and Storage Installation,” *Energies*, vol. 14, no. 6, p. 1591, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061591.
- [12] S. Karalus, B. Köpfer, P. Guthke, S. Killinger, and E. Lorenz, “Analysing Grid-Level Effects of Photovoltaic Self-Consumption Using a Stochastic Bottom-up Model of Prosumer Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 3059, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16073059.
- [13] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 80–94, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [14] D. Kurz and A. Nowak, “Analysis of the Impact of the Level of Self-Consumption of Electricity from a Prosumer Photovoltaic Installation on Its Profitability under Different Energy Billing Scenarios in Poland,” *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 946, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020946.
- [15] J. Hyvönen, A. Santasalo-Aarnio, S. Syri, and M. Lehtonen, “Feasibility study of energy storage options for photovoltaic electricity generation in detached houses in Nordic climates,” *J. Energy Storage*, vol. 54, p. 105330, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105330.

- [16] R. Thygesen and B. Karlsson, “Simulation and analysis of a solar assisted heat pump system with two different storage types for high levels of PV electricity self-consumption,” *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 19–27, May 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.013.
- [17] A. Kesküla, K. Grjaznov, T. Sepp, and A. Allik, “Optimal Sizing of Residential PV and Battery Systems Under Grid Export Constraints: An Estonian Case Study,” *Energies*, vol. 18, no. 16, p. 4405, Aug. 2025, doi: 10.3390/en18164405.
- [18] O. Shavolkin, I. Shvedchykova, J. Romanchenko, R. Marchenko, S. Yakymets, “Installed Power of the Grid-Tied Photovoltaic System with Battery for Self-Consumption of the Local Object,” in *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine: IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005628.
- [19] M. Draou, A. Brakez, and A. Bennouna, “Techno-economic feasibility assessment of a photovoltaic water heating storage system for self-consumption improvement purposes,” *J. Energy Storage*, vol. 76, p. 109545, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109545.
- [20] E. Kazanecka, D. Matuszewska, L. Montuori, M. Assadi, and P. Olczak, “Evaluation of a Home Energy Management System Using One-Year Data Under Dynamic Tariff Conditions,” *Energies*, vol. 19, no. 5, p. 1383, Mar. 2026, doi: 10.3390/en19051383.
- [21] R. Luthander, J. Widén, J. Munkhammar, and D. Lingfors, “Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment,” *Energy*, vol. 112, pp. 221–231, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.039.
- [22] M. B. Kahsay and S. Völler, “Thermal energy storage for increasing self-consumption of grid connected photovoltaic systems: A case for Skjetlein High School, Norway,” *Energy Build.*, vol. 335, p. 115563, May 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115563.
- [23] M. A. A. Abdalla, W. Min, W. Bing, A. M. Ishag, and B. Saleh, “Double-layer home energy management strategy for increasing PV self-consumption and cost reduction

- through appliances scheduling, EV, and storage,” *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 3494–3518, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.10.019.
- [24] G. P. Luz, M. C. Brito, J. M. C. Sousa, and S. M. Vieira, “Coordinating shiftable loads for collective photovoltaic self-consumption: A multi-agent approach,” *Energy*, vol. 229, p. 120573, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120573.
- [25] Z. A. Al Mualala, M. A. Bany Issa, D. Sansó-Rubert Pascual, and P. M. Bello Bugallo, “Realistic Home Energy Management System Considering the Life Cycle of Photovoltaic and Energy Storage Systems,” *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11205, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151411205.
- [26] M. Kim, T. Park, J. Jeong, and H. Kim, “Stochastic optimization of home energy management system using clustered quantile scenario reduction,” *Appl. Energy*, vol. 349, p. 121555, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121555.
- [27] S. Balavignesh, C. Kumar, S. Ueda, and T. Senjyu, “Optimization-based optimal energy management system for smart home in smart grid,” *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 3733–3756, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.10.037.
- [28] P. Finn, M. O’Connell, and C. Fitzpatrick, “Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 678–685, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.07.004.
- [29] O. Shavolkin, I. Shvedchykova, M. Kolcun, D. Medved, D. Mazur, B. Kwiatkowski, “Increasing photovoltaic self-consumption for objects using domestic hot water systems,” *Arch. Electr. Eng.*, pp. 573–573, Sep. 2024, doi: 10.24425/aee.2024.150884.
- [30] О. О. Шавьолкін, М. О. Підгайний, “Вдосконалення системи управління гібридної фотоелектричної системи для самоспоживання житлового будинку з регулюванням споживання,” *Technol. Eng.*, no. 2, pp. 57–67, May 2024, doi: 10.30857/2786-5371.2024.2.6.
- [31] “SUN-15-20K-SG01HP3-EU-AM2 Deye.” Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: [https://old.solar.biz.ua/Deye\\_SUN5-25K-SG01HP3-EU-AM2-Manual-UA.pdf](https://old.solar.biz.ua/Deye_SUN5-25K-SG01HP3-EU-AM2-Manual-UA.pdf)

- [32] H. Sangrody, N. Zhou, and Z. Zhang, “Similarity-Based Models for Day-Ahead Solar PV Generation Forecasting,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 104469–104478, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999903.
- [33] A. Mehrabani, S. M. Shobeiry, M. A. Rahimi, and A. P. Neghab, “Multi-Objective Optimization of Microgrid in the Presence of Distributed Energy Resources and Demand Response Programs,” in *2023 10th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, Shahrood, Iran, Islamic Republic of: IEEE, Mar. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICREDG58341.2023.10092013.
- [34] S. L. L. Wynn, T. Boonraksa, P. Boonraksa, W. Pinthurat, and B. Marungsri, “Decentralized Energy Management System in Microgrid Considering Uncertainty and Demand Response,” *Electronics*, vol. 12, no. 1, p. 237, Jan. 2023, doi: 10.3390/electronics12010237.
- [35] Y. Zhao and T. Jiang, “The Chinese power grid’s peak shaving and carbon emission reduction: Prospects and potential of home energy storage,” *J. Energy Storage*, vol. 141, p. 119474, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.119474.
- [36] A. Mellit, A. M. Pavan, and V. Lughi, “Deep learning neural networks for short-term photovoltaic power forecasting,” *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 276–288, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.166.
- [37] S. Iyengar, N. Sharma, D. Irwin, P. Shenoy, and K. Ramamritham, “SolarCast - an open web service for predicting solar power generation in smart homes: demo abstract,” in *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*, Memphis Tennessee: ACM, Nov. 2014, pp. 174–175. doi: 10.1145/2674061.2675020.
- [38] S. Iyengar, N. Sharma, D. Irwin, P. Shenoy, and K. Ramamritham, “A Cloud-Based Black-Box Solar Predictor for Smart Homes,” *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–24, Oct. 2017, doi: 10.1145/3004056.
- [39] A. O. Ali, A. M. Hamed, M. M. Abdelsalam, M. N. Sabry, and M. R. Elmarghany, “Energy management of photovoltaic-battery system connected with the grid,” *J. Energy Storage*, vol. 55, p. 105865, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105865.

- [40] Md Torikul Islam and Md. Shihanul Islam, “24-hour Simulation of a Vehicle-To-Grid (V2G) System,” 2025, doi: 10.13140/RG.2.2.21275.53281.
- [41] “Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid.” Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.matlabsolutions.com/matlab-projects/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.php>
- [42] L. Barelli *et al.*, “Dynamic Analysis of a Hybrid Energy Storage System (H-ESS) Coupled to a Photovoltaic (PV) Plant,” *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 396, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020396.
- [43] O. Shavolkin, I. Shvedchykova, V. Lishchuk, Y. Stanovskyi, “Improving a model of the hybrid photovoltaic system with a storage battery for local object’s self-consumption involving the setting of power consumed from the grid,” *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 3, no. 8 (123), pp. 6–16, Jun. 2023, doi: 10.15587/1729-4061.2023.280053.
- [44] S. Vergura, “A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation,” *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 326, Apr. 2016, doi: 10.3390/en9050326.
- [45] Z. Zhou and J. Macaulay, “An Emulated PV Source Based on an Unilluminated Solar Panel and DC Power Supply,” *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2075, Dec. 2017, doi: 10.3390/en10122075.
- [46] Keysight, “Modular Module DC Power Supplies: E4362A,” Keysight United States. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/E4362A/solar-array-simulator-dc-module-130v-5a-600w.html>
- [47] C. Shao, A. Migan-Dubois, and D. Diallo, “Performance of PV array configurations under dynamic partial shadings,” *EPJ Photovolt.*, vol. 14, p. 21, 2023, doi: 10.1051/epjpv/2023012.
- [48] S. Suriya Kala, D. Prince Winston, M. Pravin, and G. Sakthivel, “Maximum power enhancement in solar PV modules through modified TCT interconnection method,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, p. 103462, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103462.

- [49] C. B. Nzoundja Fapi, P. Wira, and M. Kamta, “Real-Time Experimental Assessment of a New MPPT Algorithm Based on the Direct Detection of the Short-Circuit Current for a PV System,” *RE&PQJ*, vol. 19, no. 5, Jan. 2024, doi: 10.24084/repqj19.358.
- [50] C. B. Nzoundja Fapi, P. Wira, and M. Kamta, “A Fuzzy Logic MPPT Algorithm with a PI Controller for a Standalone PV System under Variable Weather and Load Conditions,” in *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, Medea, Algeria: IEEE, Nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICASS.2018.8652047.
- [51] Tchakounté, Hyacinthe, C. Bertin, N. Fapi, M. Kamta, and P. Woafu, “Performance Predictions Accuracy of a Smart Sun Tracking System for Photovoltaic Applications,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, Dec. 2021, doi: 10.20508/ijrer.v11i4.12489.g8356.
- [52] A. Saxena *et al.*, “A state-of-art review on photovoltaic systems: Design, performance, and progress,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 190, pp. 1324–1354, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.07.111.
- [53] S. S. Kumar and K. Balakrishna, “A novel design and analysis of hybrid fuzzy logic MPPT controller for solar PV system under partial shading conditions,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 10256, May 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60870-5.
- [54] C. Kesch *et al.*, “High fibroblast-activation-protein expression in castration-resistant prostate cancer supports the use of FAPI-molecular theranostics,” *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, vol. 49, no. 1, pp. 385–389, Dec. 2021, doi: 10.1007/s00259-021-05423-y.
- [55] C.-L. Liu, J.-H. Chen, Y.-H. Liu, and Z.-Z. Yang, “An Asymmetrical Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems,” *Energies*, vol. 7, no. 4, pp. 2177–2193, Apr. 2014, doi: 10.3390/en7042177.
- [56] F. R. Spellman, *The Science of Renewable Energy*, 0 ed. CRC Press, 2016. doi: 10.1201/b21643.
- [57] C. Fapi, P. Wira, M. Kamta, and B. Colicchio, “Voltage Regulation Control with Adaptive Fuzzy Logic for a Stand-Alone Photovoltaic System,” *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 145–152, Apr. 2020, doi: 10.18280/ejee.220208.

- [58] R. Kumar, A. Bhattacharya, and A. S. S. Vardhan, “Fuzzy Logic Controller and P&O-Based MPPT Techniques for Stand-Alone PV Systems: A Comparison,” Sep. 13, 2024, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-4926323/v1.
- [59] M. Lawan, A. Aboushady, and K. H. Ahmed, “Photovoltaic MPPT Techniques Comparative Review,” in *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, Glasgow, United Kingdom: IEEE, Sep. 2020, pp. 344–351. doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242855.
- [60] R. R. P, A. R, V. V. Kumar, and B. Venkatesaperumal, “A Critical Review of MPPT Algorithms for PV Systems,” in *2024 International Conference on Advances in Modern Age Technologies for Health and Engineering Science (AMATHE)*, Shivamogga, India: IEEE, May 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/AMATHE61652.2024.10582087.
- [61] A. O. Baba, G. Liu, and X. Chen, “Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods,” *Sustain. Futur.*, vol. 2, p. 100020, 2020, doi: 10.1016/j.sftr.2020.100020.
- [62] A. R. Hameed, A. O. Aftan, and N. A. Kudher, “A structured review of MPPT techniques for photovoltaic systems,” presented at the THE FOURTH SCIENTIFIC CONFERENCE FOR ELECTRICAL ENGINEERING TECHNIQUES RESEARCH (EETR2022), Baghdad, Iraq, 2023, p. 050034. doi: 10.1063/5.0154662.
- [63] H. Al Garni, A. Sundaram, A. Awasthi, R. Chandel, S. Tajjour, and S. S. Chandel, “A Comprehensive Review of Most Competitive Maximum Power Point Tracking Techniques for Enhanced Solar Photovoltaic Power Generation,” *J. Renew. Energy Environ.*, vol. 11, no. 3, Jul. 2024, doi: 10.30501/jree.2024.408699.1638.
- [64] H. Rezk, A. Fathy, and A. Y. Abdelaziz, “A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 377–386, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.051.
- [65] V. K. Tiwari, A. Kumar, S. Yadav, D. K. Nishad, and S. Khalid, “Explainable AI-enabled adaptive fuzzy MPPT and energy management for bifacial PV and battery-

- powered electric vehicle charging system,” *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 4813, Jan. 2026, doi: 10.1038/s41598-025-34894-4.
- [66] J. Jallad, *Implementation of a Modified PSO for MPP Tracking in Partially Shaded PV Systems using PIC18F4550 in Proteus Software*. 2025.
- [67] N. Koshkarbay *et al.*, “High-efficiency hybrid MPPT technique with integrated partial shading detection for photovoltaic systems under varying shading conditions,” *Renew. Energy*, vol. 261, p. 125244, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.renene.2026.125244.
- [68] Z. B. Duranay and H. Güldemir, “Mitigating Partial Shading Effects in Photovoltaic Systems Using Particle Swarm Optimization-Tuned Sliding Mode Control,” *Processes*, vol. 13, no. 5, p. 1463, May 2025, doi: 10.3390/pr13051463.
- [69] C. B. N. Fapi, P. Wira, M. Kamta, and B. Colicchio, “Design and Hardware Realization of an Asymmetrical Fuzzy Logic-based MPPT Control for Photovoltaic Applications,” in *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada: IEEE, Oct. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589287.
- [70] M. S. Wasim, M. Amjad, S. Habib, M. A. Abbasi, A. R. Bhatti, and S. M. Muyeen, “A critical review and performance comparisons of swarm-based optimization algorithms in maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 4871–4898, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.175.
- [71] F. L. Siaw, T. H. G. Thio, and W. H. Lau, “Comparative study of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions on portable solar chargers,” presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH INNOVATIONS: Trends in Computational Science, Bangkok, Thailand, 2025, p. 040006. doi: 10.1063/5.0290086.
- [72] C. Saiprakash, A. Mohapatra, B. Nayak, and S. R. Ghatak, “Analysis of partial shading effect on energy output of different solar PV array configurations,” *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1905–1909, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.307.

- [73] S. Devakirubakaran, R. Verma, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "Performance Evaluation of Static PV Array Configurations for Mitigating Mismatch Losses," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47725–47749, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274684.
- [74] C. Nzoundja Fapi, P. Wira, and M. Kamta, *An Adaptive Fuzzy Logic Algorithm for Maximum Power Point Tracking under Partial Shading of a Solar Photovoltaic System*. 2021.
- [75] N. F. Claude Bertin, K. Martin, and W. Patrice, "A comprehensive assessment of MPPT algorithms to optimal power extraction of a PV panel," *J. Sol. Energy Res.*, vol. 4, no. 3, Aug. 2019, doi: 10.22059/jser.2019.287029.1126.
- [76] M. Y. Worku *et al.*, "A Comprehensive Review of Recent Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems under Partial Shading," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11132, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151411132.
- [77] A. Badawi, I. M. Elzein, K. Matter, C. Z. El-bayeh, H. Ali, and A. Zyoud, "A State-of-the-Art Comprehensive Review on Maximum Power Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems and New Technology of the Photovoltaic Applications," *Energies*, vol. 18, no. 24, p. 6555, Dec. 2025, doi: 10.3390/en18246555.
- [78] Diana T. Nguyen, "Advanced Control Strategies for High-Power Inverters in Power Systems," *Am. J. Power Electron. Power Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 10–18, Jun. 2022, doi: 10.71465/ajpeps2507.
- [79] A. Almalag, A. Annuk, T. Jin, and M. A. Mohamed, "A reduced sensor-based efficient and robust MPPT nonlinear controller for grid-integrated photovoltaic energy systems operating under rapidly changing climatic conditions," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 41473, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-27033-6.
- [80] O. Saleem, S. Ali, and J. Iqbal, "Robust MPPT Control of Stand-Alone Photovoltaic Systems via Adaptive Self-Adjusting Fractional Order PID Controller," *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5039, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16135039.
- [81] Y. Wang, Z. Wu, and D. Ni, "Large-Scale Optimization among Photovoltaic and Concentrated Solar Power Systems: A State-of-the-Art Review and Algorithm Analysis," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4323, Aug. 2024, doi: 10.3390/en17174323.

- [82] J. Meng, Q. Guo, M. Yue, and D. Diallo, “Comparative study of maximum power point tracking control for PV arrays system integration process,” *Control Eng. Pract.*, vol. 147, p. 105906, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.conengprac.2024.105906.
- [83] G. Hou and Z. Guo, “Maximum power point tracking of solar photovoltaic under partial shading conditions based on improved salp swarm algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 241, p. 111316, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2024.111316.
- [84] A. Y. Taha, M. Aljanabi, A. N. Al-Shamani, and Z. H. Hadi, “Intelligent maximum power point tracking for photovoltaic system using meta-heuristic optimization algorithms: A holistic review,” presented at the 1ST International Conference On Achieving The Sustainable Development Goals, Istanbul, Turkey, 2023, p. 050003. doi: 10.1063/5.0136227.
- [85] P. K. Bonthagorla and S. Mikkili, “A Triple-Tied PV Array scheme with Grey Wolf Optimization based MPPT Approach for Maximum Power Harvesting Under Partial Shading,” in *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore: IEEE, Oct. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON51785.2023.10311850.
- [86] O. Boubaker, “MPPT techniques for photovoltaic systems: a systematic review in current trends and recent advances in artificial intelligence,” *Discov. Energy*, vol. 3, no. 1, p. 9, Dec. 2023, doi: 10.1007/s43937-023-00024-2.
- [87] D. Sharma, M. F. Jalil, M. S. Ansari, and R. C. Bansal, “A review of PV array reconfiguration techniques for maximum power extraction under partial shading conditions,” *Optik*, vol. 275, p. 170559, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijleo.2023.170559.
- [88] Noor A. Kadhim, Adel A. Obed, Ahmed J. Abid, Ameer L. Saleh, and Reheel J. Hassoon, “A Systematic Review for Reconfiguring Photovoltaic Arrays under Conditions of Partial Shading,” *Electr. Eng. Tech. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–34, Jun. 2024, doi: 10.51173/eetj.v1i1.6.
- [89] F. Belhachat and C. Larbes, “PV array reconfiguration techniques for maximum power optimization under partial shading conditions: A review,” *Sol. Energy*, vol. 230, pp. 558–582, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.09.089.

- [90] S. Rezazadeh, A. Moradzadeh, K. Pourhossein, M. Akrami, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam, "Photovoltaic array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction: A state-of-the-art review and new solution method," *Energy Convers. Manag.*, vol. 258, p. 115468, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115468.
- [91] F. Ameen, A. Siddiq, A. Trohák, and R. Benotsmane, "A Scalable Hierarchical Dynamic PV Array Reconfiguration under Partial Shading," *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 181, Dec. 2023, doi: 10.3390/en17010181.
- [92] M. Palpandian, D. P. Winston, B. P. Kumar, C. S. Kumar, T. S. Babu, and H. H. Alhelou, "A New Ken-Ken Puzzle Pattern Based Reconfiguration Technique for Maximum Power Extraction in Partial Shaded Solar PV Array," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65824–65837, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3076608.
- [93] A. Sathishkumar and D. C. Chengaiah, "Performance Analysis of PV System Under Partial Shading Conditions," vol. 9, no. 12, 2022.
- [94] X. Fang and Q. Yang, "Dynamic reconfiguration of photovoltaic array for minimizing mismatch loss," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 191, p. 114160, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114160.
- [95] P. R. Satpathy, B. Aljafari, S. B. Thanikanti, and R. Sharma, "An efficient power extraction technique for improved performance and reliability of solar PV arrays during partial shading," *Energy*, vol. 282, p. 128992, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128992.
- [96] V. C. Chavan, S. Mikkili, and T. Senjyu, "Hardware Implementation of Novel Shade Dispersion PV Reconfiguration Technique to Enhance Maximum Power under Partial Shading Conditions," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3515, May 2022, doi: 10.3390/en15103515.
- [97] M. Jalal, I. U. Khalil, A. U. Haq, A. Flah, and S. A. M. Abdel Wahab, "Advancements in PV Array Reconfiguration Techniques: Review Article," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 183751–183778, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3509955.

- [98] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "A novel Competence Square based PV array reconfiguration technique for solar PV maximum power extraction," *Energy Convers. Manag.*, vol. 174, pp. 897–912, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.077.
- [99] B. Aljafari, R. K. Pachauri, S. B. Thanikanti, and B. V. Ayodele, "Innovative Methodologies for Higher Global MPP of Photovoltaic Arrays under PSCs: Experimental Validation," *Sustainability*, vol. 15, no. 15, p. 11852, Aug. 2023, doi: 10.3390/su151511852.
- [100] C.-E. Ye, C.-C. Tai, and Y.-P. Huang, "Disperse Partial Shading Effect of Photovoltaic Array by Means of the Modified Complementary SuDoKu Puzzle Topology," *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 4910, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16134910.
- [101] M. Zeeshan, N. U. Islam, F. Faizullah, I. U. Khalil, and J. Park, "A Novel Row Index Mathematical Procedure for the Mitigation of PV Output Power Losses during Partial Shading Conditions," *Symmetry*, vol. 15, no. 3, p. 768, Mar. 2023, doi: 10.3390/sym15030768.
- [102] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "Dominance square based array reconfiguration scheme for power loss reduction in solar PhotoVoltaic (PV) systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 156, pp. 84–102, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.080.
- [103] D. S. Pillai, N. Rajasekar, J. P. Ram, and V. K. Chinnaiyan, "Design and testing of two phase array reconfiguration procedure for maximizing power in solar PV systems under partial shade conditions (PSC)," *Energy Convers. Manag.*, vol. 178, pp. 92–110, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.020.
- [104] A. M. Ajmal, T. Sudhakar Babu, V. K. Ramachandaramurthy, Dalia. Yousri, and J. B. Ekanayake, "Static and dynamic reconfiguration approaches for mitigation of partial shading influence in photovoltaic arrays," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 40, p. 100738, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100738.
- [105] A. Mahmood, "A New Static PV Array Reconfiguration for Increasing Maximum Power, Case Study: Al-Nahrain University," *Iraqi J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 21, no. 2, pp. 136–144, Jan. 2025, doi: 10.37917/ijeee.21.2.14.

- [106] R. Kumar Pachauri *et al.*, “Ancient Chinese magic square-based PV array reconfiguration methodology to reduce power loss under partial shading conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 253, p. 115148, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.115148.
- [107] S. Mikkili, A. Kanjune, P. K. Bonthagorla, and T. Senjyu, “Non-Symmetrical (NS) Reconfiguration Techniques to Enhance Power Generation Capability of Solar PV System,” *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2124, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062124.
- [108] M. F. Jalil, Pushpender, S. Khatoon, S. Hameed, and R. C. Bansal, “Shade dispersion in partial shading and mismatch loss reduction in PV array with improved odd-even reconfiguration,” *Int. J. Model. Simul.*, pp. 1–17, Jan. 2026, doi: 10.1080/02286203.2025.2611264.
- [109] V. L. Mishra, Y. K. Chauhan, and K. S. Verma, “Attenuation of shading loss using a novel solar array reconfigured topology under partial shading conditions,” *Sol. Energy*, vol. 274, p. 112552, May 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112552.
- [110] S. K. Cherukuri *et al.*, “A Novel Array Configuration Technique for Improving the Power Output of the Partial Shaded Photovoltaic System,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15056–15067, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3148065.
- [111] S. Vijayalekshmy, G. R. Bindu, and S. R. Iyer, “Performance comparison of Zig-Zag and Su do Ku schemes in a partially shaded photo voltaic array under static shadow conditions,” in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore: IEEE, Apr. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPACT.2017.8245109.
- [112] S. Hou and W. Zhu, “Dynamic Reconfiguration Method of Photovoltaic Array Based on Improved HPSO Combined with Coefficient of Variation,” *Electronics*, vol. 12, no. 12, p. 2744, Jun. 2023, doi: 10.3390/electronics12122744.
- [113] L. Bouselham, A. Rabhi, B. Hajji, and A. Mellit, “Photovoltaic array reconfiguration method based on fuzzy logic and recursive least squares: An experimental validation,” *Energy*, vol. 232, p. 121107, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121107.
- [114] B. I. Rani, G. S. Ilango, and C. Nagamani, “Enhanced Power Generation From PV Array Under Partial Shading Conditions by Shade Dispersion Using Su Do Ku

- Configuration,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 594–601, Jul. 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2230033.
- [115] M. S. S. Nihanth, J. P. Ram, D. S. Pillai, A. M. Y. M. Ghias, A. Garg, and N. Rajasekar, “Enhanced power production in PV arrays using a new skyscraper puzzle based one-time reconfiguration procedure under partial shade conditions (PSCs),” *Sol. Energy*, vol. 194, pp. 209–224, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.10.020.
- [116] S. Sharma *et al.*, “Performance Enhancement of PV System Configurations Under Partial Shading Conditions Using MS Method,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56630–56644, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071340.
- [117] V. Narayanaswamy, R. Ayyanar, C. Tepedelenlioglu, D. Srinivasan, and A. Spanias, “Optimizing Solar Power Using Array Topology Reconfiguration With Regularized Deep Neural Networks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 7461–7470, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238400.
- [118] O. Güngör and H. Kahveci, “Novel PV Array Reconfiguration and Integration with a Maximum Power Point Tracking Algorithm: RMPPT,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 48, no. 11, pp. 15445–15461, Nov. 2023, doi: 10.1007/s13369-023-08128-6.
- [119] R. Dhariwal and B. Kumar, “A Comparative Study on Metaheuristic-Based Reconfiguration Strategies for Non-uniformly Shaded PV Array,” in *Signals, Machines and Automation*, vol. 1023, A. Rani, B. Kumar, V. Shrivastava, and R. C. Bansal, Eds., in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1023, Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 165–173. doi: 10.1007/978-981-99-0969-8\_17.
- [120] S. Mikkili, K. A. Bapurao, and P. K. Bonthagorla, “Sudoku and Optimal Sudoku Reconfiguration Techniques for Power Enhancement of Partial Shaded Solar PV system,” *J. Inst. Eng. India Ser. B*, vol. 103, no. 5, pp. 1793–1807, Oct. 2022, doi: 10.1007/s40031-022-00760-4.
- [121] A. Muhammad Ajmal, V. K. Ramachandramurthy, A. Naderipour, and J. B. Ekanayake, “Comparative analysis of two-step GA-based PV array reconfiguration technique and other reconfiguration techniques,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 230, p. 113806, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113806.

- [122] M. Alanazi, A. Fathy, D. Yousri, and H. Rezk, “Optimal reconfiguration of shaded PV based system using African vultures optimization approach,” *Alex. Eng. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 12159–12185, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.06.009.
- [123] H. Rezk, A. Fathy, and M. Aly, “A robust photovoltaic array reconfiguration strategy based on coyote optimization algorithm for enhancing the extracted power under partial shadow condition,” *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 109–124, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2020.11.035.
- [124] X. Zhang, D. Meng, W. Li, T. Yu, Z. Fan, and Z. Hao, “Evolutionary based Pareto optimization algorithms for bi-objective PV array reconfiguration under partial shading conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 271, p. 116308, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116308.
- [125] A. M. Nassef, E. H. Houssein, B. E. Helmy, A. Fathy, M. L. Alghaythi, and H. Rezk, “Optimal reconfiguration strategy based on modified Runge Kutta optimizer to mitigate partial shading condition in photovoltaic systems,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 7242–7262, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.231.
- [126] T. Nguyen-Duc, D. Nguyen-Dang, T. Le-Viet, and G. Fujita, “Continuous Reconfiguration Framework for Photovoltaic Array under Variable Partial Shading Conditions: Heuristic-Based Algorithms with Optimizing Switching Operation,” *Energies*, vol. 15, no. 18, p. 6821, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15186821.
- [127] A. Loukriz *et al.*, “A New Simplified Algorithm for Real-Time Power Optimization of TCT Interconnected PV Array under Any Mismatch Conditions,” *J. Eur. Systèmes Autom.*, vol. 54, no. 6, pp. 805–817, Dec. 2021, doi: 10.18280/jesa.540602.
- [128] A. Fathy, D. Yousri, T. S. Babu, H. Rezk, and H. S. Ramadan, “An enhanced reconfiguration approach for mitigating the shading effect on photovoltaic array using honey badger algorithm,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 57, p. 103179, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103179.
- [129] V. Mohanapriya and B. Sharmila, “Optimum PV reconfiguration approach based on SOA for improving the harvest power under PS situations,” *Electr. Eng.*, vol. 106, no. 1, pp. 869–889, Feb. 2024, doi: 10.1007/s00202-023-02006-y.

- [130] X. Gao *et al.*, “Divide and Conquer Q-Learning (DCQL) algorithm based Photovoltaic (PV) array reconfiguration scheme for alleviating the partial shading influence,” *Sol. Energy*, vol. 249, pp. 21–39, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2022.09.005.
- [131] D. Li, H. Zhou, Y. Zhou, Y. Rao, and W. Yao, “Atom Search Optimization-Based PV Array Reconfiguration Technique under Partial Shading Condition,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2023, pp. 1–15, Apr. 2023, doi: 10.1155/2023/8685976.
- [132] S. Li, T. Zhang, and J. Yu, “Photovoltaic Array Dynamic Reconfiguration Based on an Improved Pelican Optimization Algorithm,” *Electronics*, vol. 12, no. 15, p. 3317, Aug. 2023, doi: 10.3390/electronics12153317.
- [133] A. Rai, bhoomika awasthi, S. Singh, and c.k.dwivedi, “A Review of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic System,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. 05, pp. 539–545, Jun. 2016, doi: 10.17950/ijer/v5s6/625.
- [134] M. S. Endiz, G. Gökkuş, A. E. Coşgun, and H. Demir, “A Review of Traditional and Advanced MPPT Approaches for PV Systems Under Uniformly Insolation and Partially Shaded Conditions,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 3, p. 1031, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15031031.
- [135] A. N. Mahmud Mohammad, M. A. Mohd Radzi, N. Azis, S. Shafie, and M. A. Atiqi Mohd Zainuri, “An Enhanced Adaptive Perturb and Observe Technique for Efficient Maximum Power Point Tracking Under Partial Shading Conditions,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 11, p. 3912, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10113912.
- [136] M. Kermadi *et al.*, “Recent developments of MPPT techniques for PV systems under partial shading conditions: a critical review and performance evaluation,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 17, pp. 3401–3417, Dec. 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0454.
- [137] P. R. Satpathy, R. Sharma, and S. Dash, “An efficient SD-PAR technique for maximum power generation from modules of partially shaded PV arrays,” *Energy*, vol. 175, pp. 182–194, May 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.078.
- [138] S. Ganesan, P. W. David, H. Thangaraj, P. K. Balachandran, and S. Selvarajan, “Power enhancement of PV arrays in different configurations under different partial

shaded condition,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 6963, Feb. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-91508-9.

- [139] K. Akter *et al.*, “A novel MPPT approach for photovoltaic system using Pelican optimization and high-gain DC–DC converter,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 40451, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-24000-z.
- [140] S. Pareek *et al.*, “Performance comparison of interconnection schemes for mitigating partial shading losses in solar photovoltaic arrays,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 27787, Jul. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-12984-7.
- [141] S. R. Pendem and S. Mikkili, “Modelling and performance assessment of PV array topologies under partial shading conditions to mitigate the mismatching power losses,” *Sol. Energy*, vol. 160, pp. 303–321, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.010.
- [142] “Sunny Home Manager 2.0 | SMA Solar.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.sma.de/en/products/energy-management/sunny-home-manager#c2355>
- [143] I. М. Сотник, Ю. М. Завдов’єва, and О. І. Завдов’єв, “Багатоставкові зонні тарифи в системі управління попитом на електроенергію,” vol. 2, 2014, [Online]. Available: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/badfc8f8-d9c3-4c25-9165-b406eb63cefb/content>
- [144] “Гібридний інвертор AXIOMA energy ISMPPT BF3000.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://ua.axioma.energy/ru/hibrydnyi-invertor-dbzh-mpp-na-3-kvt-axioma-energy-ismppt-bf-3000-24v-3000vt/>
- [145] ДБНУ, “ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_27\\_2010/5-1-0-929](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929)
- [146] “PVGIS24 - Розширений сонячний інструмент. Особливості та переваги.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://pvgis.com/uk/pvgis-про>
- [147] О. О. Шавьолкін, Є. Ю. Становський, М. О. Підгайний, “Моделювання комбінованої системи електроживлення локального об’єкту з багатофункціональним перетворювальним агрегатом фотоелектричної батареї,”

*Bull. Kyiv Natl. Univ. Technol. Des. Tech. Sci. Ser.*, vol. 136, no. 4, pp. 20–33, Nov. 2019, doi: 10.30857/1813-6796.2019.4.2.

- [148] “LR7-72HVHF 640~670M - Anti-Dust - Single glass, 3.2mm coated tempered glass - 24.8% Efficiency.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://eu.longi.com/longi-solar-panels-datasheets/lr7-72hvhf-640-670-anti-dust>
- [149] “SUN-7.6/8K-SG01LP1-EU Inverter Company, Supplier | Deye Inverter Technology.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.deyeinverter.com/product/single-phase-low-voltage-hybrid-inverter/sun7-6-8ksg01lp1eu-7-68kw-single-phase-2-mppt-hybrid-inverter-lv-battery-supported.html>
- [150] “STC - PVsyst documentation.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.pvsyst.com/help/glossary/pv-components/pvmodule-stc.html>
- [151] “NOCT definition - PVsyst documentation.” Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.pvsyst.com/help/project-design/array-and-system-losses/array-thermal-losses/noct-definition.html>
- [152] C. Nzoundja Fapi, P. Wira, and M. Kamta, *An Adaptive Fuzzy Logic Algorithm for Maximum Power Point Tracking under Partial Shading of a Solar Photovoltaic System*. 2021.
- [153] N. Zhani and H. Mahmoudi, “Comparison of the performance of MPPT control techniques (Fuzzy Logic, Incremental Conductance and Perturb & Observe) under MATLAB/Simulink,” *IFAC-Pap.*, vol. 58, no. 13, pp. 617–623, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.551.
- [154] H. Abbes, K. Loukil, A. Hafedh, M. Abid, and A. Toumi, “Implementation of Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Fuzzy Logic Controller on FPGA,” Mar. 2022.
- [155] X. Ma, S. Bader, and B. Oelmann, “On the Performance of the Two-Diode Model for Photovoltaic Cells Under Indoor Artificial Lighting,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 1350–1361, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047158.

- [156] J. Nafack Nihako *et al.*, “Realistic Modeling of Photovoltaic Solar Cell: A Simple and Accurate Two-Diode Model,” *Appl. Res.*, vol. 4, no. 2, p. e70010, Apr. 2025, doi: 10.1002/appl.70010.
- [157] S. B. Prakash, G. Singh, and S. Singh, “Modeling and Performance Analysis of Simplified Two-Diode Model of Photovoltaic Cells,” *Front. Phys.*, vol. 9, p. 690588, Oct. 2021, doi: 10.3389/fphy.2021.690588.
- [158] Usman, A. R. Idris, Sofyan, and I. Syamsuddin, “Pemodelan dan Simulasi Photovoltaic Menggunakan Pendekatan Model Tiga Diode,” *J. Nas. Tek. Elektro Dan Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 4, pp. 423–429, Dec. 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i4.688.
- [159] M. Rawa *et al.*, “Single Diode Solar Cells—Improved Model and Exact Current–Voltage Analytical Solution Based on Lambert’s W Function,” *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4173, May 2022, doi: 10.3390/s22114173.
- [160] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.
- [161] R. T. Ahmad Hamdi, “Solar cell system simulation using Matlab-Simulink,” *Kurd. J. Appl. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 45–51, Jun. 2017, doi: 10.24017/science.2017.1.5.
- [162] W. Shockley, “The Theory of  $p$ - $n$  Junctions in Semiconductors and  $p$ - $n$  Junction Transistors,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 28, no. 3, pp. 435–489, Jul. 1949, doi: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x.
- [163] G. Walker, “Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB PV Model,” vol. 21, pp. 1–8, 2001.
- [164] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.010.
- [165] G. Rouleu, “Why you should never break a continuous algebraic loop with a Memory block,” Guy on Simulink. Accessed: Apr. 30, 2026. [Online]. Available: <https://blogs.mathworks.com/simulink/2015/07/18/why-you-should-never-break-an-algebraic-loop-with-with-a-memory-block/>

- [166] M. Hofmann and G. Seckmeyer, “Influence of Various Irradiance Models and Their Combination on Simulation Results of Photovoltaic Systems,” *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1495, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10101495.
- [167] A. Bennani-Ben Abdelghani and H. Ben Attia Sethom, “Modeling PV installations under partial shading conditions,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 4, p. 627, Apr. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2458-0.
- [168] N. A. Windarko, M. Nizar Habibi, B. Sumantri, E. Prasetyono, Moh. Z. Efendi, and Taufik, “A New MPPT Algorithm for Photovoltaic Power Generation under Uniform and Partial Shading Conditions,” *Energies*, vol. 14, no. 2, p. 483, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14020483.
- [169] “Клімат Києва, погода по місяцях, середня температура (Україна) - Weather Spark.” Accessed: Apr. 30, 2026. [Online]. Available: <https://weatherspark.com/y/96633/Average-Weather-in-Kiev-Ukraine-Year-Round#Figures-CloudCover>
- [170] W.-C. Yang, “The Shannon-Nyquist sampling theorem and its applications,” presented at the Proceedings of the 26th Asian Technology Conference in Mathematics (ATCM 2021), 2021, pp. 23–40. Accessed: Apr. 30, 2026. [Online]. Available: <https://atcm.mathandtech.org/EP2021/invited/32102/Shannon-Nyquist%20Sampling.pdf>
- [171] “Choose an ODE Solver - MATLAB & Simulink.” Accessed: Apr. 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html>
- [172] C. Saiprakash, A. Mohapatra, A. Manna, and A. Nandi, “Hybrid Array Configurations to Reduce Mismatch Loss of a PV Array under Partial Shading Conditions,” in *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCCSP)*, Hyderabad, India: IEEE, Jul. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICICCCSP53532.2022.9862478.
- [173] A. H. A. Al-Waeli, H. A. Kazem, M. T. Chaichan, and K. Sopian, *Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-27824-3.

- [174] Hanen Messaoudi, A Ben, Afef Bennani-Ben Abdelghani, mrabet bellaaj Najiba, and Mohamed Orabi, “Design and implementation of a solar PV emulator,” presented at the First International Refrigeration Energy and Environment Colloquium (IREEC1), Mar. 2016. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/316082045\\_Design\\_and\\_implementation\\_of\\_a\\_solar\\_PV\\_emulator](https://www.researchgate.net/publication/316082045_Design_and_implementation_of_a_solar_PV_emulator)
- [175] I. Moussa, A. Khedher, and A. Bouallegue, “Design of a Low-Cost PV Emulator Applied for PVECS,” *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 232, Feb. 2019, doi: 10.3390/electronics8020232.
- [176] I. González, J. M. Portalo, and A. J. Calderón, “Configurable IoT Open-Source Hardware and Software I-V Curve Tracer for Photovoltaic Generators,” *Sensors*, vol. 21, no. 22, p. 7650, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21227650.
- [177] “Solcast API,” Solcast API. Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.solcast.com.au>
- [178] “API [Forecast.Solar].” Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: <https://doc.forecast.solar/doku.php?id=api>
- [179] М. О. Підгайний, А. В. Пісоцький, та Є. Ю. Становський, «Використання відкритих веб-ресурсів для прогнозування генерації фотоелектричних модулів», *Сучасні електромеханічні та інформаційні системи*, с. 135–141, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19941/1/SEIS\\_mono\\_2021\\_P135-141.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19941/1/SEIS_mono_2021_P135-141.pdf)

## ДОДАТОК А.

*Список опублікованих праць за темою дисертації*

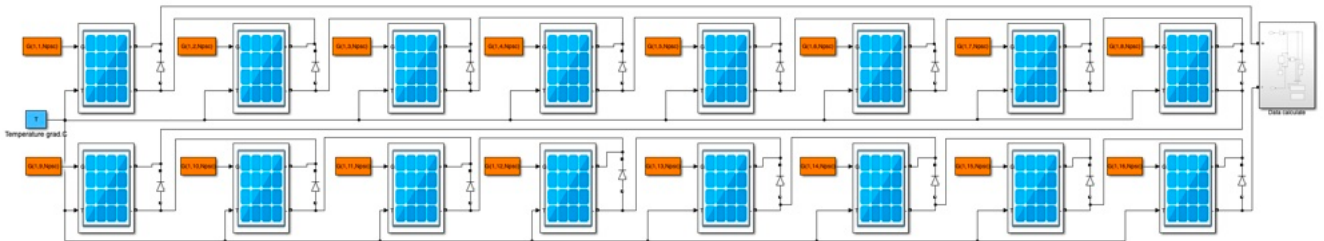
1. O. Shavolkin, I. Shvedchykova, H. Kruhliak, T. Bila, A. Pisotskyi, “Determining photovoltaic array configurations with reduced impact of partial shading on energy performance,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 8 (139), pp. 27–36, Feb. 2026, doi: [10.15587/1729-4061.2026.352343](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352343).
2. О. Шавьолкін, І. Шведчикова, Г. Кругляк, Р. Марченко, А. Пісоцький, “Розроблення експериментальної установки для випробувань програмно-апаратних засобів управління мікроенергетичними мережами локальних об’єктів,” *Вісник КНУТД. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, vol. 148, no. 4, pp. 14–24, Mar. 2021, doi: [10.30857/1813-6796.2020.4.1](https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.4.1).
3. О. Шавьолкін, І. Шведчикова, Г. Кругляк, Є. Становський, М. Підгайний, “Програмно-технічний комплекс управління підключеною до мережі фотоелектричною системою з акумулятором для забезпечення власних потреб локального об’єкта,” *Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика*, vol. 23, no. 2, pp. 20–27, Dec. 2020, doi: [10.31474/2074-2630-2020-2-20-27](https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-2-20-27).
4. О. Шавьолкін, Г. Кругляк, Р. Марченко, Є. Становський, М. Підгайний, “Моделювання енергетичних процесів в гібридній фотоелектричній системі з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Технології та інжиніринг. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, no. 3, pp. 28–38, Jan. 2022, doi: [10.30857/2786-5371.2021.3.3](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.3).
5. О. Шавьолкін, Г. Кругляк, Р. Марченко, Є. Становський, М. Підгайний, “Визначення параметрів фотоелектричної системи з акумулятором для потреб локального об’єкту,” *Технології та інжиніринг. Мехатронні системи. Енергоефективність та ресурсозбереження*, no. 4, pp. 41–50, Jan. 2022, doi: [10.30857/2786-5371.2021.4.4](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.4).
6. A. Shavelkin, J. Gerlici, I. Shvedchykova, K. Kravchenko, H. Kruhliak, “Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 36–42, Apr. 2021, doi: [10.20998/2074-272X.2021.2.06](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.06).

## ДОДАТОК Б.

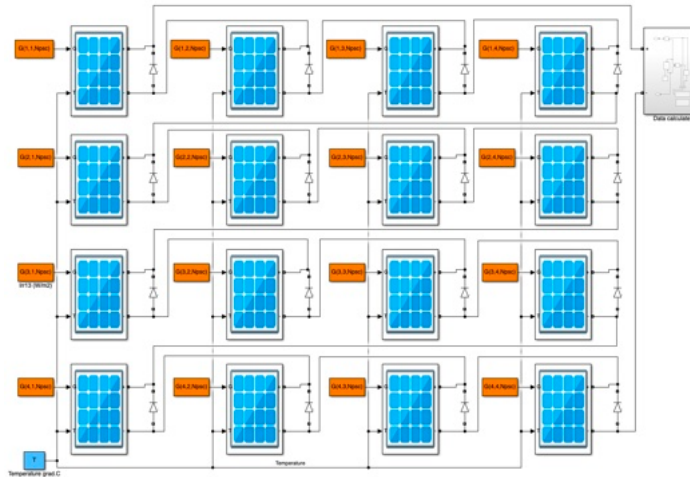
## Програмна реалізація і моделювання MATLAB/Simulink

## Б.1 Дослідні моделі MATLAB/Simulink

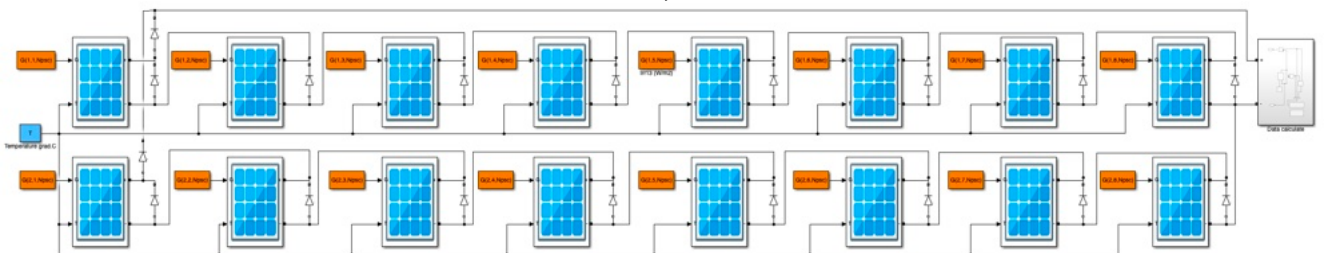
Дослідні моделі MATLAB/Simulink для послідовних і послідовно-паралельних конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП 1x16, 2x8, 4x4 згідно рис.3.1 показані на рис. Б1.



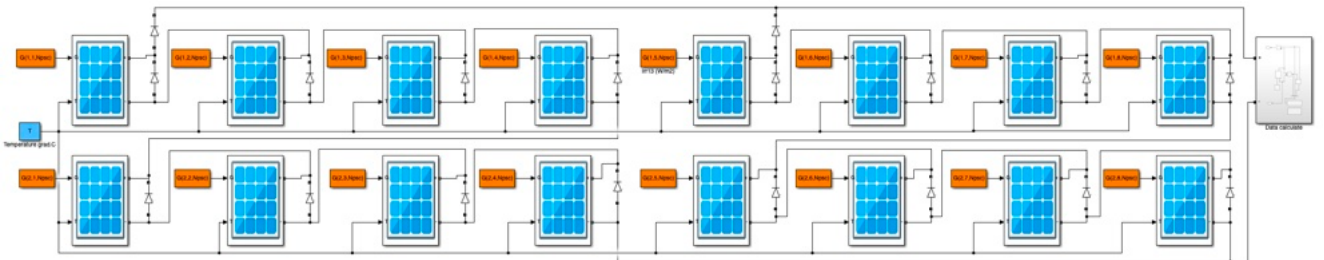
а)



б)



в)



г)

Рис. Б.1 Моделі MATLAB/Simulink конфігурацій ФЕМ: а) 16S-1P\_1 (1x16), б) 16S-1P\_4 (4x4), в) 8S-2P\_1 (2x8), г) 8S-2P\_2 (2x8)

### Б.2 Шаблини затінення ФЕМ

Розроблені в середовищі Ехсел шаблини затінення для конфігурації масиву 1×16 для проміжних напрямків (кути 76° і 63°) наведено на рис.Б2.

а)

б)

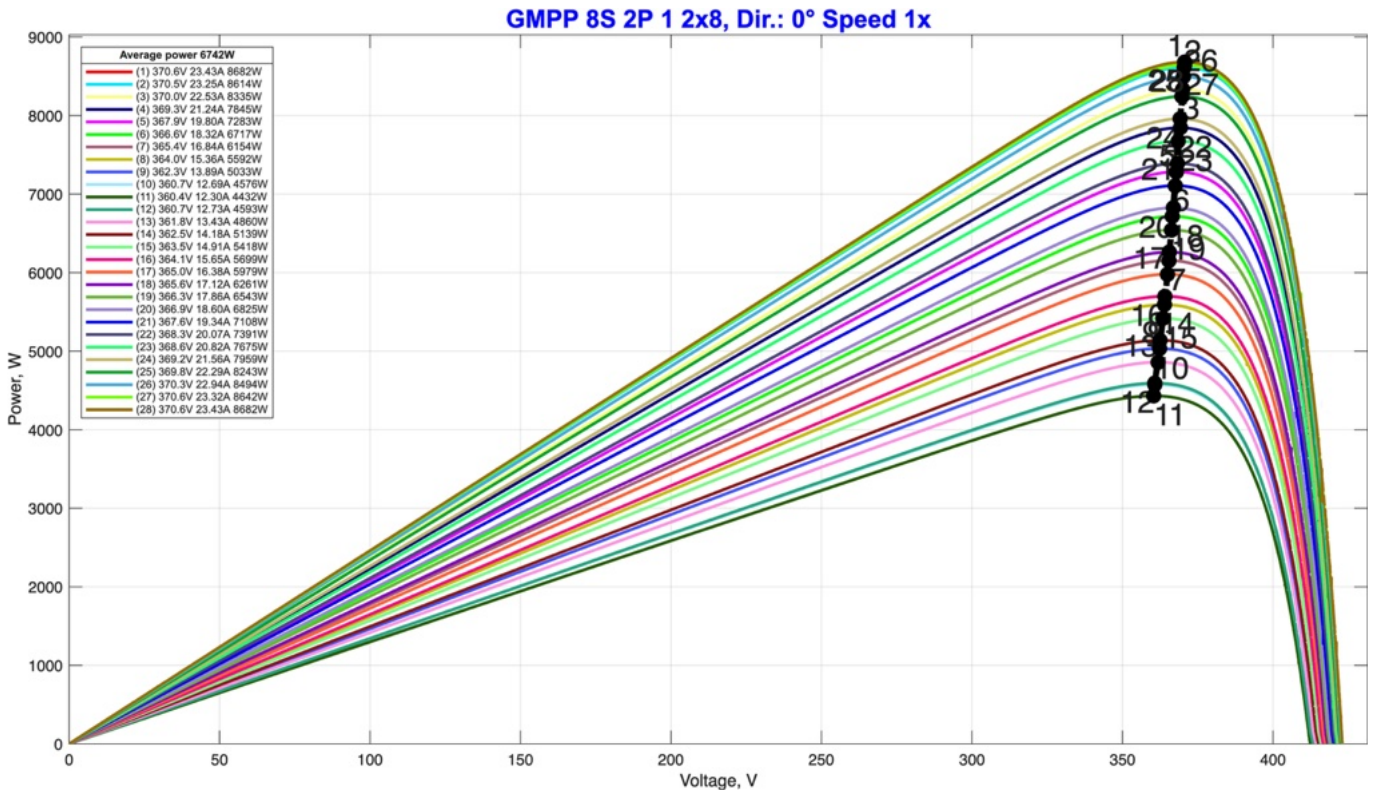
Рис. Б.2 Шаблини затінення ФЕМ 1×16: а) кут 76°, б) кут 63°

### ***Б.3 Графічні результати моделювання динамічних режимів роботи ФЕМ***

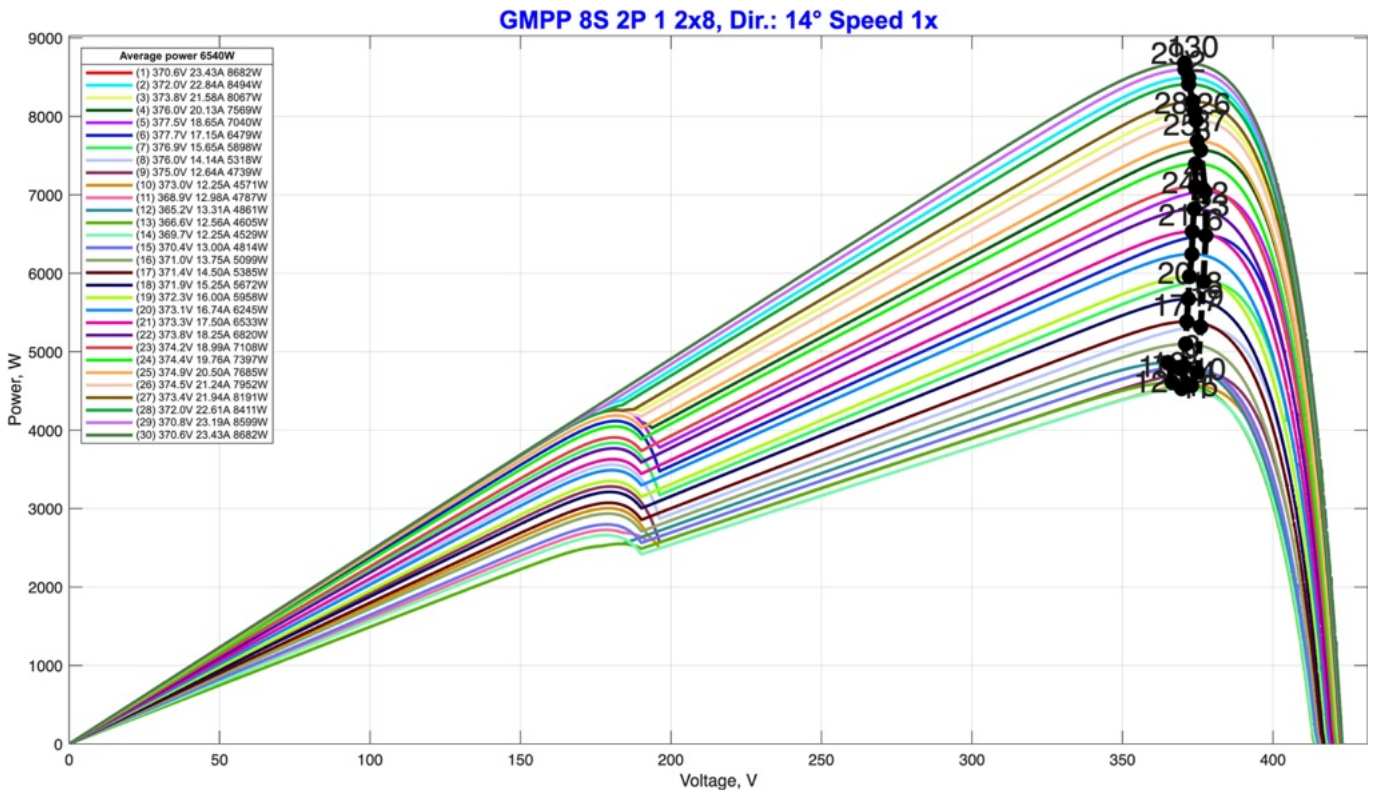
Надалі наведено графіки (рис. Б.3) моделювання класичної конфігурації 8S-2P (2x8) (рис. 3.1, д) ФЕМ в умовах динамічного проходження смуги затінення через робочу поверхню панелей під різними кутами до фронту масиву. На відміну від основної частини дисертаційного дослідження, де для оптимізації обсягу наведено лише фрагменти екстремальних ділянок, у додатках відображено повні сімейства  $P - U$  характеристик. Аналіз виконано для кутів  $0^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $63^\circ$  та  $76^\circ$ .

Кожен рисунок відображає набір статичних  $P - U$  характеристик масиву на різних етапах просування тіні. Графіки побудовані у двовимірній системі координат, де по осі абсцис відкладено значення вихідної напруги масиву (В), а по осі ординат — генерована активна потужність (Вт). Для кращого візуального сприйняття та зручного порівняння різних режимів роботи, в сусідніх графіках обрано контрастні кольори. Рисунки супроводжується легендою, в якій для кожної розрахованої кривої (із кроковим індексом від початку до завершення процесу затінення) наведено координати GMPP, а саме: значення робочої напруги, вихідного струму та результуючої потужності ФЕМ.

Послідовна зміна положення GMPP показана за допомогою штрихової лінії траєкторії і біля кожної точки нанесено відповідний цифровий індекс, який відображає хронологічну послідовність кроків під час руху затіняючої смуги. Характерною закономірністю отриманих результатів є виражене зростання як абсолютної, так і відносної (нормованої до напруги холостого ходу ФЕМ —  $U_{OC}$ ) амплітуди коливань робочої точки MPPT-контролера. При фронтальному русі смуги в  $0^\circ$  (рис. Б.3, а) викривлення є мінімальним, а траєкторія GMPP зосереджена у вузькому діапазоні напруг. Проте зі збільшенням кута нахилу лінії затінення аж до граничного досліджуваного значення в  $76^\circ$  (рис. Б.3, е), амплітуда пошукових коливань та стрибків контролера досягає свого максимуму, що обумовлено появою множини локальних максимумів.



a)



б)

Рис. Б.3  $P - U$  характеристики ФЕМ конфігурації 8S – 2P(2x8):

а) 0°, б) 14°, в) 27°, г) 45°, д) 63°, е) 76°.

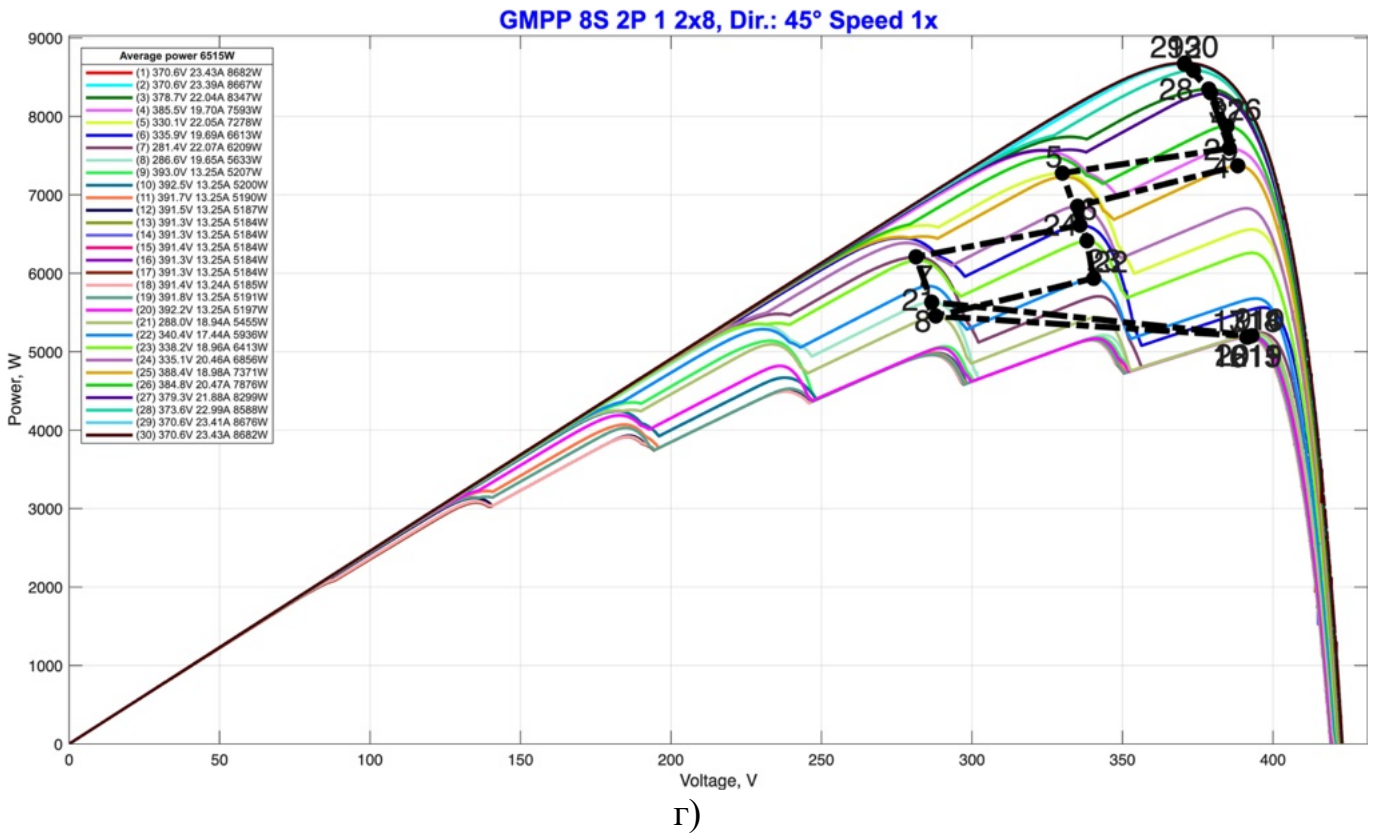
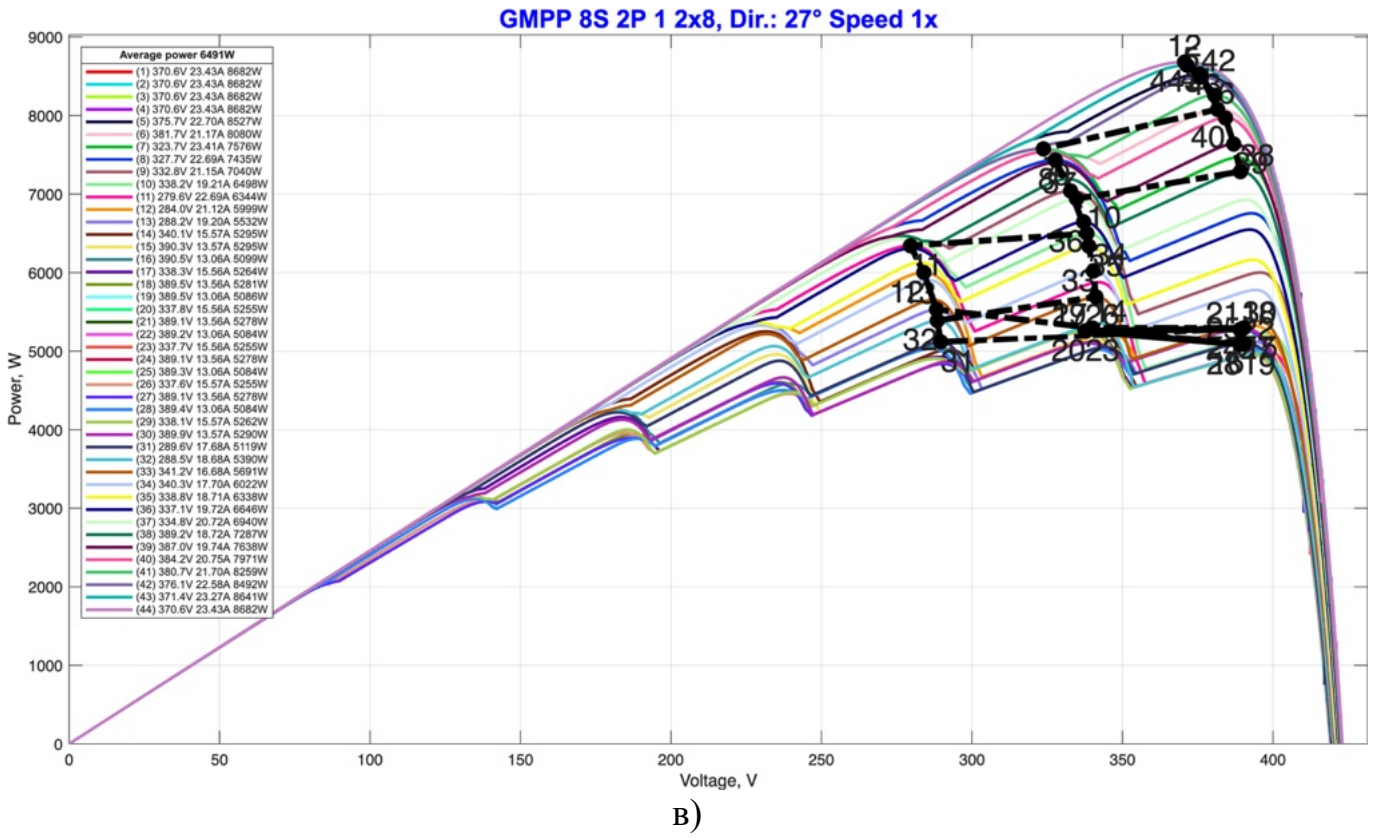


Рис. Б.3 (продовження)  $P - U$  характеристики ФЕМ конфігурації 8S – 2P(2x8):

а) 0°, б) 14°, в) 27°, г) 45°, д) 63°, е) 76°.

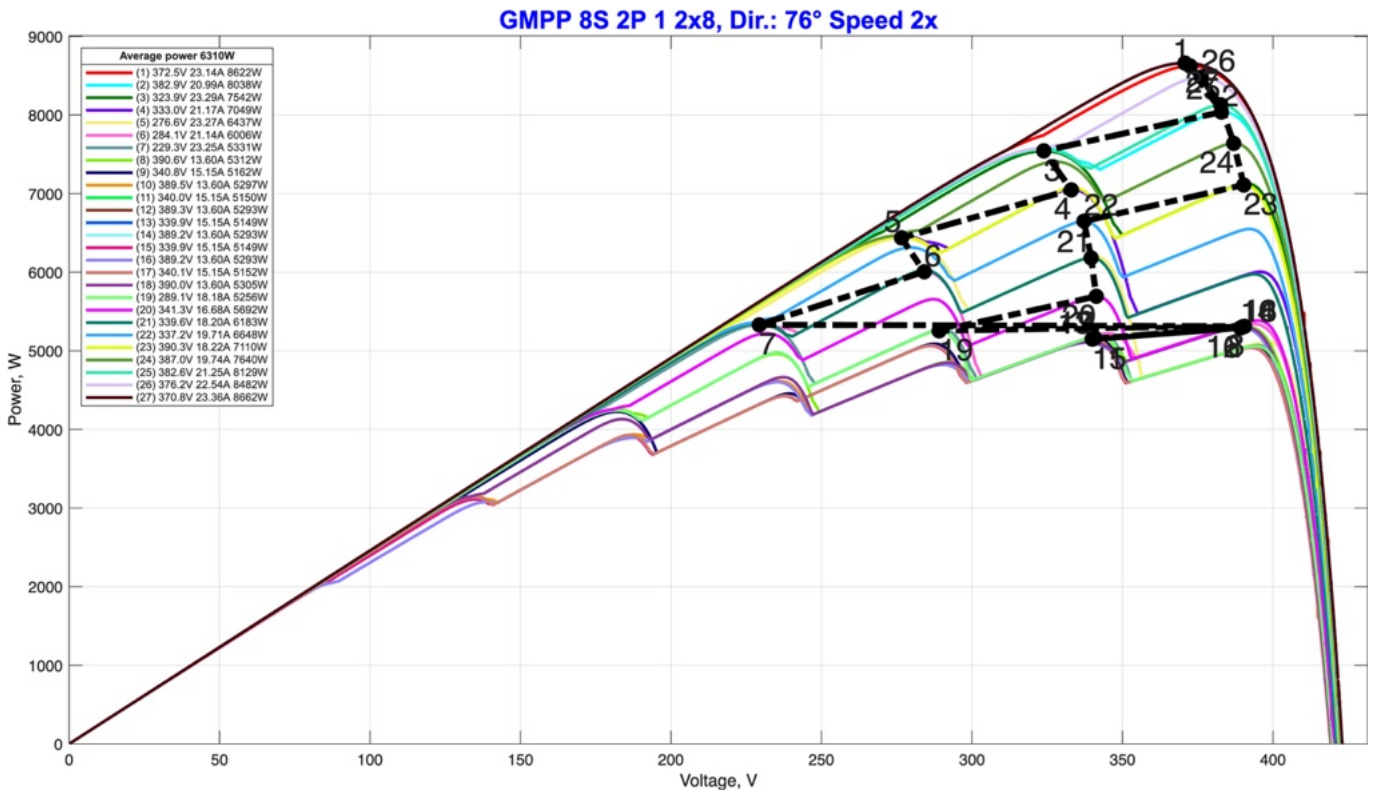
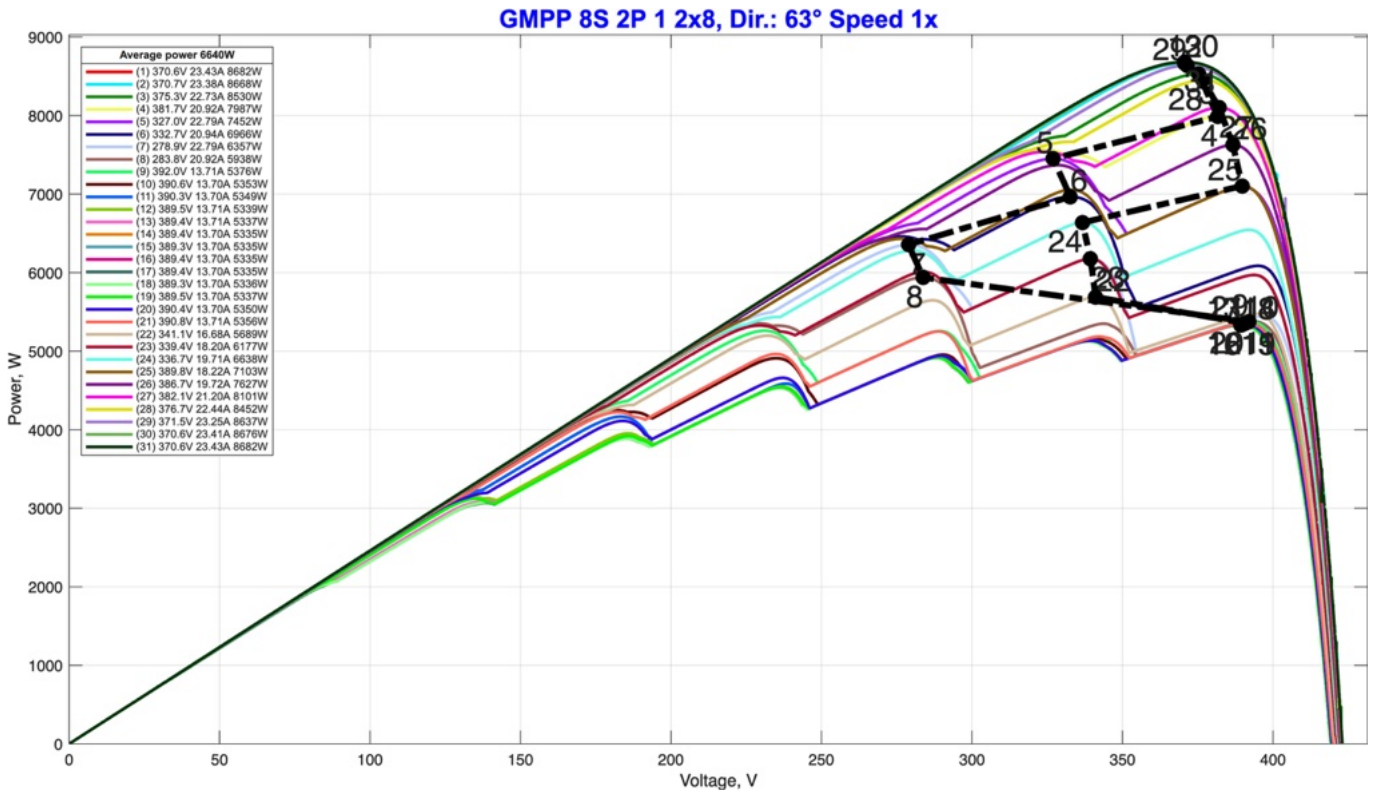


Рис. Б.3 (продовження)  $P - U$  характеристики ФЕМ конфігурації 8S – 2P(2x8):

а) 0°, б) 14°, в) 27°, г) 45°, д) 63°, е) 76°.

#### Б.4. Моделювання конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП

Нормалізація параметрів табл. 3.4 (1 = найкраще, 0 = найгірше):

- де більше краще ( $P_{GMPP}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ):  $X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ ,
- де менше краще ( $\Delta P_L$ ,  $\Delta U_{PWM}$ ,  $\delta U_{PWMp}$ ):  $X_{norm} = 1 - \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ .

Таблиця Б.4 Нормалізовані параметри ФЕМ за час проходження полоси затінення

Конфігурація ФЕМ			Параметри ФЕМ					
Електрично	Геометрично	Назва	$P_{GMPP}$ (W)	$\Delta P_L$ (%)	$FF$ (%)	$\eta$ (%)	$\Delta U_{PWM}$ (V)	$\delta U_{PWMp}$ (%)
1x16 (1P-16S)	1x16	16S_1P_1_1x16	0,59	0,53	0,19	0,00	0,19	0,20
	2x8	16S_1P_2_2x8	0,08	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
		16S_1P_3_2x8	0,17	0,10	0,00	0,10	0,19	0,20
	4x4	16S_1P_4_4x4	0,00	0,21	0,28	0,52	0,52	0,54
		16S_1P_5_4x4	0,00	0,21	0,28	0,52	0,52	0,54
2x8 (2P-8S)	2x8	8S_2P_1_2x8	0,21	0,17	0,07	0,14	0,63	0,22
		8S_2P_2_2x8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		8S_2P_3_2x8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		8S_2P_4_2x8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	4x4	8S_2P_5_4x4	0,04	0,26	0,39	0,57	0,78	0,54
		8S_2P_6_4x4	0,09	0,14	0,52	0,67	0,77	0,51
		8S_2P_7_4x4	0,09	0,14	0,52	0,67	0,77	0,51

#### Б.5. Аналіз результатів моделювання конфігурацій фотоелектричних масивів

Результати порівняння симуляцій зведені в табл.3.5, де стовпчики:

1. Електричне з'єднання в конфігурації ФЕМ.
2. Геометричний вид ФЕМ (ряд x стовпчик).
3. Назва конфігурації ФЕМ.
4. Усереднена генерація ФЕМ за час проходження полоси затінення, Вт.
5. Збільшення генерації ФЕМ відносно класичної конфігурації  $\delta_p$  (більше - краще), %.

6. Усереднені неузгоджені втрати потужності ФЕМ за час проходження полоси затінення, %.
7. Зменшення неузгоджених втрат потужності ФЕМ відносно класичної конфігурації (більше - краще), %.
8. Усереднений фактор заповнення ФЕМ за час проходження полоси затінення, %.
9. Збільшення фактору заповнення ФЕМ відносно класичної конфігурації (більше - краще), %.
10. Усереднена ефективність ФЕМ за час проходження полоси затінення, Вт.
11. Збільшення ефективності ФЕМ відносно класичної конфігурації (більше - краще), %.
12. Амплітуда відхилень робочої точки МРРТ-контролера інвертора (max-min) ФЕМ за час проходження полоси затінення, В (менше - краще).
13. Зменшення амплітуди відхилень робочої точки МРРТ-контролера інвертора ФЕМ відносно класичної конфігурації (більше - краще), %.
14. Відносна до  $U_{OC}$  амплітуда відхилень робочої точки МРРТ-контролера інвертора ФЕМ (менше - краще), %.

Порівняння виконано для розроблених конфігурацій з обмеженням до двох ФЕП на рядок (дворядні 2x4...2x10 та трирядні 3x4, 3x6) і для повністю послідовних варіантів (1P-8S, 1P-10S, 1P-12S), а також з великими трирядними масивами (3x8, 2x12).

Усереднена генерація зростає зі збільшенням загальної кількості ФЕП у масиві: від ~3.3 кВт у найменших конфігураціях до ~9.8 кВт у найбільших (табл. 3.5, стовпчик 4). Це відображає очікувану залежність сумарної потужності від числа ФЕП при однакових умовах освітлення. Конфігурації демонструють поступове збільшення усередненої генерації від ~3.5 кВт 4S-2P(2x4) до ~8.7 кВт 10S-2P(2x10).

Відносне підвищення генерації у розроблених 2P-S конфігураціях зазвичай знаходиться в діапазоні +5...+8% порівняно з відповідними класичними еталонами (стовпчик 5). Мінімальне відносне підвищення спостерігається у деяких трирядних варіантів +2.4% для 9S-2P(3x6), максимальне - до +8.0% для 8S-2P(2x8).

Трирядні конфігурації 6S-2P(3x4) і 9S-2P(3x6) показують конкурентну генерацію з додатковою стійкістю до неузгодженостей. Найпотужніша конфігурація 12S-2P(3x8) має усереднену генерацію 9835 Вт, що лише незначно відрізняється від класичної 12S-2P(2x12) - 9858 Вт (стовпчик 4).

Розроблені послідовні варіанти 8S-1P, 10S-1P, 12S-1P демонструють невелике зниження усередненої генерації відносно класичних паралельно-послідовних схем (наприклад, 3269 Вт і 3496 Вт для 2x4, 4086 Вт і 4328 Вт для 2x5). Це пояснюється підвищеною чутливістю послідовних ланцюгів до локального затінення, коли одна затемнена панель обмежує струм у всьому ланцюгу.

Конфігурація 4S-2P(2x4) показує +6.7% генерації, зменшення неузгоджених втрат на 20.2%, фактор заповнення 79.8% (+9.9%). Для 6S-2P(2x6): +7.0% генерації, фактор заповнення  $\approx 75.2\%$  (+9.5%), а для 8S-2P(2x8): +8.0% генерації - одне з найбільших відносних підвищень серед розроблених (стовпчики 5, 7, 9, 11).

Для великого трирядного масиву 12S-2P(3x8) спостерігається невелике зниження генерації, але одночасне підвищення ефективності та фактора заповнення (+4.8% ефективності), що вказує на компроміс між сумарною потужністю і якістю використання доступної площі.

В розроблених послідовних конфігураціях 8S-1P, 10S-1P, 12S-1P відносні показники або практично не змінюються, або трохи погіршуються, що підтверджує їхню підвищену вразливість до затінення.

Класичні конфігурації мають мінімальну абсолютну амплітуду MPPT 51 В (2P-4S) і максимальну 214 В (2P-12S). У відносному вираженні до  $U_{OC}$  мінімум - 22.3% (2P-5S), максимум - 38.8% (2P-8S) (стовпчики 12–14).

Розроблені топології дозволили зменшити амплітуду коливань MPPT як в абсолютних значеннях, так і відносно  $U_{OC}$ . Мінімальне зменшення абсолютної амплітуди - 6 В (порівняно з еталоном), максимальне - 162 В (9S-2P).

Відносне зменшення до  $U_{OC}$  варіює від 2.7% (4S-2P) до 25.8% (3x8). Це свідчить про підвищену стабільність робочої точки інвертора у багатьох розроблених схемах. Як приклад в трирядній 12S-2P(3x8) амплітуда зменшилась з

214 В до 159 В, а відносна величина - з 34.8% до 25.8%, що робить цю конфігурацію привабливою для систем з жорсткими вимогами до стабільності МРРТ.

Повністю послідовні варіанти (1P-8S, 1P-10S, 1P-12S) не показали суттєвих змін у відносних амплітудах МРРТ порівняно з класичними схемами.

### ***Б.6. Скрипт ініціалізації та налаштування параметрів PV\_Panel.m***

Опис: Блок відповідає за підготовку констант і вхідних даних ФЕП для симуляції.

```
% PV_Panel.m – константи для розрахунків Gn, Impp, Isc, K, Kden, Ki, Knum,
% Kv, Np, Ns, PV_size, Pmpp, Rs, Rsh, T, T0, Tdel, Tn, Vmpp, Voc, a, ns, q
q=1.60217646e-19; % заряд електрона (C)
K=1.3806503e-23; % постійна Больцмана (J/K)
T0=273.15; % перерахунок Цельсій-Кельвін (grad)
Ns=1; % кількість модулів, з'єднаних послідовно в масив
Np=1; % кількість модулів, з'єднаних паралельно в масив
a=1.1; % коефіцієнт ідеальності діода (зазвичай 1...2)
T=30; % робоча температура Цельсій (grad)
% STC
Tn=25; % STC температура Цельсій (grad) C
Gn=1000; % G STC, W/m^2
% ФЕП Longi Solar Hi-MO X10 Explorer LR7-72HVN 655M
ns=72; % кількість комірок у фотоелектричному модулі
Pmpp=655; % Wmpp STC, W
Vmpp=44.66; % Vmpp STC, V
Impp=14.67; % Impp STC, A
Voc=54; % Voc STC, V
Isc=15.37; % Isc STC, A
Kv=-0.2*Voc/100; % V/K
Ki=0.05*Isc/100; % A/K
Rs=2e-3; % послідовний опір комірки, Ohm
Rsh=1e3; % паралельний опір комірки, Ohm
PV_size=[1.134,2.382];% геометричний розмір ФЕП (ширина, висота), m
% Параметри передавальної функції першого порядку:
Tdel=1e-4; % постійна часу
Knum=1; % коефіцієнт чисельника
Kden=Knum; % коефіцієнт знаменника
```

### ***Б.7. Скрипт формування базових шаблонів затінення array\_16.m***

Опис: Блок здійснює імпорт розроблених у середовищі Excel первинних цифрових масок, що описують геометрію смуги затінення під різними кутами до фронту масиву: 0°, 14°, 27°, 45°, 63° та 76° з подальшим масштабуванням та програмною обробкою («розтягування» та математична корекція).

```
% array_16.m – код для "розтягування" (масштабування) масиву в цілу кількість
% раз в GreVar помістити масив, а в scaleFactor – коефіцієнт розтягування
GreVar = [...
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400;
```

```

800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 600 400 500 600 700 800 800 800 800 800 800;
800 800 800 600 400 500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 800 600 400 500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 600 400 500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
600 400 500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
400 500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
500 600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
600 700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
700 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800;
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800
];
% === Параметри ===
scaleFactor = 3; % 3x розтягнення
[nRows, nCols] = size(GreVar);
nInterpRows = (nRows - 1) * scaleFactor + 1;
% === Ініціалізація нового масиву ===
GreVarInterp = zeros(nInterpRows, nCols);
% === Інтерполяція ===
rowIdx = 1;
for i = 1:nRows-1
    for s = 0:scaleFactor-1
        alpha = s / scaleFactor;
        GreVarInterp(rowIdx, :) = (1 - alpha) * GreVar(i, :) + alpha *
GreVar(i+1, :);
        rowIdx = rowIdx + 1;
    end
end
GreVarInterp(rowIdx, :) = GreVar(end, :); % Додавання останнього рядка
GreVarInterp = round(GreVarInterp);
GreVarInterp = round(smoothdata(GreVarInterp, 'gaussian', 4));
fid = fopen('get_smooth_gre.m', 'w'); % Відкриваємо файл для запису
fprintf(fid, 'GreVar_smooth = [\n'); % Записуємо початок змінної
% Цикл по рядках масиву
[rows, cols] = size(GreVarInterp);
for i = 1:rows
    % Записуємо один рядок значень, розділених табуляцією
    fprintf(fid, '\t'); % відступ для краси
    fprintf(fid, '%g\t', GreVarInterp(i, :));
    % Додаємо крапку з комою та перенос рядка
    if i < rows
        fprintf(fid, ';\n');
    else
        fprintf(fid, '\n'); % останній рядок без крапки з комою всередині дужок
    end
end
fprintf(fid, '];\n'); % Закриваємо дужку та файл
fclose(fid);

disp('Масив збережено у get_smooth_gre.m у прямокутному вигляді.');
```

### Б.8. Скрипт запуску симуляцій PV\_16\_Degrees\_All.m

Опис: Головний скрипт автоматизованого запуску симуляцій, який виконує ітераційний розрахунок енергетичних характеристик фотоелектричних масивів різної конфігурації за умов динамічного затінення при заданих кутах руху полоси затінення, обробку отриманих даних та їх експорт у звіт.

```
% PV_16_Degrees_All.m – Код симуляції масивів з різними кутами
% полоси затінення до фронту масиву 76, 63, 45, 27, 14, 0
clc;      % Очистити командне вікно
clear;    % Очистити робочий простір
PV_Panel; % завантаження даних панелі
modellist = {
    'PV_16S_1P_1_1x16' % (рис.3.1 а)
    'PV_16S_1P_2_2x8'  % (рис.3.1 б)
    'PV_16S_1P_3_2x8'  % (рис.3.1 в)
    'PV_16S_1P_4_4x4'  % (рис.3.1 з)
    'PV_16S_1P_5_4x4'  % (рис.3.1 и)
    'PV_8S_2P_1_2x8'   % (рис.3.1 д)
    'PV_8S_2P_2_2x8'   % (рис.3.1 е)
    'PV_8S_2P_3_2x8'   % (рис.3.1 г)
    'PV_8S_2P_4_2x8'   % (рис.3.1 ж)
    'PV_8S_2P_5_4x4'   % (рис.3.1 к)
    'PV_8S_2P_6_4x4'   % (рис.3.1 л)
    'PV_8S_2P_7_4x4'   % (рис.3.1 м)
};
degList = [76 63 45 27 14 0]; % Створюємо масив кутів
% Створюємо масив для збереження результатів ширини і висоти масивів
heightArray = zeros(1, length(modellist));
widthArray = zeros(1, length(modellist));
for i = 1:length(modellist)
    % Регулярний вираз:
    % (\d+) – перша група цифр (висота)
    % x      – роздільник
    % (\d+) – друга група цифр (ширина)
    % $      – якір кінця рядка
    tokens = regexp(modellist{i}, '(\d+)x(\d+)$', 'tokens');
    if ~isempty(tokens)
        % tokens{1}{1} – це перша група (\d+)
        % tokens{1}{2} – це друга група (\d+)
        heightArray(i) = str2double(tokens{1}{1});
        widthArray(i) = str2double(tokens{1}{2});
    end
end
end
FrameSpeed = ["1x", "2x", "3x", "4x"]; % 4 швидкості
% Ініціалізація двовимірного cell-масиву
% Рядки: моделі (size(modellist,1)), Столпці: кути (size(degList,2))
allResults = cell(size(modellist,1), size(degList,2));
for conf = 1:size(modellist,1) % цикл по конфігураціям
    % Витягуємо параметри масиву (height/width) з імені моделі
    tokens = regexp(modellist{conf}, '(\d+)x(\d+)$', 'tokens');
    if ~isempty(tokens)
        Nrow = str2double(tokens{1}{1}); % Висота (height)
        Ncol = str2double(tokens{1}{2}); % Ширина (width)
    end
end
for degrees = 1:size(degList, 2) % цикл по кутах
```



```

];
case 3 % 45 grad (48 row)
scale = 3; % крок вибірки з масиву
Gfull16 = [... % повна матриця освітлення
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
...
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800
];
case 4 % 27 grad
scale = 2; % крок арифметичної прогресії
Gfull16 = [... % повна матриця освітлення
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
...
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800
];
case 5 % 14 grad
scale = 1; % крок арифметичної прогресії
Gfull16 = [... % повна матриця освітлення
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
...
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800
];
case 6 % 0 grad
scale = 0; % масиви однакової довжини
Gfull16 = [... % повна матриця освітлення
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 ;
...
800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800
];
otherwise
%otherwise_statement
end
% === Параметри ===
nRows = size(Gfull16,1); % кількість рядків у масиві (наприклад, 70)
nPoints = 16; % кількість елементів у новому масиві
% === Формування масиву ===
% другий елемент обчислюється так, щоб останній (16-й) дорівнював nRows
secondElement = nRows - (nPoints-2)*scale;
% створення масиву
Gfull16row = zeros(1,nPoints);
Gfull16row(1) = 0;
Gfull16row(2) = secondElement;
for k = 3:nPoints
Gfull16row(k) = Gfull16row(k-1) + scale;
end
% Визначення кількості рядків (5-й елемент з Gfull10row)
numRows = Gfull16row(Ncol); % Отримаємо 25
% Визначення індексів стовпців (останні 5 стовпчиків)
% Використання функції size для універсальності, якщо кількість стовпців
зміниться
totalCols = size(Gfull16, 2);
colsRange = (totalCols - Ncol + 1) : totalCols;
% Створення нового масиву Gfull(25, 5)
% Вибір перших numRows рядків та визначення діапазону стовпців
Gfull = Gfull16(1:numRows, colsRange);

```

## Б.10. Скрипт аналітичної обробки результатів та візуалізації

### OutputDataPlot.m

Опис: Фільтрація шумів та перехідних процесів запуску, визначення локальних та глобальних максимумів потужності, побудова графіків  $P(U)$  для всього проходу тіні з траєкторією руху точки GMPP. Скрипт автоматично масштабує осі та додає цифрові мітки (1, 2, 3...), які відповідають номеру кадру проходження тіні, що дозволяє відстежити часову динаміку "блукання" точки MPPT.

```
% OutputDataPlot.m
% об'єкт із загального масиву:
out = allResults{conf, degrees}; % строка-модель, стовпчик-кут
% Очищення від помилок симуляції
isError = cellfun(@(x) ~isempty(x), {out.ErrorMessage});
out(isError) = [];
out = out'; % Транспонування для зручності звернення out(iv)
currentPSC = size(out, 2); % Кількість успішних кроків (PSC)
% Масиви для кольорів, типів та товщини ліній
ArrayRGB;
% Завдання розміру масиву
rows = PSC; % кількість шаблонів затінення
cols = 11; % вектори значень V, I, P і т.д.
% Ініціалізація масиву dataOut (10 стовпців)
% Стовпці: 1.PSC, 2.Voc, 3.Isc, 4.Vgmpp, 5.Igmpp, 6.Pgmpp, 7.dPL, 8.FF, 9.Eta,
10.dPWM
dataOut = zeros(currentPSC, 10);
Pmp_ref = 0; % Тимчасові змінні для розрахунків
%=====
% Створення нового вікна для графіків
f=figure('Units', 'pixels', 'Position', [0 50 1440 747]);%% права половина
дисплея
%=====
for iv = 1:currentPSC
    % Отримання сигналів V, I, P з DataPV
    try
        raw_data = out(iv).DataPV.signals.values;
    catch
        % Якщо дані в іншому форматі
        raw_data = out(iv).logouts.get('DataPV').Values.Data;
    end
    raw_data(raw_data(:, 3) < 0.1, :) = [];% Видалення шумів
    % Запис даних в dataOut
    V = raw_data(:, 1);
    I = raw_data(:, 2);
    P = raw_data(:, 3);
    % Пошук точки GMPP
    [P_max_P, idx] = max(P);
    V_max_P = V(idx);
    I_max_P = I(idx);
    % Voc та Isc (максимальні значення на кривій)
    Voc_val = max(V);
    Isc_val = max(I);
    % Еталонна потужність для розрахунку втрат (беремо з 1-ї симуляції - без
    тіні)
```

```

if iv == 1, Pmp_ref = P_max_P; end
% Заповнення стовпців 1-6
dataOut(iv, 1) = iv; % 1. Номер кроку
dataOut(iv, 2) = round(Voc_val, 1); % 2. Напруга х.х.
dataOut(iv, 3) = round(Isc_val, 2); % 3. Струм к.з.
dataOut(iv, 4) = round(V_max_P, 1); % 4. Напруга GMPP
dataOut(iv, 5) = round(I_max_P, 2); % 5. Струм GMPP
dataOut(iv, 6) = round(P_max_P, 0); % 6. Потужність GMPP
% Неузгоджені втрати deltaPL (%)
if Pmp_ref > 0
    dataOut(iv, 7) = round(((Pmp_ref - P_max_P) / Pmp_ref) * 100, 1);
else
    dataOut(iv, 7) = 0;
end
% Фактор заповнення FF(%)=(Pmpp)/(Voc*Isc)
if (Voc_val * Isc_val) > 0
    dataOut(iv, 8) = round((V_max_P * I_max_P) / (Voc_val * Isc_val) * 100,
1);
end
% Ефективність Eta (%)
% PV_size(1) та PV_size(2) – розміри однієї панелі
% G_step_mean(iv) – середня інсоляція для цього кроку
area_total = PV_size(1) * PV_size(2) * (Nrow * Ncol);
if (G_step_mean(iv) * area_total) > 0
    dataOut(iv, 9) = round((P_max_P) / (G_step_mean(iv) * area_total) * 100,
1);
end
%====
% Додавання маркера та тексту з значеннями V та P на графік P-V
plot(V, P, 'Color', RGB(iv,:), 'LineWidth', 2);
gcf.WindowState = 'maximized';
axis([0 max(dataOut(:, 2))*1.02 0 max(dataOut(:, 6))*1.04]);
hold on; % Утримуємо графіки на одній підділянці
%====
end
% Розрахунок deltaVpwm (одне значення для всього циклу) – різниця між
% максимальною і мінімальною напругою GMPP протягом усього руху тіні
Vgmp_all = dataOut(:, 4);
dVpwm = max(Vgmp_all) - min(Vgmp_all);
dataOut(:, 10) = round(dVpwm, 1);
% Розрахунок відносної амплітуди ШИМ (одне значення для всього циклу)
% Це відношення deltaVpwm і Voc
Voc_all = dataOut(:, 2);
dVoc_all = max(Voc_all);
dataOut(:, 11) = round(dVpwm/dVoc_all*100, 1);
% Збереження отриманого масиву у загальну структуру (строка-модель, стовпчик-
кут)
dataOutFull{conf, degrees} = dataOut;
fprintf('Конфігурація %d, Кут %d: Обробка завершена. PSC=%d, dVpwm=%.1f\n', ...
conf, degrees, currentPSC, dVpwm);
%====
% Масив для збереження рядків легенди V-I
legend_entries1 = cell(rows, 1);
legend_entries2 = cell(rows, 1);
% Цикл для створення рядків легенди на графіку
for i = 1:rows
    % Формування рядка легенди з числами з масиву
    legend_entries1{i} = sprintf('%d ', i);
    legend_entries2{i} = [sprintf('%d) %.1fV %.2fA %dW', i, ...

```

```

    dataOut(i,4), dataOut(i,5), dataOut(i,6)]];
end
% вектори руху
verticalAlignments = {'bottom', 'top'};
horizontalAlignments = {'right', 'left'};
% Витягнення даних з масиву
Vn = dataOut(:, 4); % 4-й стовпець – V
In = dataOut(:, 5); % 5-й стовпець – I
Pn = dataOut(:, 6); % 6-й стовпець – P
for i = 1:iv
    plot(Vn, Pn, '-.o', 'LineWidth', 4, 'Color', 'black', 'MarkerSize', 6,
'MarkerFaceColor', 'black');
    % Додавання міток з номерами рядків
    if mod(i, 4) == 1 % 1-й елемент з кожних 4-х
        text(Vn(i), Pn(i), num2str(i), 'VerticalAlignment',
verticalAlignments{1}, 'HorizontalAlignment',
horizontalAlignments{1}, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'normal');
    elseif mod(i, 4) == 2 % 2-й елемент з кожних 4-х
        text(Vn(i), Pn(i), num2str(i), 'VerticalAlignment',
verticalAlignments{1}, 'HorizontalAlignment',
horizontalAlignments{2}, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'normal');
    elseif mod(i, 4) == 3 % 3-й елемент з кожних 4-х
        text(Vn(i), Pn(i), num2str(i), 'VerticalAlignment',
verticalAlignments{2}, 'HorizontalAlignment',
horizontalAlignments{2}, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'normal');
    elseif mod(i, 4) == 0 % 4-й елемент з кожних 4-х
        text(Vn(i), Pn(i), num2str(i), 'VerticalAlignment',
verticalAlignments{2}, 'HorizontalAlignment',
horizontalAlignments{1}, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'normal');
    end
end
% Додавання легенди
lgd=legend(legend_entries2(1:rows), 'Location', 'northwest', 'FontName',
'Arial', 'FontSize', 8);
PowerAve = round(mean(dataOutFull{conf, degrees}(:, 6)));
ttl2 = "Average power " + num2str(PowerAve) + "W";
title(lgd, ttl2);
mn = strrep(modellist{conf}, 'PV_', '');
mn = strrep(mn, '_', '');
ttl = "GMPP " + mn + ", Dir.: " + num2str(dw) + char(176)+ " Speed " +
FrameSpeed(speed);
% subplot(2, 1, 2); % Нижня підділянка для P-V
title(ttl, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'b');
xlabel('Voltage, V');
ylabel('Power, W');
grid on;
% збереження скріншотів симуляцій
% Зміна символу '_' на '-'
ttl = strrep(ttl, '/', '-');
ttl = strrep(ttl, ', Dir.:', '');
ttl = strrep(ttl, ' ', '_');
filename = ttl + '.png'; % ім'я файлу
exportgraphics(f, filename, 'Resolution', 300);

```

### ***Б.11. Скрипт паралельної симуляції ParSimDegAll.m***

Опис: Скрипт використовує функцію паралельної симуляції `parsim` замість класичного циклу `for`, де наступна симуляція починається тільки після завершення

попередньої. Функція `parsim` розподіляє об'єкти симуляції між доступними "воркерами" (ядрами процесора), створюючи ізольовані сесії Simulink для кожного розрахунку.

```
% ParSimDegAll.m – функція паралельної симуляції
% === Ініціалізація масиву SimulationInput ===
simIn = repmat(Simulink.SimulationInput(modelList{conf}), PSC, 1);
% розрахунок часу симуляції
simulationTimeValue = Voc * arrayDataPV(conf,3)*0.95; % N послідовних
панелей x Voc
% цикл по кадрам симуляцій
for k = 1:PSC
    simIn(k).ModelName = modelList{conf};
    simIn(k) = simIn(k).setVariable('Npsc', k);
    simIn(k) = simIn(k).setModelParameter('StopTime',
num2str(simulationTimeValue));
end
% Запуск (результат записується в локальну змінну 'out')
out = parsim(simIn, ...
    'ShowProgress', 'on', ...
    'TransferBaseWorkspaceVariables', true, ...
    'UseFastRestart', false);
```

### ***Б.12. Скрипт генерації контрастних кольорів ArrayRGB.m***

Опис: Модуль генерує масив контрастних кольорів для кожної кривої на графіку, що дозволяє візуально розділити десятки станів затінення на одній діаграмі.

```
% ArrayRGB.m – генерація контрастних кольорів для симуляцій
RGB = zeros(PSC, 3);
RGB(1,:) = [1 0 0]; % Початковий колір (без затінення) – червоний
for i = 2:PSC
    bestColor = [];
    maxMinDist = -inf;
    for j = 1:1000
        candidate = rand(1,3); % випадковий RGB
        % Фільтр: виключити надто світлі кольори
        brightness = mean(candidate); % середнє значення каналів
        if brightness > 0.85 % поріг яскравості
            continue;
        end
        % Фільтр: виключити майже сірі кольори (низька насиченість)
        saturation = std(candidate); % стандартне відхилення каналів
        if saturation < 0.1
            continue;
        end
        % Відстань до попередніх кольорів
        dists = sqrt(sum((RGB(1:i-1,:) - candidate).^2, 2));
        minDist = min(dists);
        if minDist > maxMinDist
            maxMinDist = minDist;
            bestColor = candidate;
        end
    end
    RGB(i,:) = bestColor;
end
```

### Б.13. Скрипт експорту результатів симуляцій *exportExcel.m*

Опис: Експорт усереднених значень показників симуляцій для всього циклу і для кожного положення смуги тіні у фінальній таблиці Excel.

```
% exportExcel.m – експорт результатів симуляцій
% Розрахунок показників по кожному куту
numConfigs = size(dataOutFull, 1);
numAngles = size(dataOutFull, 2);
finalSummary = table(); % Ініціалізація таблиці для результатів
rowCounter = 1; % лічильник рядків у таблиці
% цикл по конфігураціям
for conf = 1:numConfigs
    % цикл по кутам
    for deg = 1:numAngles
        currentData = dataOutFull{conf, deg};
        if ~isempty(currentData)
            % середнє значення по всіх PSC для кута
            P_val = mean(currentData(:, 6), 'omitnan');
            dL_val = mean(currentData(:, 7), 'omitnan');
            FF_val = mean(currentData(:, 8), 'omitnan');
            Eta_val = mean(currentData(:, 9), 'omitnan');
            Vpwm_val = currentData(1, 10); % абсолютний dVpwm
            dVpwm_val = currentData(1, 11); % відносний dVpwm
            % Формування рядка у таблиці
            finalSummary.Configuration(rowCounter) = modelList(conf);
            finalSummary.Angle_deg(rowCounter) = degList(deg);
            finalSummary.Pgmpp_W(rowCounter) = round(P_val, 0);
            finalSummary.dPL_perc(rowCounter) = round(dL_val, 1);
            finalSummary.FF_perc(rowCounter) = round(FF_val, 1);
            finalSummary.Eta_perc(rowCounter) = round(Eta_val, 1);
            finalSummary.dVpwm_V(rowCounter) = round(Vpwm_val, 1);
            finalSummary.dVpwm_p(rowCounter) = round(dVpwm_val, 1);
            rowCounter = rowCounter + 1;
        end
    end
end
% Експорт в Excel
%lastThree = modelList{1}(end-2:end);
lastThree = modelList{1};
lastThree = strrep(lastThree, '_', '');
excelFileName = ['dataPSC_16.xlsx'];
sheetName = lastThree;
% Назви стовпчиків для Excel
finalSummary.Properties.VariableNames = {...
    'Назва конфігурації', ...
    'Кут (deg)', ...
    'Pgmpp (W)', ...
    'dPL (%)', ...
    'FF (%)', ...
    'eta (%)', ...
    'dVpwm (V)', ...
    'dVpwm_p (%)'};
% Запис у файл
writetable(finalSummary, excelFileName, 'Sheet', sheetName);
fprintf('Аналіз завершено. Файл: %s, Сторінка: %s\n', excelFileName, sheetName);
```

## ДОДАТОК В.

## Експериментальна установка з програмно-технічним комплексом

## В.1. Програмований емулятор фотоелектричної панелі

Програмований емулятор ФЕП є імпульсним понижуючим перетворювачем, що функціонує з можливістю прецизійного відтворення заданих ВАХ. Силова частина (рис. В.1) живиться від трансформатора Т1 потужністю 500 Вт через випрямний міст D1 (GBK20M), де ключовий транзистор Q1 (IGBT HGTG40N60B3) виконує функцію регулюючого елемента. Для підвищення загального ККД та зменшення втрат, замість класичного зворотного діода у схемі застосовано синхронне випрямлення на базі транзистора Q2, з управлінням затворами обох силових ключів через ізольовані драйвери HCPL-3120. Разом із силовим дроселем L1 (200 мГн) така конфігурація дозволяє стабільно формувати вихідні параметри, необхідні для моделювання поведінки реальних сонячних модулів у різних режимах освітленості.

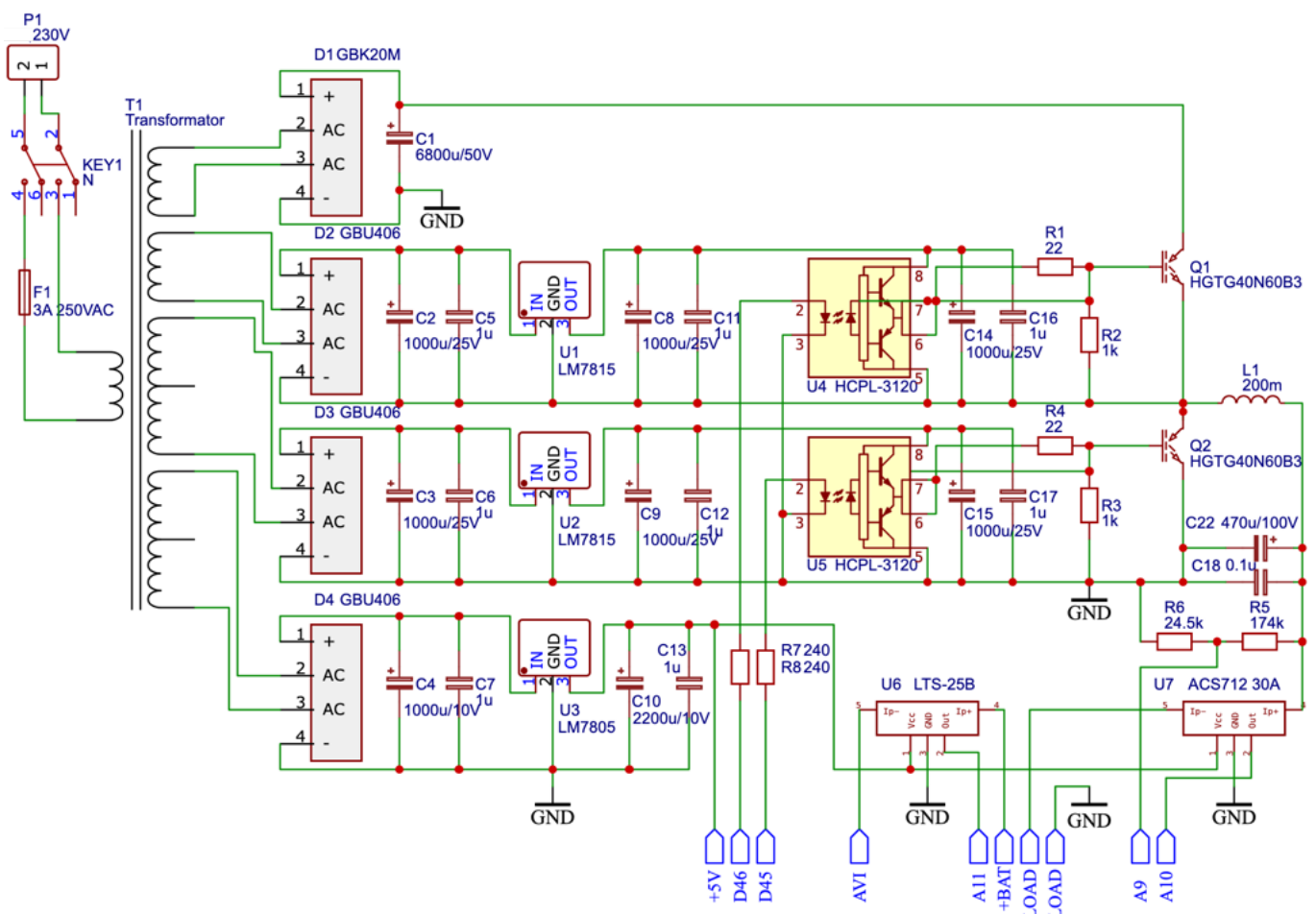


Рис. В.1 Електрична схема імпульсного перетворювача емулятора ФЕП

Управління режимами роботи перетворювача здійснюється системою управління (рис. В.2), яка подає ШИМ-сигнал на драйвери, дозволяючи програмно змінювати робочу точку та динамічно формувати ВАХ пристрою. Зворотний зв'язок реалізовано через датчик струму ACS712 30A (U7) та резистивний дільник напруги R6-R5, сигнали з яких надходять на входи АЦП, забезпечуючи точне відстеження параметрів у режимі реального часу. Електронна частина схеми та драйвери заживлені від окремих обмоток трансформатора Т1 із використанням стабілізаторів напруги LM7815 (U1, U2) та LM7805 (U3).

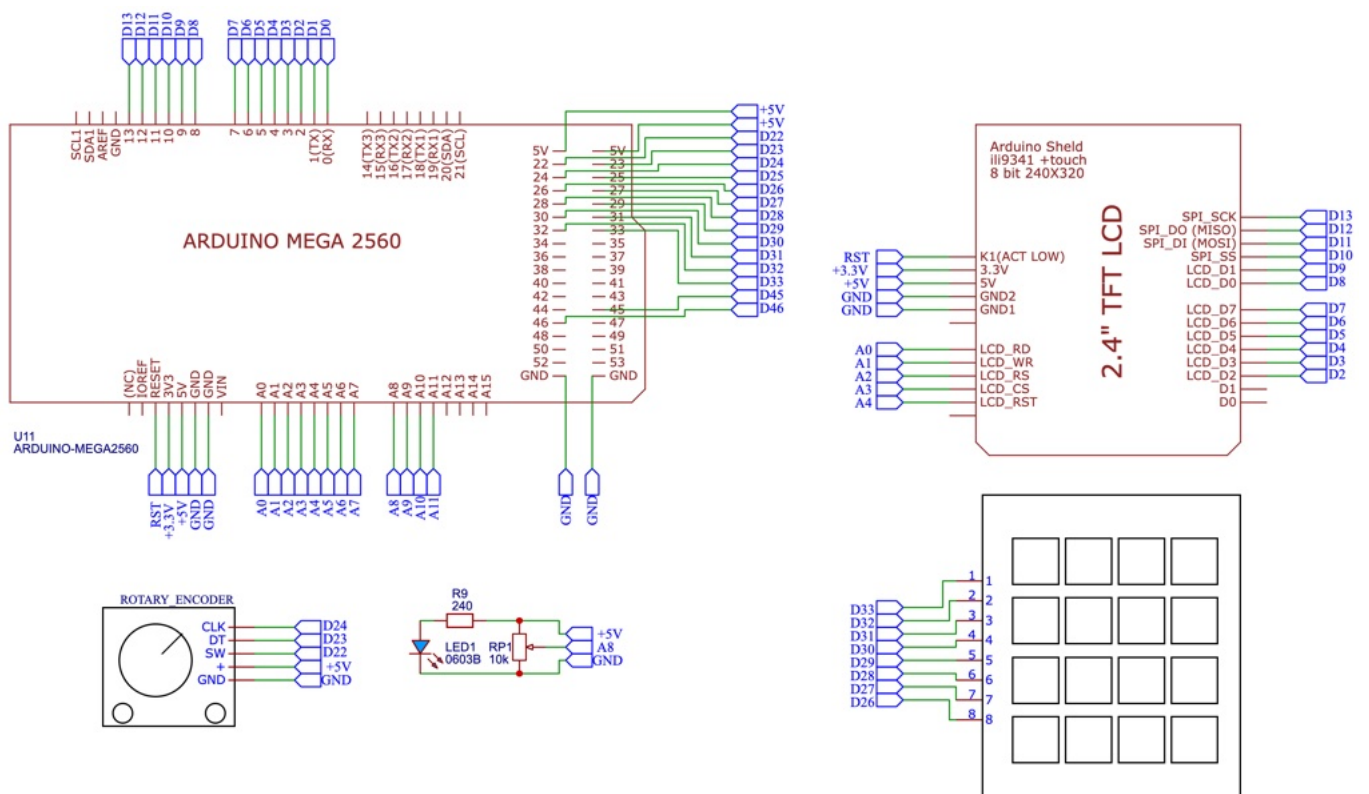


Рис. В.2 Електрична схема системи управління емулятора ФЕП

Система управління емулятором (рис. В.2) побудована на базі MCU Arduino Mega 2560 та забезпечує комплексне програмно-апаратне керування перетворювачем. Основні компоненти та функції системи:

- MCU виконує основний алгоритм керування, який відповідає за формування ВАХ ФЕП шляхом генерації ШИМ-сигналу, обробку даних з датчиків струму та напруги через вбудовані АЦП, а також обслуговування інтерфейсу користувача. Програмний код, наведений у додатку В.11, реалізує логіку ПД-регулювання вихідних параметрів та математичну модель ФЕП.

- TFT-дисплей 2.4" використовується для візуалізації поточних значень напруги, струму та потужності, відображення меню налаштування параметрів панелі ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  тощо) та режими роботи емулятора.
- Енкодер (Rotary Encoder) забезпечує навігацію по пунктах меню (вибір режимів, перемикання між екранами). Програмно реалізовано обробку поворотів та кліків для швидкого переходу між функціональними блоками.
- Кнопочна клавіатура (4x4 Keypad) призначена для введення цифрових значень параметрів ФЕП згідно з технічним описом (Datasheet).

На рис. В.3 наведено інтерфейс дисплея емулятора ФЕП, який забезпечує моніторинг ключових вихідних параметрів системи — напруги, струму та потужності — у різних режимах навантаження.



Рис. В.3. Дисплей емулятора ФЕП

Конструкція емулятора ФЕП, представлена на рис. В.4, поєднує інтелектуальну систему керування та потужну силову частину, розміщені у стаціонарному металевому корпусі.

На фронтальній частині корпусу розташовано TFT-дисплей, призначений для візуалізації параметрів та взаємодії з користувачем. Також присутні органи керування, що дозволяють вручну коригувати робочі режими та здійснювати комутацію електричних кіл.

Внутрішній простір корпусу організовано з урахуванням габаритів силових елементів, зокрема великих дроселів та трансформаторів, необхідних для формування ВАХ ФЕП. Плата MCU Arduino Mega 2560 закріплена на внутрішній стінці корпусу і з'єднана зі схемою за допомогою джгутів дротів, що забезпечує компактне розташування та легкий доступ до інтерфейсних роз'ємів для налаштування чи обслуговування.

Емулятор виконаний у захищеному корпусі, який одночасно забезпечує безпечну ізоляцію високовольтних частин схеми та надійне кріплення елементів, що схильні до вібрацій або нагрівання під час роботи. Монтаж виконано із використанням термінальних колодок та радіаторів охолодження силових напівпровідникових елементів, призначених для тривалих лабораторних досліджень. Конструкція емулятора є спеціалізованим вимірювально-силовим блоком, адаптованим для інтеграції в автоматизовані системи тестування та моніторингу ФЕ обладнання.

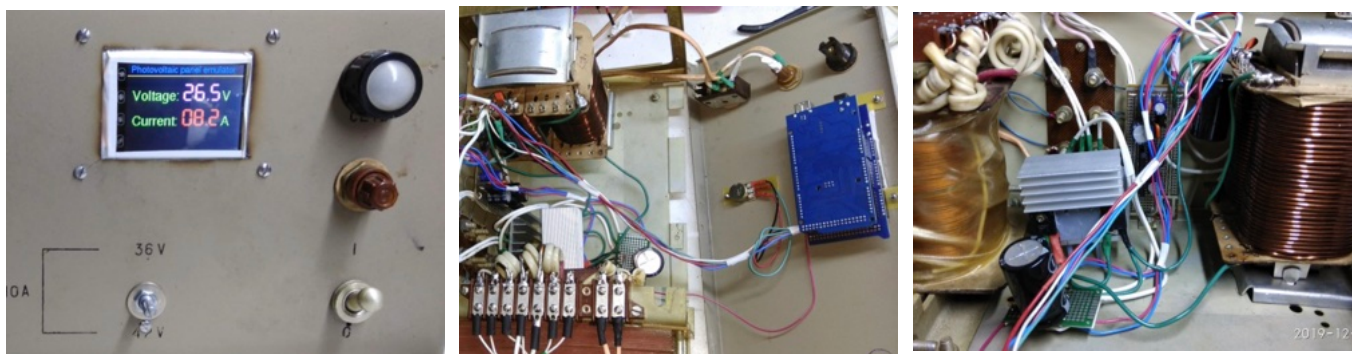


Рис. В.4. Конструкція емулятора ФЕП

### ***В.5 Керований імітатор навантаження***

Керований імітатор навантаження, схема якого показана на рис. В.5, призначений для проведення лабораторних досліджень ПТК та систем енергоменеджменту. Його основна функція — створення керованого рівня енергоспоживання, що дозволяє імітувати різні сценарії роботи мережі. Пристрій живиться від мережі змінного струму 230В через імпульсний перетворювач AC/DC 5В-3А (U14). Для забезпечення живлення радіомодуля (МК1) та підсвітки дисплея (U10) 3,3В застосовано додатковий понижуючий перетворювач MP1584 (U15). В основі пристрою плата розробки на MCU Arduino Nano (U8), який функціонує згідно з програмним кодом, наведеним в додатку В.12. MCU координує роботу всіх вузлів, зчитує дані з датчиків та реалізує логіку перемикання навантажень залежно від отриманих команд.

Керування навантаженнями здійснюється через 8-канальний модуль твердотільних реле 8xG3MB-202P (U19), що забезпечує необхідну гальванічну розв'язку між низьковольтною логікою Arduino та високовольтними ланцюгами

живлення ламп (LP1–LP5). Дана архітектура підтримує розширення до 8 незалежних каналів, що дозволяє динамічно змінювати сумарну потужність навантаження шляхом комбінування ламп розжарювання різного номіналу.

Контроль величини споживання енергії здійснюється через гальванічно розв'язаний енергомонітор PZEM-004T v.3 (U4), сигнали Rx Tx якого під'єднані до відповідних пінів MCU. Вимір напруги відбувається безпосередньо з мережевої лінії живлення, а струму – через трансформатор струму SCT-013-100 (TC2). Поточні параметри (потужність, струм, напруга, коефіцієнт навантаження, режим роботи) відображаються на кольоровому дисплеї TFT SPI 1.8” (U10).

Пристрій інтегрований у загальну систему ПТК завдяки радіомодулю NRF24L01 (MK1), що дозволяє головному модулю віддалено надсилати команди для перемикання ступенів навантаження, забезпечуючи гнучкість лабораторних експериментів без фізичного втручання в схему.

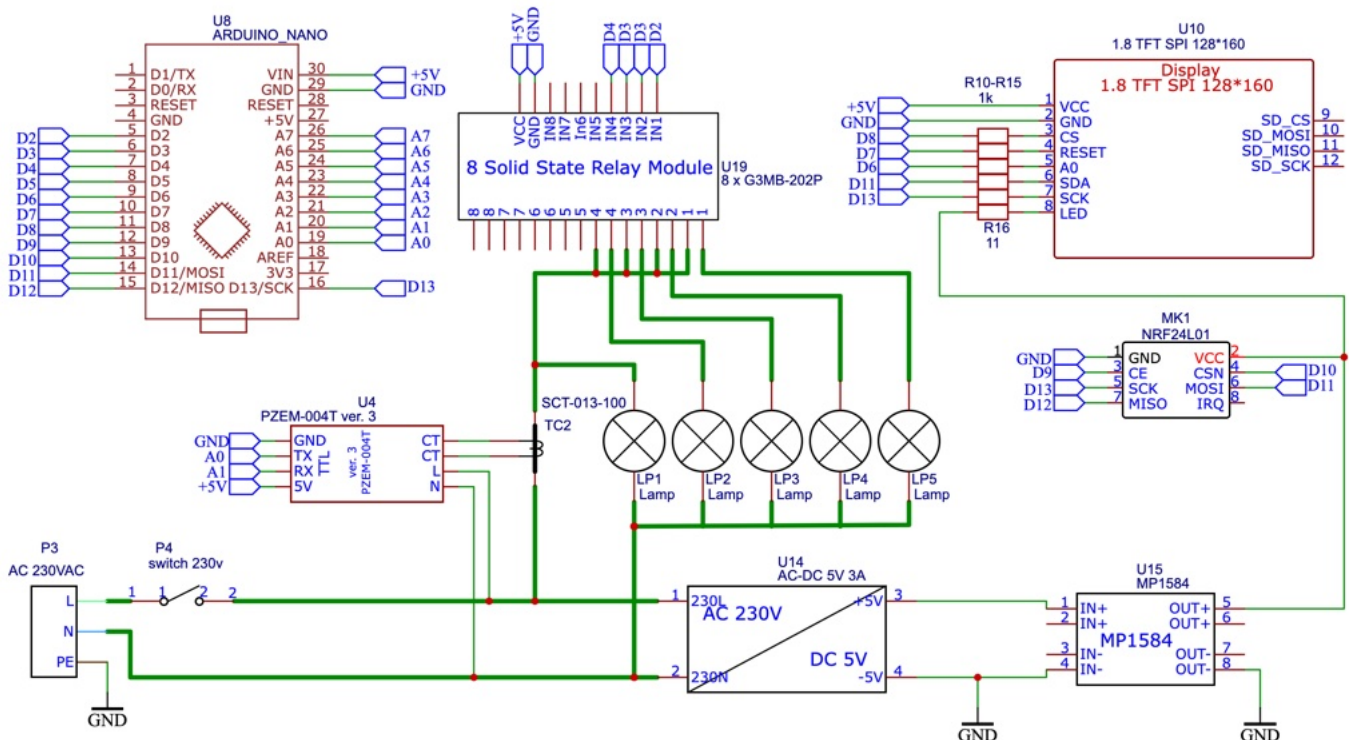
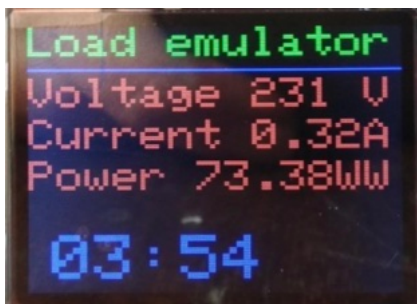


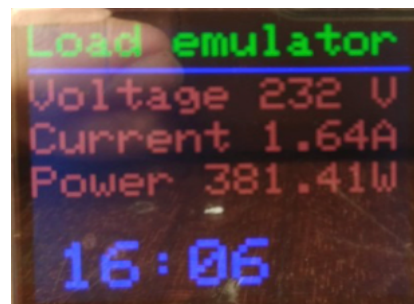
Рис. В.5 Електрична схема керованого імітатора навантаження

Інтерфейс імітатора навантаження, візуалізує поточні енергетичні параметри ПТК у реальному часі. На екрані відображаються ключові дані: значення напруги, споживаний струм та активна потужність, а також поточний час, що дозволяє

контролювати графік навантаження протягом доби. Система динамічно змінює індикацію залежно від стану коматованих реле: від режимів мінімального споживання у нічний період (рис. В.6, а) до режимів пікових навантажень (рис. В.6, б), що забезпечує користувачеві контроль над процесом дослідження комплексу.



а)



б)

Рис. В.6 – Відображення параметрів імітатора навантаження: а) мінімальне у нічний період; б) максимальне у пікові години

Імітатор навантаження реалізований у вигляді компактного модуля (рис. В.7), що поєднує силові елементи навантаження, вузли комутації, вимірювання та інтелектуальне керування.



Рис. В.7. Конструкція керованого імітатора навантаження

Як елементи навантаження використано п'ять ламп розжарювання різної потужності. Вони закріплені на верхній панелі пристрою, що забезпечує ефективне відведення тепла та можливість візуального контролю їх стану. Комутація навантаження здійснюється за допомогою релейного модуля. Енергомонітор PZEM-004T v.3 забезпечують гальванічно розв'язаний контроль споживання електроенергії, передаючи дані MCU для подальшої обробки. Для дистанційного керування та

інтеграції в ПТК застосовано радіомодуль, що працює на частоті 2.4 ГГц і дозволяє імітатору приймати команди від головного модуля системи для зміни режиму навантаження без дротового з'єднання. На передній панелі розміщено кольоровий 1.8" дисплей, який відображає актуальні значення напруги, струму, активної потужності та поточний час, що дозволяє користувачу оцінювати стан навантаження в реальному часі.

### ***В.8 Прогноз генерації ФЕМ***

Для отримання даних прогнозу генерації ФЕМ використовується безкоштовний API Forecast.Solar.

Структура підсистеми ПТК, що відповідає за отримання прогнозу, представлена на рис. В.8. MCU Slave (ESP8266 Node MCU) через Wi-Fi мережу маршрутизатора (Wi-Fi Router) пов'язаний з мережею Інтернет. MCU Slave постійно опитує порт зв'язку з головним MCU Master (Arduino Mega 2560) [179].

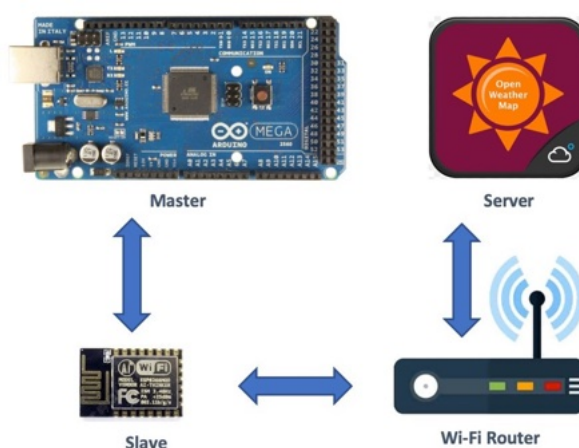


Рис. В.8 Структура підсистеми ПТК отримання прогнозу генерації

За необхідності прогнозу сонячної генерації Master відправляє в порт зв'язку команду. Після її отримання Slave формує запит для API виду:

[https://api.forecast.solar/estimate/50.463833/30.016973/60/0/4.5,](https://api.forecast.solar/estimate/50.463833/30.016973/60/0/4.5)

де числа:

- географічні координати (широта N і довгота E) точки прогнозу,
- кут нахилу панелей в ФЕМ до горизонту (градуси),
- азимутальний кут панелей в ФЕМ до півдня (градуси),
- потужність ФЕМ (кВт).

Сервер формує відповідь в форматі JSON (JavaScript Object Notation – текстовий формат обміну даними) і відправляє клієнту. MCU Slave виконує парсинг (процес вилучення) даних, формує їх і через порт зв'язку відправляє MCU Master для подальших розрахунків і відображення (додаток В.10). В JSON-масиві, отриманому від API, доступні дані про прогнозовану генеровану потужність (ключ “value”) з дискретністю в одну годину на поточну і наступну добу (ключ “timestamp”) в Вт (ключ “watts”), Вт · год. (ключ “watt\_hours”) або сумарних Вт · год за добу (ключ “watt\_hours\_day”).

### ***В.9. Дослідний зразок ПТК***

ПТК на основі центрального модулю з радіальним розташуванням модулів вимірювання та комутації є оптимальною з точки зору ціна/ефективність. Крім того, саме така система забезпечує найвищий рівень захищеності та максимальну стійкість функціонування у випадку відмови або пошкодження окремих периферійних модулів.

Центральний модуль ПТК забезпечує:

- отримання короткострокових даних метеопрогнозу та прогнозування сонячної генерації;
- отримання та аналіз даних модулів вимірювання та комутації;
- створення моделі функціонування об'єктів генерації та електроспоживання на основі алгоритму перерозподілу енергії між тарифними зонами для мінімізації витрат на оплату споживання електроенергії з РМ.

Модулі вимірювання та комутації здійснюють:

- вимірювання поточних енергетичних характеристик підключених навантажень та джерел генерації (струм, напруга, споживана потужність);
- передачу отриманої інформації через радіомережу до центрального модулю для подальшого аналізу;
- комутацію підключених навантажень та джерел генерації відповідно до отриманих інструкцій.

Модулі ПТК пов'язані між собою інформаційними та силовими шинами постійного та змінного струмів (рис. В.9). Багатоканальний зв'язок між

мікроконтролером центрального модулю та модулями комутації та вимірювання організований за допомогою радіомодулів. Отримання короткострокових даних метеопрогнозу здійснюється шляхом Wi-Fi підключення до мережі Інтернет.

Інвертор через послідовний інтерфейс RS232 інформаційно пов'язаний з центральним модулем ПТК. Задачі інтерфейсу зв'язку:

- отримання команд на зміну режимів функціонування відповідно до алгоритму роботи ПТК;
- відправка в центральний модуль, після отримання запиту, інформації про поточні налаштування режимів роботи інвертора;
- відправка в центральний модуль, після отримання запиту, результатів вимірювання напруг, струмів, потужностей в ланцюгах, підключених до інвертору джерел і споживачів енергії.

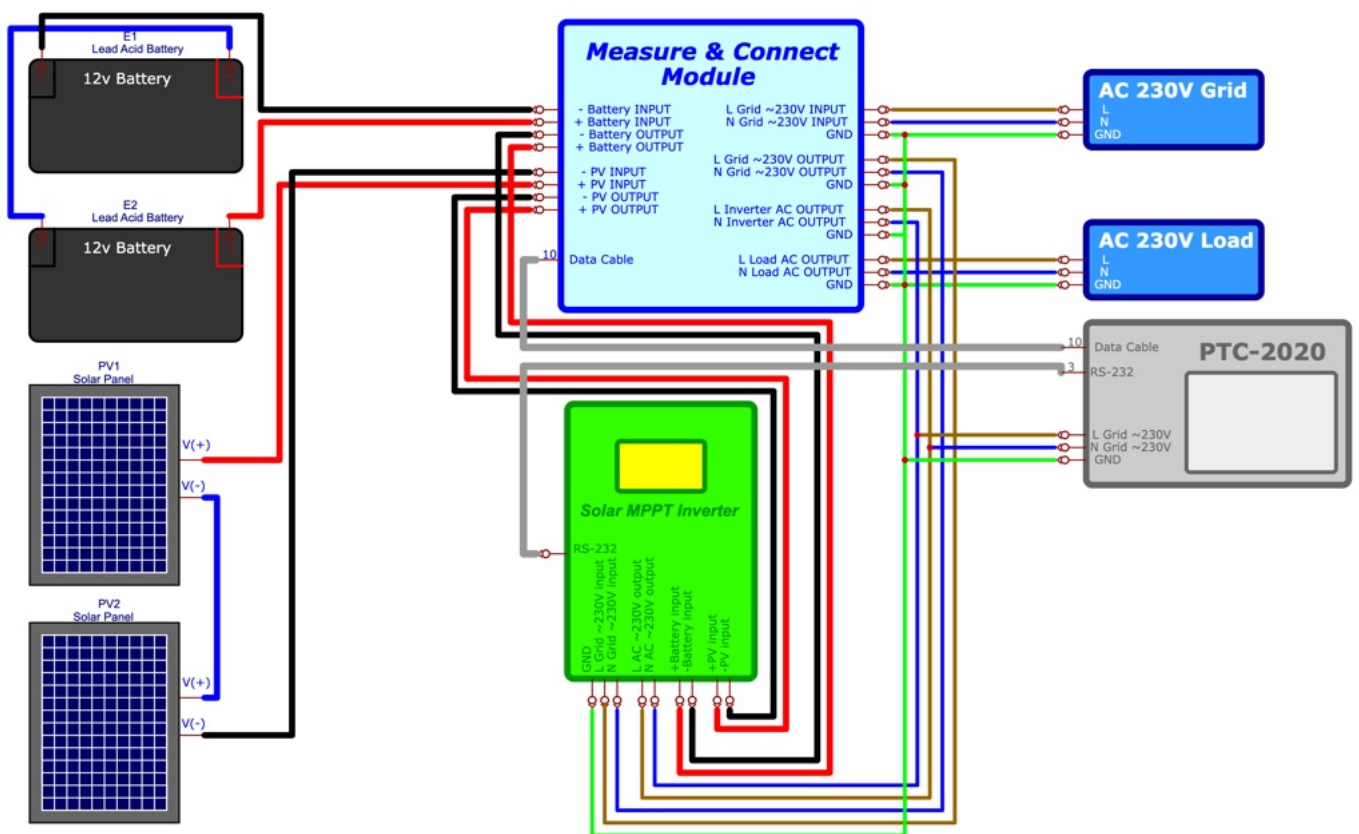


Рис. В.9 Схема електрична підключення модулів ПТК

### ***В.10. Прогноз генерації ФЕМ в форматі JSON***

```

{
  "watts": [
    {"timestamp": "2026-05-19 05:06:49", "value": 0},
    {"timestamp": "2026-05-19 06:00:00", "value": 139},
    {"timestamp": "2026-05-19 07:00:00", "value": 329},
    {"timestamp": "2026-05-19 08:00:00", "value": 567},
    {"timestamp": "2026-05-19 09:00:00", "value": 829},
    {"timestamp": "2026-05-19 10:00:00", "value": 1115},
    {"timestamp": "2026-05-19 11:00:00", "value": 1402},
    {"timestamp": "2026-05-19 12:00:00", "value": 1616},
    {"timestamp": "2026-05-19 13:00:00", "value": 1739},
    {"timestamp": "2026-05-19 14:00:00", "value": 1712},
    {"timestamp": "2026-05-19 15:00:00", "value": 1500},
    {"timestamp": "2026-05-19 16:00:00", "value": 1193},
    {"timestamp": "2026-05-19 17:00:00", "value": 853},
    {"timestamp": "2026-05-19 18:00:00", "value": 515},
    {"timestamp": "2026-05-19 19:00:00", "value": 256},
    {"timestamp": "2026-05-19 20:00:00", "value": 88},
    {"timestamp": "2026-05-19 20:46:25", "value": 0},
    {"timestamp": "2026-05-20 05:05:34", "value": 0},
    {"timestamp": "2026-05-20 06:00:00", "value": 140},
    {"timestamp": "2026-05-20 07:00:00", "value": 329},
    {"timestamp": "2026-05-20 08:00:00", "value": 581},
    {"timestamp": "2026-05-20 09:00:00", "value": 870},
    {"timestamp": "2026-05-20 10:00:00", "value": 1063},
    {"timestamp": "2026-05-20 11:00:00", "value": 1154},
    {"timestamp": "2026-05-20 12:00:00", "value": 1204},
    {"timestamp": "2026-05-20 13:00:00", "value": 1199},
    {"timestamp": "2026-05-20 14:00:00", "value": 1145},
    {"timestamp": "2026-05-20 15:00:00", "value": 1042},
    {"timestamp": "2026-05-20 16:00:00", "value": 884},
    {"timestamp": "2026-05-20 17:00:00", "value": 679},
    {"timestamp": "2026-05-20 18:00:00", "value": 457},
    {"timestamp": "2026-05-20 19:00:00", "value": 248},
    {"timestamp": "2026-05-20 20:00:00", "value": 125},
    {"timestamp": "2026-05-20 20:47:47", "value": 0}
  ],
  "watt_hours_period": [
    {"timestamp": "2026-05-19 05:06:49", "value": 0},
    {"timestamp": "2026-05-19 06:00:00", "value": 62},
    {"timestamp": "2026-05-19 07:00:00", "value": 234},
    {"timestamp": "2026-05-19 08:00:00", "value": 448},
    {"timestamp": "2026-05-19 09:00:00", "value": 698},
    {"timestamp": "2026-05-19 10:00:00", "value": 972},
    {"timestamp": "2026-05-19 11:00:00", "value": 1259},
    {"timestamp": "2026-05-19 12:00:00", "value": 1509},
    {"timestamp": "2026-05-19 13:00:00", "value": 1678},
    {"timestamp": "2026-05-19 14:00:00", "value": 1726},
    {"timestamp": "2026-05-19 15:00:00", "value": 1606},
    {"timestamp": "2026-05-19 16:00:00", "value": 1347},
    {"timestamp": "2026-05-19 17:00:00", "value": 1023},
    {"timestamp": "2026-05-19 18:00:00", "value": 684},
    {"timestamp": "2026-05-19 19:00:00", "value": 386},
    {"timestamp": "2026-05-19 20:00:00", "value": 172},
    {"timestamp": "2026-05-19 20:46:25", "value": 34},
    {"timestamp": "2026-05-20 05:05:34", "value": 0},
    {"timestamp": "2026-05-20 06:00:00", "value": 64},
    {"timestamp": "2026-05-20 07:00:00", "value": 235},
    {"timestamp": "2026-05-20 08:00:00", "value": 455},
  ]
}

```

```

{"timestamp": "2026-05-20 09:00:00", "value": 726},
{"timestamp": "2026-05-20 10:00:00", "value": 967},
{"timestamp": "2026-05-20 11:00:00", "value": 1109},
{"timestamp": "2026-05-20 12:00:00", "value": 1179},
{"timestamp": "2026-05-20 13:00:00", "value": 1202},
{"timestamp": "2026-05-20 14:00:00", "value": 1172},
{"timestamp": "2026-05-20 15:00:00", "value": 1094},
{"timestamp": "2026-05-20 16:00:00", "value": 963},
{"timestamp": "2026-05-20 17:00:00", "value": 782},
{"timestamp": "2026-05-20 18:00:00", "value": 568},
{"timestamp": "2026-05-20 19:00:00", "value": 353},
{"timestamp": "2026-05-20 20:00:00", "value": 187},
{"timestamp": "2026-05-20 20:47:47", "value": 50}
],
"watt_hours": [
{"timestamp": "2026-05-19 05:06:49", "value": 0},
{"timestamp": "2026-05-19 06:00:00", "value": 62},
{"timestamp": "2026-05-19 07:00:00", "value": 296},
{"timestamp": "2026-05-19 08:00:00", "value": 744},
{"timestamp": "2026-05-19 09:00:00", "value": 1442},
{"timestamp": "2026-05-19 10:00:00", "value": 2414},
{"timestamp": "2026-05-19 11:00:00", "value": 3673},
{"timestamp": "2026-05-19 12:00:00", "value": 5182},
{"timestamp": "2026-05-19 13:00:00", "value": 6860},
{"timestamp": "2026-05-19 14:00:00", "value": 8586},
{"timestamp": "2026-05-19 15:00:00", "value": 10192},
{"timestamp": "2026-05-19 16:00:00", "value": 11539},
{"timestamp": "2026-05-19 17:00:00", "value": 12562},
{"timestamp": "2026-05-19 18:00:00", "value": 13246},
{"timestamp": "2026-05-19 19:00:00", "value": 13632},
{"timestamp": "2026-05-19 20:00:00", "value": 13804},
{"timestamp": "2026-05-19 20:46:25", "value": 13838},
{"timestamp": "2026-05-20 05:05:34", "value": 0},
{"timestamp": "2026-05-20 06:00:00", "value": 64},
{"timestamp": "2026-05-20 07:00:00", "value": 299},
{"timestamp": "2026-05-20 08:00:00", "value": 754},
{"timestamp": "2026-05-20 09:00:00", "value": 1480},
{"timestamp": "2026-05-20 10:00:00", "value": 2447},
{"timestamp": "2026-05-20 11:00:00", "value": 3556},
{"timestamp": "2026-05-20 12:00:00", "value": 4735},
{"timestamp": "2026-05-20 13:00:00", "value": 5937},
{"timestamp": "2026-05-20 14:00:00", "value": 7109},
{"timestamp": "2026-05-20 15:00:00", "value": 8203},
{"timestamp": "2026-05-20 16:00:00", "value": 9166},
{"timestamp": "2026-05-20 17:00:00", "value": 9948},
{"timestamp": "2026-05-20 18:00:00", "value": 10516},
{"timestamp": "2026-05-20 19:00:00", "value": 10869},
{"timestamp": "2026-05-20 20:00:00", "value": 11056},
{"timestamp": "2026-05-20 20:47:47", "value": 11106}
],
"watt_hours_day": {
  "2026-05-19": 13838,
  "2026-05-20": 11106
},
"info": {
  "pid": "g0hEq421",
  "latitude": 50.45,
  "longitude": 29.9667,
  "place": "Соборна вулиця, Bucha district, Kolonshchyna, Kyiv Oblast, 08032,

```

```

Ukrain",
  "timezone": "Europe/Kiev",
  "time": "2026-05-19T13:20:14+03:00"
}
}
}

```

### ***V.11. Скetch системи управління програмованого емулятору ФEP***

```

#include <avr/eeprom.h> // бібліотека EEPROM
const uint8_t INIT_ADDR = 0; // номер комірки ініціалізації структури
datasheet
const uint8_t V_ADDR = 1; // номер комірки Vout
const uint8_t I_ADDR = 5; // номер комірки Iref
const uint8_t START_ADDR = 9; // стартова комірка даних структури datasheet
const uint8_t INIT_KEY = 50; // ключ першого запуску. 0-254, на вибір
//-----PWM-----
const uint16_t TOP = 0x03FF; // 10-bit resolution. 15624 Hz PWM
uint16_t valuePWM = 0; //
//-----PID-----
// величини регулятора
int16_t setpointPID = 0; // задана величина, яку має підтримувати регулятор
int16_t inputPID = 0; // сигнал з датчика (наприклад, температура, яку ми
регулюємо)
int16_t outputPID = 0; // вихід з регулятора на керуючий пристрій (величина
ШИМ)
uint16_t pidMin = 0; // мінімальний вихід з регулятора
uint16_t pidMax = TOP; // максимальний вихід з регулятора
// коефіцієнти
float Kp = 1.0;
//-----Keypad-----
#include <Keypad.h>
const uint8_t ROWS = 4; // кількість рядків клавіатури
const uint8_t COLS = 4; // кількість стовпців клавіатури
const char hexaKeys[ROWS][COLS] = { // масив символів клавіатури
  { '1', '2', '3', 'A' },
  { '4', '5', '6', 'B' },
  { '7', '8', '9', 'C' },
  { '*', '0', '#', 'D' }
};
const uint8_t rowPins[ROWS] = { 33, 32, 31, 30 }; // піни рядків R1-R2-R3-R4
const uint8_t colPins[COLS] = { 29, 28, 27, 26 }; // піни стовпців C1-C2-C3-C4
//об'єкт customKeypad
Keypad customKeypad = Keypad(makeKeymap(hexaKeys), rowPins, colPins, ROWS,
COLS);
//-----Encoder-----
#include <TimerThree.h>
const uint8_t CLK = 24; // пін Clk
const uint8_t DT = 23; // пін Dt
const uint8_t SW = 22; // пін Sw
#include "GyverEncoder.h"
Encoder enc1(CLK, DT, SW); // об'єкт для роботи з кнопкою
int8_t value = 0; // лічильник енодера для меню
//---- піни для вимірювання напруги та струму -----
const uint8_t potentiometer = A8; // пін вимірювання напруги на потенціометрі

```

```

const uint8_t voltageOut = A9;    // пін вимірювання вихідної напруги
const uint8_t currentOut = A10;   // пін вимірювання вихідного струму
//-----PV emulator-----
// глобальні змінні для розрахунку BAX Ipv = F(Vpv) сонячної панелі та
// референсного струму
float Iph, beta, y, Voc, Rsh, p;
float Vpv = 0.;    // вихідна напруга емулятора
float Ipv = 0.;    // вихідний струм емулятора
float Ipv_ref = 0.; // опорне (розрахункове) значення вихідного струму емулятора
float Ppv = 0.;    // потужність на виході емулятора
float Rl = 0.;    // навантаження на виході емулятора
boolean setupVI = 1; // прапор встановлення напруги та струму для індикатора
//-----TFT LCD-----
#include <Adafruit_GFX.h>    // Core graphics library
#include <MCUFRIEND_kbv.h>   // Hardware-specific library
MCUFRIEND_kbv tft;         // об'єкт
#include <Fonts/FreeSans9pt7b.h>
#include <Fonts/FreeSans12pt7b.h>
#include <FreeDefaultFonts.h>
#define GREY 0x8410
#define BLACK 0x0000
#define BLUE 0x001F
#define RED 0xF800
#define GREEN 0x07E0
#define CYAN 0x07FF
#define MAGENTA 0xF81F
#define YELLOW 0xFFE0
#define WHITE 0xFFFF
#define NAVY 0x000F    /* 0, 0, 128 */
#define DARKGREEN 0x03E0 /* 0, 128, 0 */
#define DARKCYAN 0x03EF /* 0, 128, 128 */
#define MAROON 0x7800 /* 128, 0, 0 */
#define PURPLE 0x780F /* 128, 0, 128 */
#define OLIVE 0x7BE0 /* 128, 128, 0 */
#define LIGHTGREY 0xC618 /* 192, 192, 192 */
#define DARKGREY 0x7BEF /* 128, 128, 128 */
#define ORANGE 0xFDA0 /* 255, 180, 0 */
#define GREENYELLOW 0xB7E0 /* 180, 255, 0 */
#define PINK 0xFC9F
//-----PWM-----
const uint8_t PWM_PIN1 = 46; // пін керування ШІМ драйвера верхнього плеча
const uint8_t PWM_PIN2 = 45; // пін керування ШІМ драйвера нижнього плеча
//-----
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // налаштування швидкодії АЦП
  ADCSRA |= (1 << ADPS2); // Біту ADPS2 присвоюємо одиницю – коефіцієнт поділу
  16
  ADCSRA &= ~(1 << ADPS1 | (1 << ADPS0)); // Бітам ADPS1 та ADPS0 присвоюємо
  нулі
  // -----PWM-----
  PWM16Begin();
  PWM16A(0); // Set initial PWM value for Pin 46
  PWM16EnableA(); // Turn PWM on for Pin 46
  // -----PV variables-----
  datasheetPV(); // параметри сонячної панелі з datasheet
  variablesPV(); // розрахунок змінних для BAX Ipv = F(Vpv) сонячної панелі
  // -----Encoder-----
  enc1.setType(TYPE1);

```

```

Timer3.initialize(10000);
Timer3.attachInterrupt(encoderTick); // to run every 0.001 seconds
// -----TFT LCD-----
uint16_t ID = tft.readID();
if (ID == 0xD3) ID = 0x9481;
tft.begin(ID);
tft.setRotation(3);
tft.fillScreen(BLACK);
showmsgXY(30, 40, 2, &FreeSans12pt7b, "Photovoltaic", GREENYELLOW);
showmsgXY(110, 90, 2, &FreeSans12pt7b, "panel", GREENYELLOW);
showmsgXY(70, 140, 2, &FreeSans12pt7b, "emulator", GREENYELLOW);
showmsgXY(20, 170, 1, &FreeSans9pt7b, "Department of Energy Management",
YELLOW);
showmsgXY(70, 190, 1, &FreeSans9pt7b, "and Applied Electronics", YELLOW);
showmsgXY(70, 210, 1, &FreeSans9pt7b, "Kyiv National University", YELLOW);
showmsgXY(60, 230, 1, &FreeSans9pt7b, "of Technology and Design", YELLOW);
delay(1000);
}
void loop() {
  mainMenu();
}

// головне меню
void mainMenu() {
  if (enc1.isHeld()) { // якщо кнопка була утримана і енкодер не повертався
    value = 0;
    uint8_t x0 = 0;
    uint8_t y0 = 50;
    uint16_t widthX = 265;
    uint8_t heightY = 30;
    uint8_t rounded = 10;
    ppe_ttf(0); // виведення заголовка
    showmsgXY(x0 + 5, (y0 + heightY * 1) - 15, 1, &FreeSans9pt7b, "Photovoltaic
emulator", GREEN);
    showmsgXY(x0 + 5, (y0 + heightY * 2) - 15, 1, &FreeSans9pt7b, "Output
voltage & current setting", GREEN);
    showmsgXY(x0 + 5, (y0 + heightY * 3) - 15, 1, &FreeSans9pt7b, "Photovoltaic
panel data", GREEN);
    showmsgXY(x0 + 5, (y0 + heightY * 4) - 15, 1, &FreeSans9pt7b, "Solar
irradiance, Temperature", GREEN);
    showmsgXY(x0 + 5, (y0 + heightY * 5) - 15, 1, &FreeSans9pt7b, "Power
supply", GREEN);
    tft.drawRoundRect(x0, y0 - 5 + heightY * value, widthX, heightY, rounded,
YELLOW);
    while (1) {
      if (enc1.isLeft()) { // інкремент
        tft.drawRoundRect(x0, y0 - 5 + heightY * value, widthX, heightY,
rounded, BLACK);
        value++; //
        if (value > 4) value = 0;
        tft.drawRoundRect(x0, y0 - 5 + heightY * value, widthX, heightY,
rounded, YELLOW);
      }
      if (enc1.isRight()) { // декремент
        tft.drawRoundRect(x0, y0 - 5 + heightY * value, widthX, heightY,
rounded, BLACK);
        value--; //
        if (value < 0) value = 4;
        tft.drawRoundRect(x0, y0 - 5 + heightY * value, widthX, heightY,

```

```

rounded, YELLOW);
    }
    if (enc1.isClick()) { // одиночний клік
        switch (value) {
            case 0: // запуск емулятора з установленими параметрами сонячної
панелі
                runPhotovoltaic();
                break;
            case 1: // установка вихідної напруги
                voltageSetup();
                break;
            case 2:
                datasheetPV(); // введення параметрів сонячної панелі з datasheet
                break;
            case 4:
                powerSupply(); // введення параметрів сонячної панелі з datasheet
                break;
        }
        break;
    }
}
}
}

// запуск емулятора з установленими параметрами сонячної панелі
void runPhotovoltaic() {
    Vpv = eeprom_read_float(V_ADDR); // читання установки вихідної напруги
    Ipv_ref = eeprom_read_float(I_ADDR); // читання установки вихідного струму
    setpointPID = int(Ipv_ref * 13.); // повідомляємо регулятору референсний
струм
    ppe_ttf(1);
    displayStaticVoltageCurrentPower();
    valuePWM = TOP / 32; // Soft start PWM
    while (1) {
        if (enc1.isHelded()) { // якщо кнопка була утримана і енкодер не
повертався
            asm volatile("jmp 0x00"); // перезавантаження
        }
        PWM(valuePWM); // установка величини ШІМ
        inputPID = measureCurrent(); // повідомляємо регулятору вихідний
струм
        Ipv = (float)inputPID / 13.; // вихідний струм емулятора, А
        Vpv = (float)measureVoltage() * 0.04816; // вихідна напруга, V
        displayVoltage(Vpv);
        displayCurrent(Ipv);
        displayPower(Vpv * Ipv);
        valuePWM = computePID(); // ПІД
    }
}

// ПІД функція розрахунку вихідного сигналу
uint16_t computePID() {
    float error = setpointPID - inputPID; // помилка регулювання
    Kp = (float)valuePWM / (float)inputPID;
    float outPID = valuePWM + error * Kp; // пропорційно помилці
регулювання
    outputPID = (int)outPID; //
    outputPID = constrain(outputPID, pidMin, pidMax); // обмежимо вихід
    return outputPID;
}

```

```

}

// функція установки вихідної напруги
void voltageSetup() {
    ppe_ttf(2);
    displayStaticVoltageCurrentPower();
    displayStaticLoad();
    // введення напруги з клавіатури
    String myString = "";
    while (myString.length() < 3) {
        char customKey = customKeypad.getKey();
        if (customKey) {
            myString = myString + customKey;
        }
        Vpv = myString.toFloat();
        displayVoltage(Vpv);
    }
    myString = myString.substring(0, 2) + '.' + myString.substring(2);
    Vpv = myString.toFloat();
    eeprom_update_float(V_ADDR, Vpv); // зберегти напругу на виході в EEPROM
    currentReference();
    if (Ipv_ref < 0) {
        Ipv_ref = 0;
    }
    eeprom_update_float(I_ADDR, Ipv_ref); // зберегти струм на виході в EEPROM
    displayVoltage(Vpv);
    displayCurrent(Ipv_ref);
    displayPower(Vpv * Ipv_ref);
    Rl = Vpv / Ipv_ref;
    if (Rl > 1000.) Rl = 999.9;
    displayLoad(Rl);
}

// обов'язкова функція відпрацювання енкодера. Повинна постійно опитуватися
void encoderTick() {
    enc1.tick();
}

// функція читання потенціометра
uint16_t potRead() {
    uint16_t potValue = analogRead(potentiometer);
    return potValue;
}

// параметри сонячної панелі з datasheet
struct {
    float Voc_stc; // структура параметрів PV
    float Isc_stc; // напруга відкритого кола (OC), V
    float Vmpp_stc; // струм короткого замикання (SC), A
    float Impp_stc; // напруга в точці максимальної потужності (MPP) 1000Вт/м2
    float NOCT; // струм у точці максимальної потужності (MPP) 1000Вт/м2 25°C,
    float alfaIsc; // нормальна робоча температура комірок 800Вт/м2 20°C, °C
    float alfaVoc; // температурний коефіцієнт Isc, %/°C
    uint16_t G; // температурний коефіцієнт Voc, %/°C
    int8_t Ta; // сонячне випромінювання, Вт/м2
} datasheet; // температура повітря, °C

```

```

// ф-ція читання параметрів PV
void datasheetPV() {
    if (eeprom_read_byte(INIT_ADDR) != INIT_KEY) { // перший запуск
        eeprom_write_byte(INIT_ADDR, INIT_KEY); // записали ключ
        // встановлюємо стандартні значення параметрів PV, у дужках – адреси даних в
EEPROM
        datasheet.Voc_stc = 45.0; //(9–12) напруга відкритого кола (OC), V
        datasheet.Isc_stc = 5.25; //(13–16) струм короткого замикання (SC), A
        datasheet.Vmpp_stc = 36.8; //(17–20) напруга в MPP 1000Вт/м2 25°C, V
        datasheet.Impp_stc = 4.87; //(21–24) струм у MPP 1000Вт/м2 25°C, A
        datasheet.NOCT = 48.0; //(25–28) нормальна робоча темп. комірок 800Вт/м2
20°C, °C
        datasheet.alfaIsc = 0.10; //(29–32) температурний коефіцієнт Isc, %/°C
        datasheet.alfaVoc = -0.37; //(33–36) температурний коефіцієнт Voc, %/°C
        datasheet.G = 1000; //(37–38) сонячне випромінювання, Вт/м2
        datasheet.Ta = 25; //(39) температура повітря, °C
        eeprom_write_block((void*)&datasheet, START_ADDR, sizeof(datasheet)); //
запис
    }
    eeprom_read_block((void*)&datasheet, START_ADDR, sizeof(datasheet)); //
читання
}

/* функція розрахунку змінних для BAX Ipv = F(Vpv) сонячної панелі
https://www.researchgate.net/publication/301715581\_A\_Complete\_and\_Simplified\_Data\_sheet\_Based\_Model\_of\_PV\_Cells\_in\_Variable\_Environmental\_Conditions\_for\_Circuit\_Simulation */
void variablesPV() {
    // локальні змінні для розрахунку BAX Ipv = F(Vpv) сонячної панелі
    float Gpu, Tc, deltaT, Impp, Vmpp, Rs, Isc;
    float Voc_stc = datasheet.Voc_stc;
    float Isc_stc = datasheet.Isc_stc;
    float Vmpp_stc = datasheet.Vmpp_stc;
    float Impp_stc = datasheet.Impp_stc;
    uint16_t NOCT = datasheet.NOCT;
    float alfaIsc = datasheet.alfaIsc;
    float alfaVoc = datasheet.alfaVoc;
    uint16_t G = datasheet.G;
    int8_t Ta = datasheet.Ta;
    // відносне сонячне випромінювання, що відноситься до значення STC
    Gpu = G / 1000.;
    // температура комірки, °C
    Tc = Ta + G / 800. * (NOCT - 20.);
    // різниця температури комірки відносно температури комірки STC, °C
    deltaT = Tc - 25;
    Iph = Gpu * Isc_stc * (1 + alfaIsc / 100 * deltaT); // світловий струм, A
    Impp = Gpu * Impp_stc * (1 + alfaIsc / 100 * deltaT); // струм у MPP, A
    Vmpp = Vmpp_stc * (1 + alfaVoc / 100 * deltaT); // напруга в MPP, V
    Voc = Voc_stc * (1 + alfaVoc / 100 * deltaT); // напруга в OC, V
    Rsh = Vmpp / Gpu / (Isc_stc - Impp_stc) * 2; // опір шунта, Ω
    Rs = (Voc_stc - Vmpp_stc) / Impp / 4; // опір, Ω
    p = Rsh / (Rs + Rsh); // коефіцієнт
    Isc = p * Iph; // струм SC, A
    beta = Iph - Voc / Rsh; // коефіцієнт
    y = log((Gpu * (p * Isc_stc - Impp_stc) - (1 - p) * Isc_stc * alfaIsc / 100 *
deltaT - p * Vmpp / Rsh) / (p * (Iph - Voc / Rsh))) / (Vmpp_stc - Voc_stc);
}

```

```

// функція розрахунку опорного (референсного) значення вихідного струму від
// заданої вихідної напруги
void currentReference() {
    Ipv_ref = (Iph - beta * exp(y * (Vpv - Voc)) - Vpv / Rsh) * p;
    if (Ipv_ref < 0) Ipv_ref = 0;
}

// функція редагування параметрів PV
void enterDatasheet() {
    eeprom_read_block((void*)&datasheet, 0, sizeof(datasheet)); // 0-стартова
адреса
    // локальні змінні для редагування параметрів сонячної панелі
    float Voc_stc = datasheet.Voc_stc;
    float Isc_stc = datasheet.Isc_stc;
    float Vmpp_stc = datasheet.Vmpp_stc;
    float Impp_stc = datasheet.Impp_stc;
    uint16_t NOCT = datasheet.NOCT;
    float alfaIsc = datasheet.alfaIsc;
    float alfaVoc = datasheet.alfaVoc;
    uint16_t G = datasheet.G;
    int8_t Ta = datasheet.Ta;

    uint8_t x0 = 5;
    uint8_t y0 = 60;
    uint8_t deltaX = 190;
    uint8_t deltaY = 24;
    tft.fillScreen(BLACK);
    showmsgXY(15, 20, 1, &FreeSans12pt7b, "Photovoltaic panel emulator", BLUE);
    tft.drawFastHLine(0, 30, tft.width(), YELLOW);
    showmsgXY(20, 55, 1, &FreeSans12pt7b, "Enter data from datasheet:", GREEN);
    showmsgXY(x0, y0, 1, &FreeSans12pt7b, "", GREEN);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 1, 1, &FreeSans12pt7b, "Voltage 0C, V", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 2, 1, &FreeSans12pt7b, "Current SC, A", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 3, 1, &FreeSans12pt7b, "Voltage MPP, V", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 4, 1, &FreeSans12pt7b, "Current MPP, A", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 5, 1, &FreeSans12pt7b, "NOCT, deg.C", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 6, 1, &FreeSans12pt7b, "TCI, %/deg.C ", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 7, 1, &FreeSans12pt7b, "TCV, %/deg.C -", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 8, 1, &FreeSans12pt7b, "G, W/m2", ORANGE);
    showmsgXY(x0, y0 + deltaY * 9, 1, &FreeSans12pt7b, "Ta, deg.C", ORANGE);
}

// функція вимірювання вихідної напруги
uint16_t measureVoltage() {
    uint8_t n = 200; // кількість замірів для усереднення
    uint32_t valueVoltage = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < n; i++) {
        valueVoltage = valueVoltage + analogRead(voltageOut);
    }
    valueVoltage = valueVoltage / n;
    return valueVoltage;
}

// функція вимірювання вихідного струму
uint16_t measureCurrent() {
    uint8_t n = 200; // кількість замірів для усереднення
    uint32_t valueCurrent = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < n; i++) {
        valueCurrent = valueCurrent + analogRead(currentOut);
    }
}

```

```

}
valueCurrent = valueCurrent / n;
uint16_t curSP = valueCurrent - 512; // значення I
if (curSP < 0) curSP = 0;
return curSP;
}

// статичні написи
void displayStaticVoltageCurrentPower() {
// tft.fillScreen(BLACK);
uint8_t X0 = 0;
uint16_t Y0 = 30;
uint8_t dX = 0;
uint16_t dY = 50;
showmsgXY(X0, Y0 + dY * 1, 2, &FreeSans9pt7b, "Voltage:", GREEN);
showmsgXY(218, Y0 + dY * 1, 2, &FreeSans12pt7b, ".", MAGENTA);
showmsgXY(265, Y0 + dY * 1, 2, &FreeSans9pt7b, "V", GREEN);
showmsgXY(X0, Y0 + dY * 2, 2, &FreeSans9pt7b, "Current:", GREEN);
showmsgXY(218, Y0 + dY * 2, 2, &FreeSans12pt7b, ".", RED);
showmsgXY(265, Y0 + dY * 2, 2, &FreeSans9pt7b, "A", GREEN);
showmsgXY(X0, Y0 + dY * 3, 2, &FreeSans9pt7b, "Power:", GREEN);
showmsgXY(218, Y0 + dY * 3, 2, &FreeSans12pt7b, ".", YELLOW);
showmsgXY(265, Y0 + dY * 3, 2, &FreeSans9pt7b, "W", GREEN);
}

// статичні написи
void displayStaticLoad() {
uint8_t X0 = 0;
uint16_t Y0 = 30;
uint8_t dX = 0;
uint16_t dY = 50;
showmsgXY(X0, Y0 + dY * 4, 2, &FreeSans9pt7b, "Load:", GREEN);
showmsgXY(218, Y0 + dY * 4, 2, &FreeSans12pt7b, ".", YELLOW);
showmsgXY(265, Y0 + dY * 4, 2, &FreeSans9pt7b, "Ohm", GREEN);
}

// функція індикації напруги
void displayVoltage(float V) {
uint8_t intVoltageNow = (int)V; // ціла частина V
uint8_t fractVoltageNow = int((V - (int)V) * 10); // дробова частина V
// змінні для індикації напруги та струму
static uint8_t intVoltagePrevious = 0;
static uint8_t fractVoltagePrevious = 0;
String myStr1 = "0";
String myStr2 = "0";
if (intVoltageNow != intVoltagePrevious) {
intVoltagePrevious = intVoltageNow;
String myStr1 = String(intVoltageNow);
if (intVoltageNow < 10) {
myStr1 = '0' + myStr1;
}
}
tft.fillRect(156, 35, 61, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
showmsgXY(155, 85, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr1, MAGENTA);
if (fractVoltageNow != fractVoltagePrevious) {
fractVoltagePrevious = fractVoltageNow;
String myStr2 = String(fractVoltageNow);
tft.fillRect(230, 35, 30, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
showmsgXY(230, 85, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr2, MAGENTA);
}
}

```

```

}
}

// функція індикації струму
void displayCurrent(float I) {
    uint8_t intCurrentNow = (int)I; // ціла частина I
    uint8_t fractCurrentNow = int((I - (int)I) * 10); // дробова частина I
    // змінні для індикації напруги та струму
    static uint8_t intCurrentPrevious = 0;
    static uint8_t fractCurrentPrevious = 0;
    String myStr1 = "0";
    String myStr2 = "0";
    if (intCurrentNow != intCurrentPrevious) {
        intCurrentPrevious = intCurrentNow;
        String myStr1 = String(intCurrentNow);
        if (intCurrentNow < 10) {
            myStr1 = '0' + myStr1;
        }
        tft.fillRect(156, 85, 61, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
        showmsgXY(155, 135, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr1, RED);
    }
    if (fractCurrentNow != fractCurrentPrevious) {
        fractCurrentPrevious = fractCurrentNow;
        String myStr2 = String(fractCurrentNow);
        tft.fillRect(230, 85, 30, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
        showmsgXY(230, 135, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr2, RED);
    }
}

// функція індикації потужності
void displayPower(float P) {
    uint16_t intPowerNow = (int)P; // ціла частина P
    uint8_t fractPowerNow = int((P - (int)P) * 10); // дробова частина P
    // змінні для індикації напруги та струму
    static uint16_t intPowerPrevious = 0;
    static uint8_t fractPowerPrevious = 0;
    String myStr1 = "0";
    String myStr2 = "0";
    if (intPowerNow != intPowerPrevious) {
        intPowerPrevious = intPowerNow;
        String myStr1 = String(intPowerNow);
        if (intPowerNow < 10) {
            myStr1 = "00" + myStr1;
        }
        if (intPowerNow > 10 && intPowerNow < 100) {
            myStr1 = '0' + myStr1;
        }
        tft.fillRect(122, 135, 95, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
        showmsgXY(122, 185, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr1, YELLOW);
    }
    if (fractPowerNow != fractPowerPrevious) {
        fractPowerPrevious = fractPowerNow;
        String myStr2 = String(fractPowerNow);
        tft.fillRect(230, 135, 30, 50, BLACK); // X0, Y0, dX, dY, колір
        showmsgXY(230, 185, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr2, YELLOW);
    }
}

// функція індикації навантаження

```

```

void displayLoad(float R) {
    uint8_t X0 = 0;
    uint16_t Y0 = 10;
    uint8_t dX1 = 125;
    uint8_t dX2 = 230;
    uint16_t dY = 225;
    // розрахунок та зафарбовування фоном тексту на дисплеї
    int16_t x1, y1;
    uint16_t w, h;
    uint16_t intLoadNow = (int)R; // ціла частина P
    uint8_t fractLoadNow = int((R - (int)R) * 10); // дробова частина P
    // змінні для індикації напруги та струму
    String myStr1 = String(intLoadNow);
    if (intLoadNow < 10) {
        myStr1 = "00" + myStr1;
    }
    if (intLoadNow > 10 && intLoadNow < 100) {
        myStr1 = '0' + myStr1;
    }
    // розрахунок та зафарбовування фоном тексту на дисплеї
    tft.getTextBounds(myStr1, X0 + dX1, Y0 + dY, &x1, &y1, &w, &h);
    tft.fillRect(x1, y1, w, h, BLACK);
    showmsgXY(X0 + dX1, Y0 + dY, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr1, ORANGE);
    String myStr2 = String(fractLoadNow);
    // розрахунок та зафарбовування фоном тексту на дисплеї
    tft.getTextBounds(myStr2, X0 + dX2, Y0 + dY, &x1, &y1, &w, &h);
    tft.fillRect(x1, y1, w, h, BLACK);
    showmsgXY(X0 + dX2, Y0 + dY, 1, &FreeSevenSegNumFont, myStr2, ORANGE);
}

// функція виведення на дисплей рядкових змінних
void showmsgXY(int x, int y, int sz, const GFXfont* f, String msg, uint16_t
color) {
    tft.setFont(f);
    tft.setCursor(x, y);
    tft.setTextColor(color);
    tft.setTextSize(sz);
    tft.print(msg);
}

// виведення заголовка
void ppe_ttf(uint8_t num) {
    tft.fillScreen(BLACK);
    switch (num) {
        case 0: //
            showmsgXY(105, 20, 1, &FreeSans9pt7b, "MAIN MENU", BLUE);
            break;
        case 1: //
            showmsgXY(5, 20, 1, &FreeSans9pt7b, "PHOTOVOLTAIC PANEL EMULATOR", BLUE);
            break;
        case 2: //
            showmsgXY(0, 20, 1, &FreeSans9pt7b, "OUTPUT VOLTAGE/CURRENT SETUP", BLUE);
            break;
        case 3:
            showmsgXY(30, 20, 1, &FreeSans9pt7b, "PHOTOVOLTAIC PANEL DATA", BLUE);
            break;
        case 4:
            showmsgXY(95, 20, 1, &FreeSans9pt7b, "POWER SUPPLY", BLUE);
            break;
    }
}

```

```

}
tft.drawFastHLine(0, 30, tft.width(), BLUE);
}

//-----PWM-----
/*
PWM16Begin(): Налаштування Timer5 для ШИМ.
PWM16EnableA(): Запуск виходу ШИМ на піні 46
PWM16A(unsigned int value): Встановлення значення ШИМ для піна 46
*/
// Встановлення 'TOP' для роздільної здатності ШИМ. Тактова частота 16 МГц.
// const unsigned int TOP = 0xFFFF; // 16-бітна роздільна здатність. 244 Гц ШИМ
//const unsigned int TOP = 0x7FFF; // 15-бітна роздільна здатність. 488 Гц ШИМ
// const unsigned int TOP = 0x3FFF; // 14-бітна роздільна здатність. 976 Гц ШИМ
// const unsigned int TOP = 0x1FFF; // 13-бітна роздільна здатність. 1953 Гц ШИМ
// const unsigned int TOP = 0x0FFF; // 12-бітна роздільна здатність. 3906 Гц ШИМ
//const unsigned int TOP = 0x07FF; // 11-бітна роздільна здатність. 7812 Гц ШИМ
// const unsigned int TOP = 0x03FF; // 10-бітна роздільна здатність. 15624 Гц ШИМ

void PWM16Begin() {
// Зупинка Timer/Counter5
TCCR5A = 0; // Регістр керування A Timer/Counter5 00000000
TCCR5B = 0; // Регістр керування B Timer/Counter5 00000000
TIMSK5 = 0; // Регістр маски переривань Timer/Counter5 00000000
TIFR5 = 0; // Регістр прапорів переривань Timer/Counter5 00000000
ICR5 = TOP; //
OCR5A = 0; // За замовчуванням 0% ШИМ 00000000
OCR5B = 0; // За замовчуванням 0% ШИМ 00000000
// Встановлення предільника тактової частоти на 1 для максимальної частоти ШИМ
TCCR5B |= (1 << CS50); // 00000001
// Встановлення Timer/Counter5 у режим генерації сигналу 14: Швидкий ШИМ з
TOP, встановленим через ICR5
TCCR5A |= (1 << WGM51); // 00000010
TCCR5B |= (1 << WGM53) | (1 << WGM52); // 00011001
}

void PWM16EnableA() {
// Увімкнення швидкого ШИМ на піні 46: встановлення OC5A при BOTTOM та
скидання OC5A при збігу з OCR5A
TCCR5A |= (1 << COM5A1); // 10000010
pinMode(PWM_PIN1, OUTPUT);
}

inline void PWM16A(unsigned int PWMValue) {
OCR5A = constrain(PWMValue, 0, TOP);
}

//-----

// функція встановлення величини ШИМ
void PWM(uint16_t valPWM) {
// uint16_t valuePWM = map(valPWM, 0, 1023, 0, TOP);
PWM16A(valPWM);
}

```



```

const uint8_t CE = 9; // Вказуємо піни CE
const uint8_t CSN = 10; // Вказуємо піни CSN
RF24 radio(CE, CSN);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Relay
  for (uint8_t i = 0; i < numRelay; i++) {
    pinMode(pinRelay[i], OUTPUT);
    digitalWrite(pinRelay[i], HIGH); // вимкнено
  }
  // TFT
  tft.initR(INITR_BLACKTAB); // ініціалізація чіпа ST7735S, чорний таб
  tft.fillScreen(ST7735_BLACK);
  tft.setRotation(1);
  tftPrintText("Load emulator", 0, 0, 2, ST7735_GREEN);
  tft.drawFastHLine(0, 20, tft.width(), ST7735_BLUE);

  MsTimer2::set(durationMin, incMin); // період 500ms
  MsTimer2::start();
}

void loop() {
  oneDay();
}

// ф-ція вимірювання електричних параметрів навантаження
void measure() {
  float voltage = pzem.voltage();
  String voltRMS = "Volt. " + String(voltage, 1) + " V";
  tftPrintText(voltRMS, 0, 25, 2, ST7735_RED);
  float current = pzem.current() - 0.037;
  if (current < 0) current = 0;
  String currRMS = "Curr. " + String(current, 3) + " A";
  tftPrintText(currRMS, 0, 45, 2, ST7735_RED);
  float power = pzem.power() - 0.5;
  if (power < 0) power = 0;
  String powRMS = "Power " + String(power) + " W";
  tftPrintText(powRMS, 0, 65, 2, ST7735_RED);
  float frequency = pzem.frequency();
  String freq = "Freq. " + String(frequency, 1) + " Hz";
  tftPrintText(freq, 0, 85, 2, ST7735_RED);
  float energy = pzem.energy() - 0.021;
  Serial.print("Energy: ");
  Serial.print(energy, 3);
  Serial.println("kWh");
  float pf = pzem.pf();
  String phase = "Kp " + String(pf, 3);
  tftPrintText(phase, 0, 105, 2, ST7735_RED);
}

// ф-ція переривання по хвилинах
void incMin() {
  minut++; // додати хвилину
  if (minut > 59) minut = 0;
}

// функція індикації годин
void showHours(uint8_t j) {

```



**В.13 Акт про складання дослідного зразка****ЗАТВЕРДЖЕНО**

Проректор з наукової та  
інноваційної діяльності  
Київського національного університету  
технологій та дизайну

Л.М. Ганущак-Сфіменко

» 6 2020 р.

**АКТ**

про складання дослідного зразка програмно-технічного комплексу  
за договором № ДЗ / 92 - 2019 від 08.11.2019, додатковою угодою № 1 від 19.03.2020

**«Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у  
системах енергоменеджменту локальних об'єктів»**

Ми, що нижче підписалися, представники Київського національного університету технологій та дизайну,

1. Панасюк Ігор Васильович – директор навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій;
2. Злотенко Борис Миколайович – завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки;
3. Демішонкова Світлана Анатоліївна – доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки

склали цей акт про те, що за результатами виконання етапу № 2 науково-технічної роботи здійснене складання дослідного зразка програмно-технічного комплексу, який містить пов'язані між собою інформаційними та силовими шинами змінного й постійного струмів модулі (Додаток, стор. 2) та працює за алгоритмами прошитого в мікроконтролері програмного коду.

**ВСТАНОВЛЕНО:** дослідний зразок програмно-технічного комплексу задовольняє умовам договору та технічного завдання.

**ВИСНОВКИ:** практичні результати та науково-технічна продукція, отримані під час виконання етапу № 2 науково-технічної роботи, будуть використані при проведенні випробувань дослідного зразка програмно-технічного комплексу у відповідності до технічного завдання.

Голова комісії

Члени комісії

І.В. Панасюк

Б.М. Злотенко

С.А. Демішонкова

## ***В.14 Акт випробувань дослідного зразка***

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Проректор з наукової та  
інноваційної діяльності  
Київського національного університету  
технологій та дизайну

 Л.М. Ганущак-Єфіменко

2020 р.

**АКТ**

про проведення випробувань дослідного зразка ПТК  
за договором № ДЗ / 92 - 2019 від 08.11.2019,  
додатковою угодою № 1 від 19.03.2020, додатковою угодою № 2 від 24.06.2020 р.

**«Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у  
системах енергоменеджменту локальних об'єктів»**

Ми, що нижче підписалися, представники Київського національного університету технологій та дизайну (далі – КНУТД), у складі комісії:

голова – головний інженер КНУТД Бобровник Володимир Миколайович

члени комісії:

провідний інженер Центру управління енергоефективністю КНУТД – Шермет Михайло Костянтинівич,

майстер виробничого навчання кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки КНУТД – Кругляк Геннадій Віталійович

склали цей акт про те, що дослідний зразок програмно-технічного комплексу (ПТК) управління електроспоживанням було змонтовано в Центрі енергоефективності Київського національного університету технологій та дизайну за адресою: пров. Є. Гуцала, 4-а, корпус 5, м. Київ, Україна 01011. Дослідний зразок пройшов випробування, включаючи необхідні пусконаладжувальні роботи разом із налаштуванням програмного забезпечення, відповідно до Програми та методики випробувань протягом двох днів: 30 листопада 2020 р. – з 8.30 до 18.00 год., 3 грудня 2020 р. – з 8.30 до 18.00 год..

За результатами випробувань дослідного зразка ПТК встановлено наступне:

1. В цілому підтверджено функціональну працездатність ПТК відповідно до умов проведення випробувань (осінньо-зимовий період, обмежена сонячна генерація).

2. Здійснено перевірку функції перемикання між режимами роботи системи в умовах проведення випробувань. Спостерігали перемикання системи під управлінням ПТК з режиму автономної роботи на байпас і зворотне перемикання.

3. Здійснено перевірку підключення ПТК до сайту та формування рекомендованого графіку навантаження та виведення поточної інформації на екран дисплею. Встановлено, що при невеликій сонячній генерації ефективність роботи системи є низькою, оскільки зниження витрат на оплату досягається в основному лише за рахунок використання накопиченої в АКБ «нічної» енергії, яка є достатньо великою.

4. Підтверджено коректність та наочність відображення поточної інформації на сенсорному екрані ПТК: інформації про рекомендовані графіки навантаження, ефективність функціонування та параметри системи.

5 В процесі проведення випробувань здійснено корегування комплексу документації на апаратну частину ПТК та програмного забезпечення ПТК.

#### ВИСНОВКИ:

1. Дослідний зразок ПТК, в цілому, відповідає вимогам, заявленим у Технічному завданні.

2. Визначення ступеню заряду акумуляторної батареї (АКБ) здійснюється згідно його струму і ККД в режимі розряду. Для підвищення точності визначення ступеню заряду АКБ слід передбачити корегування його значення згідно напрузі АКБ у відповідності з зарядними характеристиками.

3. Фактична потужність навантаження може відрізнятися від рекомендованого значення, що призведе до неповного використання можливостей системи і погіршенню показників. Отже, слід ввести функцію формування поточної рекомендації щодо оцінювання фактичної потужності навантаження, і, за необхідністю, виконати її корегування.

4. Випробування здійснені в період року з малою сонячною генерацією, коли ефективність використання системи є низькою і фактично визначається перерозподілом енергії за різними тарифами (нічним, денним і піковим), що здійснюється АКБ. Отже, випробування не дозволили оцінити роботу системи щодо ефективності використання сонячної енергії та її перерозподілу між навантаженням і АКБ.

5. Встановлено доцільність продовження випробувань дослідного зразка ПТК в умовах різних рівнів сонячної генерації. Для скорочення терміну випробування ПТК за різних умов (літо, осінь, весна), для мінімізації витрат на проведення випробувань рекомендується використовувати експериментальну установку.

3. Рекомендується продовжити роботи з удосконалення ПТК у напрямку покращення зручності інтерфейсу користувача; комбінування сонячної батареї з вітрогенератором, що буде сприяти підвищенню ефективності системи для споживача.

Голова комісії



В.М Бобровник

Члени комісії



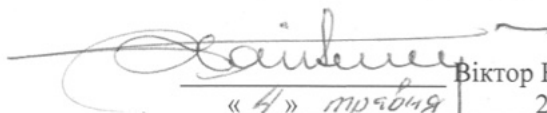
М.К. Шеремет

Г.В. Кругляк

## ДОДАТОК Г.

**Г.1 Акт впровадження результатів дисертаційної роботи**

Директор Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор технічних наук, професор

  
Віктор КАПЛІУН  
« 4 » травня 2026 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Кругляка Г.В., зокрема:

- розроблені математичні та комп'ютерні моделі, алгоритми і методики моделювання динамічного затінення, а також адаптивні топології фотоелектричних масивів;
- методика прогнозних алгоритмів управління енергоспоживанням за багатозонної тарифікації та програмно-технічний комплекс для її реалізації,

впроваджені в освітній процес кафедри інженерії енергосистем Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України) та будуть використані при вивченні дисциплін «Електростанції з відновлюваними джерелами», «Системи акумулювання та розподілення електроенергії» за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами» підготовки здобувачів освітнього ступеню «Бакалавр», а також «Моніторинг та керування електричними системами» за освітньо-науковою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» підготовки здобувачів освітнього ступеню «Магістр» спеціальності G3 «Електрична інженерія» відповідно.

Завідувач кафедри інженерії енергосистем ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, кандидат технічних наук, доцент

  
Євген АНТИПОВ

Гарант ОНП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», доцент кафедри інженерії енергосистем ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, кандидат технічних наук, доцент

  
Віктор ТРОХАНЯК

Гарант ОПП «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами», доцент кафедри інженерії енергосистем ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, кандидат технічних наук, доцент

  
Світлана МАКАРЕВИЧ